



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

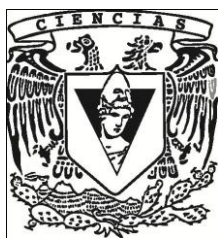
**IMPACTO DE TORMENTAS EN LA ZONA COSTERA  
DEL ESTADO DE YUCATÁN**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADO EN MANEJO SUSTENTABLE  
DE ZONAS COSTERAS**

**P R E S E N T A :**

**MIGUEL ANGEL TREJO RANGEL**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ERNESTO TONATIUH MENDOZA PONCE  
YUCATÁN, MÉXICO, 2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**Hoja de Datos del Jurado**

1. Datos del alumno  
Trejo  
Rangel  
Miguel Angel  
99 91 64 67 94  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Manejo Sustentable de Zonas Costeras  
305056276
  
2. Datos del tutor  
Dr  
Ernesto Tonatiuh  
Mendoza  
Ponce
  
3. Datos del sinodal 1  
Dr  
Alec  
Torres  
Freyermuth
  
4. Datos del sinodal 2  
M en C  
Christian Mario  
Appendini  
Albrechtsen
  
5. Datos del sinodal 3  
M en C  
Karina  
Cruz  
Vázquez
  
6. Datos del sinodal 4  
Dra  
Cecilia Elizabeth  
Enríquez  
Ortiz
  
7. Datos del trabajo escrito  
Impacto de Tormentas en la Zona Costera del Estado de Yucatán  
100p  
2012



*El Mar*

*NECESITO del mar porque me enseña:  
no sé si aprendo música o conciencia:  
no sé si es ola sola o ser profundo  
o sólo ronca voz o deslumbrante  
suposición de peces y navíos.  
El hecho es que hasta cuando estoy dormido  
de algún modo magnético círculo  
en la universidad del oleaje.  
No son sólo las conchas trituradas  
como si algún planeta tembloroso  
participara paulatina muerte,  
no, del fragmento reconstruyo el día,  
de una racha de sal la estalactita  
y de una cucharada el dios inmenso.*

*¡Lo que antes me enseñó lo guardo! Es aire,  
incesante viento, agua y arena.*

*Parece poco para el hombre joven  
que aquí llegó a vivir con sus incendios,  
y sin embargo el pulso que subía  
y bajaba a su abismo,  
el frío del azul que crepitaba,  
el desmoronamiento de la estrella,  
el tierno desplegarse de la ola  
despílfarrando nieve con la espuma,  
el poder quieto, allí, determinado  
como un trono de piedra en lo profundo,  
substituyó el recinto en que crecían  
tristeza terca, amontonando olvido,  
y cambió bruscamente mi existencia:  
dí mi adhesión al puro movimiento.*

*Pablo Neruda*



## **Agradecimientos**

A mis padres, Ana y Miguel que tanto quiero y admiro, ellos que me han acompañado brindándome su apoyo incondicional.

A Sarai, Camila y el resto de mi familia que han sido parte de mi inspiración para continuar día a día.

A mi director Tonatiuh Mendoza, que me ha guiado completamente en la elaboración de la tesis, trabajo con el que concluyo una etapa muy importante de mi vida.

A mis tutores y sinodales, Alec Torres, Christian Appendini, Cecilia Enríquez y Karina Cruz que han dispuesto de su tiempo y conocimiento para que este trabajo se lleve a cabo.

A Elena Ojeda y Lucia Robles que se han tomado el tiempo para revisar esta tesis.

A Luis, Mayra y Diego, que me han brindado completamente su amistad y de quienes he aprendido a continuar disfrutando de esta vida.

A mis compañeros y amigos de la universidad que he ganado para toda la vida, aun cuando cada uno vayamos por caminos distintos, a ustedes Lalo, Dalia, Paulina, Zzabinha, Aleja, Chiva, Mariana, Deivid, Chabe y Yaz.

A cada uno de los profesores de la licenciatura que ha contribuido a mi formación como manejador.

A la máxima casa de estudios de México, la UNAM por ser parte fundamental en mi desarrollo profesional y personal.

Al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería de la UNAM, los compañeros de oficina y de servicio social que me han apoyado en la realización del trabajo y/o simplemente hicieron que este proceso fuera aún más agradable.

Y finalmente al apoyo para esta investigación enmarcado dentro del proyecto CONACYT FOMIX Yucatán-106400 "Peligro, vulnerabilidad y riesgo asociados a la erosión e inundaciones en el litoral del estado de Yucatán. Diagnóstico, pronóstico y propuestas de mitigación y conservación".





## **CONTENIDO**

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Antecedentes</b> .....	4
<b>Justificación</b> .....	6
<b>Objetivos</b> .....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	7
<b>Zona de Estudio</b> .....	8
<b>I. Marco Teórico</b> .....	11
I.I. Teoría del Oleaje.....	11
I.II. Mareas.....	17
I.III. Playas.....	19
I.IV. Tormentas.....	23
I.V. Erosión.....	26
I.VI. Inundación.....	29
<b>II. Metodología</b> .....	32
II.I. Caracterización de Tormentas.....	32
II.I.I. Datos.....	32
II.I.II. Identificación de tormentas.....	33
II.I.III. Clasificación y selección de tormentas.....	34
II.II. Caracterización de Playas.....	35
II.II.I. Perfiles de playa.....	35
II.II.II. Análisis granulométrico.....	37
II.II.III. Longitud de playas arenosas del estado de Yucatán.....	38
II.III. Evaluación de Erosión Costera.....	38

II.III.I. Análisis de erosión.....	38
II.III.II. Análisis de inundación.....	43
II.IV. Indicadores.....	45
II.IV.I. Indicador de potencial de erosión.....	45
II.IV.II. Indicador de potencial de inundación.....	46
II.IV.III. Indicador de peligrosidad.....	47
II.IV.IV. Elaboración de mapas de potencial de erosión, inundación y peligrosidad.....	47
II.V. Cuantificación de longitud de costa con potencial a impactos de tormenta.....	47
<b>III. Resultados y discusiones.....</b>	<b>49</b>
III.I. Tormentas clasificadas y caracterizadas.....	49
III.II. Caracterización de playas.....	52
III.III. Respuesta de la playa.....	53
III.III.I. Erosión costera.....	53
III.III.II. Run up.....	54
III.IV. Indicadores de potencial de erosión, inundación y peligrosidad.....	56
III.IV.I. Indicadores de potencial de erosión, inundación y peligrosidad a tormentas tipo IV.....	58
III.IV.II. Indicadores de potencial de erosión, inundación y peligrosidad a tormentas tipo V.....	63
III.IV.III. Potencial de erosión en la costa expresada en porcentaje..	68
III.IV.IV. Potencial de inundación en la costa expresada en porcentaje.....	69
III.IV.V. Potencial de peligrosidad en la costa expresada en porcentaje.....	71
<b>IV. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>72</b>

**Bibliografía**.....74  
**Anexo**.....83

## **Lista de figuras**

Figura 1. a. Plataforma Petrolera “Akal B” en la Sonda de Campeche, b. Playa de Cancún, Quintana Roo, México, c. Puerto Progreso, Yucatán, México.....	1
Figura 2. a. Vivienda afectada por la erosión en la costa central del Estado de Yucatán, b. Inundación en Celestún al paso de la tormenta “Arlene” en Junio de 2011.....	5
Figura 3. Zona de estudio y ubicación de sitios de muestreo, Costa del Estado de Yucatán.....	8
Figura 4. Trayectoria de Huracanes desde 1842.....	10
Figura 5. Onda senoidal.....	12
Figura 6. Superposición de ondas en un estado típico del mar.....	12
Figura 7. Movimiento de las moléculas de agua en las olas.....	13
Figura 8. Divergencia y convergencia en la costa.....	14
Figura 9. Rompimiento de olas en la costa.....	15
Figura 10. Tipo de rotura deslizante.....	16
Figura 11. Tipo de rotura zambullida.....	16
Figura 12. Tipo de rotura frontal.....	16
Figura 13. Clasificación de rompientes.....	17
Figura 14. Marea cuando los astros se encuentran cuando la luna o sol se encuentran perpendiculares al ecuador.....	18
Figura 15. Marea cuando los astros se encuentran cuando la luna o sol no se encuentran perpendiculares al ecuador.....	19
Figura 16. Perfil típico de playa.....	20
Figura 17. Perfil de playa disipativo.....	21
Figura 18. Perfil de playa reflejante.....	22
Figura 19. Mérida Yucatán después del huracán Isidoro, septiembre de 2002.....	25
Figura 20. Distribución del número de tormentas tropicales y huracanes en el Atlántico Norte de 1851 a 2000.....	26
Figura 21. El alcance de la erosión costera en la zona de residencias y negocios de la costa de Yucatán.....	27

Figura 22. Erosión del sistema dunar.....	27
Figura 23 a. Deterioro de obras de protección costera y b. obras de restauración de playas.....	27
Figura 24. Diagrama del contacto del oleaje de tormenta sobre la playa y duna.....	29
Figura 25. Clasificación básica de los tipos de inundación de acuerdo a su origen.....	30
Figura 26. Cota de inundación provocada por una marea meteorológica.....	31
Figura 27. Ubicación de nodos de oleaje a una profundidad 10m (triángulos) y perfiles de playa (círculos).....	33
Figura 28. Archer Field PC y GPS diferencial Mallegan.....	36
Figura 29. Medición de perfiles de playa, diciembre de 2010.....	36
Figura 30. Pendientes de playa (tan $\alpha$ y $\beta$ ).....	44
Figura 31. Esquema de erosión costera posterior a una tormenta.....	45
Figura 32. Esquema de inundación costera ante una tormenta.....	46
Figura 33. Clasificación de tormentas mediante análisis de clúster.....	49
Figura 34. Valores promedio para cada tipo de tormenta.....	50
Figura 35. Valores de pendiente de playa y número de Iribarren.....	52
Figura 36. Valores de $D_{50}$ de las playas de Yucatán.....	53
Figura 37. Retrocesos de línea de costa resultante después de una tormenta con respecto al perfil inicial .....	54
Figura 38. Valores de run up para cada clase de tormenta en diferentes locaciones de la costa de Yucatán.....	55
Figura 39. Valores de <i>run up</i> más marea astronómica para cada clase de tormenta en diferentes localidades de la costa de Yucatán.....	55
Figura 40. Indicador de potencial de erosión.....	56
Figura 41. Indicador de potencial de inundación.....	57
Figura 42. Indicador de peligrosidad.....	58
Figura 43. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en los municipios de Celestún y Hunucmá.....	59

Figura 44. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en los municipios de Progreso, Ixil y Dzemul.....	60
Figura 45. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en los municipios de Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún y Dzilam de Bravo.....	61
Figura 46. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en los municipios de San Felipe y Río Lagartos.....	62
Figura 47. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en el municipio de Tizimín.....	63
Figura 48. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en los municipios de Celestún y Hunucmá.....	64
Figura 49. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en los municipios de Progreso, Ixil y Dzemul.....	65
Figura 50. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en los municipios de Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún y Dzilam de Bravo.....	66
Figura 51. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en los municipios de San Felipe y Río Lagartos.....	67
Figura 52. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en el municipio de Tizimín.....	68
Figura 53. Porcentaje de longitud de costa con potencial de erosión en respuesta a cada uno de los cinco tipos de tormenta.....	69
Figura 54. Porcentaje de longitud de costa con potencial de inundación en respuesta a cada uno de los cinco tipos de tormenta.....	70
Figura 55. Porcentaje de longitud de costa con potencial de peligrosidad en respuesta a cada uno de los cinco tipos de tormenta.....	71
Figura 56. Escala del tamaño de grano modificado por Udden (1914) y Wentworth (1922).....	83

**Lista de tablas**

Tabla 1. Matriz de valores del IP.....47

Tabla 2. Valores promedio de cada clase de tormentas clasificada.....50

Tabla 3. Eventos de cada tipo de tormenta caracterizados y modelados, para conocer la respuesta de la playa de los sitios de muestreo.....51

Tabla 4. Coordenadas de los nodos de donde se han tomado los datos de oleaje de tormenta.....84

Tabla 5. Coordenadas de los 26 sitios de muestreo en la zona costera del Estado de Yucatán.....85



## Introducción

Con sus más de 11 000 km de litoral, México es un país con una alta vocación costera y marina. Debido a la extensión litoral ocupa el segundo lugar en América y el décimo cuarto en el mundo, mientras que por su extensión marítima (Zona Económica Exclusiva) ocupa el noveno lugar en el mundo (Juárez y Padilla, 1995). La gran diversidad de escenarios con relevancia ambiental en las costas y mares, así como las actividades que en ella se realizan, ejemplifican la importancia de estas zonas. Por ejemplo, la extracción de hidrocarburos (Figura 1a), el turismo (Figura 1b), la transportación marítima y portuaria (Figura 1c), la industrial, la acuicultura, la agropecuaria y la pesca, entre otras (SEMARNAT, 2006).



Figura 1. a. Plataforma Petrolera “Akal B” en la Sonda de Campeche (Fuente: PEMEX, 2008), b. Playa de Cancún, Quintana Roo, México (Fuente: El Universal, 2012), c. Puerto Progreso, Yucatán, México (Fuente: Comunidad Portuaria de Yucatán, 2009).

Aunado a la importancia económica, está el crecimiento poblacional en las zonas costeras y su exposición a los peligros que en ésta se presentan. En el año 2005, se estimó que aproximadamente el 20% de la población total de México residía en los 261 municipios costeros (CIMARES, 2007). Dicha población se

encuentra expuesta a sufrir los efectos producidos por la ocurrencia de eventos naturales extremos, como son las tormentas costeras, huracanes, entre otros.

Los desastres generan importantes pérdidas económicas, de acuerdo con lo reportado por Swiss Re Economic Research & Consulting, en el año 2011 estas alcanzaron los 370 887 (millones de dólares) a nivel mundial. De las 325 catástrofes reportadas para ese año, 150 son de origen humano y 175 de origen natural, de estas últimas el 80.5% están relacionadas con inundaciones y tormentas, generando pérdidas de vidas humanas y económicas de 57 414 millones de dólares.

El impacto que tienen los desastres en la zona costera se puede evaluar mediante indicadores. Estos son medidas verificables de cambio o resultado, que facilitan estudiar dónde estamos y hacia donde nos dirigimos con objetivos específicos y metas, Han funcionado como herramienta para la toma de decisiones en muchas áreas aplicadas a aspectos ambientales, económicos, de vulnerabilidad, peligrosidad y riesgo. Su utilidad radica en la facilidad para ser interpretados y en la representatividad de información de relevancia para el desarrollo y prevención de actividades antrópicas (Organización de las Naciones Unidas ONU, 1999). En el informe resultado de la reunión de la UNDRR (1999), con la finalidad de hacer una unificación de términos, se incluyeron las siguientes definiciones:

Peligro o peligrosidad (*Hazard-H*): Evento físico, fenómeno o actividad humana con el potencial de resultar en daño.

Vulnerabilidad (*Vulnerability-V*): Grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un peligro, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.

Riesgo específico (*Specific Risk-Rs*): Grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un peligro y como una función de la vulnerabilidad.

Como alternativa para la generación de estrategias ante desastres se recomienda el análisis de riesgos mediante mapas como herramienta de gestión. Estos mapas son fundamentales para tomar acciones en el diseño y la aplicación de medidas de mitigación como la zonificación urbana y los reglamentos de construcción, porque ayudan a entender amenazas y peligros. La declaración y plan de acción de Yokohama de 1994 (IDNDR, 1994) estableció como principio básico que el análisis de riesgos es clave para lograr el éxito en la reducción de desastres. El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha facilitado la elaboración de mapas de escenarios aumentando la confiabilidad y capacidad de

respuesta a través de una mayor eficiencia en el uso de información y capacidad de respuesta (Palacio, 2004).

## **Antecedentes**

Siendo la península de Yucatán una de las zonas con mayor exposición a eventos de tormenta (SEMARNAT, 2008). El daño causado por este tipo de eventos depende en gran medida de la combinación de la morfología de las playas y las tormentas, viento y oleaje, siendo este último un parámetro importante en la evaluación de impactos costeros (Bromirski y Kossi, 2008).

Entre los desastres naturales potencialmente peligrosos en el caso específico de Yucatán destacan la erosión costera y la inundación de playas de origen marino (Figura 2). La erosión costera es un fenómeno natural que se origina por la interacción de procesos climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentarios con la morfología costera y con la batimetría de fondo de la zona costera, lo que puede ocasionar un retroceso en la línea de costa (Guido *et al.* 2009), así como la destrucción o afectación de la vegetación (García *et al.* 2011).

La Consultoría en Ingeniería Marítima y Ambiental (2011) estimó que en los últimos años las playas del norte de Yucatán han sufrido efectos de procesos erosivos, de varios metros por año. La erosión costera es actualmente un reto para las autoridades de Yucatán y los habitantes del litoral costero, los cuales han implementado un manejo inapropiado de la problemática, con la construcción de infraestructura que interrumpe los procesos de transporte de sedimento. Esto ha contribuido a agudizar el problema (Figura 2a) aumentando así el riesgo en sus mismas propiedades y reduciendo los servicios ambientales de las playas (García *et al.* 2011).

Las inundaciones costeras son un aumento anormal del nivel del mar, asociado a los fuertes vientos y al oleaje inducido por el impacto de tormentas (OPS, 2003), durante las cuales se cubren porciones de tierra que normalmente se encuentran secas. Estos eventos se encuentran entre los peligros costeros que impactan a las comunidades de manera más frecuente, con costos económicos y de vidas humanas. Adicionalmente, se ha visto que las inundaciones pueden ser intensificadas debido al cambio climático y al incremento en el nivel del mar, por lo que es importante conocer los riesgos por inundación y entender el potencial de sus efectos (NOAA, 2012).



Figura 2. a. Vivienda afectada por la erosión en la costa central del Estado de Yucatán, b. Inundación en Celestún al paso de la tormenta “Arlene” en Junio de 2011 (Fuente: HolaYucatán, 2011).

Los impactos generados por tormentas están contemplados en reportes y protocolos de diferentes agencias y gobiernos como lo son el reporte “Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad” (Naciones Unidas para el Socorro en Caso de Desastres UNDRO, 1979), el protocolo de manejo integral de la zona costera del Mediterráneo (PAP/RAC, 2007) y el Atlas de Riesgos Costeros de la National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA (2006), entre otros. En ellos se sugiere la importancia de la evaluación de dichos impactos para la generación de información y así proponer medidas preventivas para la conservación y protección de comunidades costeras y recursos naturales.

En el estado de Yucatán como herramienta de ordenamiento territorial cuenta con un mapa de fragilidad a la erosión considerando sólo el ancho de la isla de barrera (POETCY, 2006) y otro de peligro por inundación por lluvia que solo incluye cinco de los 13 municipios costeros con índices a escala municipal (CENAPRED, 2007). Siendo notable la carencia de herramientas para la prevención de riesgos y surgiendo la necesidad de elaborarlas para mitigar el impacto de futuros eventos sobre la zona costera.

## **Justificación**

El asentamiento de poblaciones en la zona costera del estado de Yucatán se ha incrementado en los últimos años. En la actualidad, el problema de erosión e inundación costera se ha hecho evidente en varios puntos del litoral Yucateco y por lo tanto el presente trabajo caracteriza el peligro de eventos de oleaje de tormenta y evalúa el potencial de erosión e inundación para las playas arenosas de la costa del estado de Yucatán. La necesidad de estudios de este tipo es indiscutible dada la transcendencia que tienen los efectos de las tormentas costeras en la calidad de vida de los habitantes de Yucatán y la carencia de herramientas de prevención de riesgos en la región.

## **Objetivos**

### Objetivo general

Evaluar la peligrosidad a erosión e inundación inducida por eventos de oleaje de tormenta en las playas arenosas de la costa del estado de Yucatán.

### Objetivos Particulares

- Generar una clasificación de eventos de tormenta en términos de oleaje.
- Evaluar la respuesta de las playas ante el impacto de las tormentas.
- Implementar indicadores de peligrosidad de erosión e inundación.
- Generar mapas de peligrosidad.

## Zona de Estudio

El estado de Yucatán se ubica en el sureste de México (Figura 3) con coordenadas  $19^{\circ}32' - 21^{\circ}38' N$ ,  $87^{\circ}22' - 90^{\circ}24' W$ , limitando con el estado de Campeche al oeste y al suroeste, con el estado de Quintana Roo al este y sureste y con el Golfo de México al Norte. La superficie continental del estado es equivalente al 2% de la superficie continental del país, con  $39\,600\text{ Km}^2$ . La longitud de la línea de costa es de aproximadamente 350 km, de los cuales 260 km son playas arenosas, equivalente al 2.2% del litoral costero nacional (INEGI, 2005). De los 106 municipios de Yucatán 13 son costeros, con una población de 194 592 habitantes, equivalente al 10% de la población total del estado (INEGI, 2010).

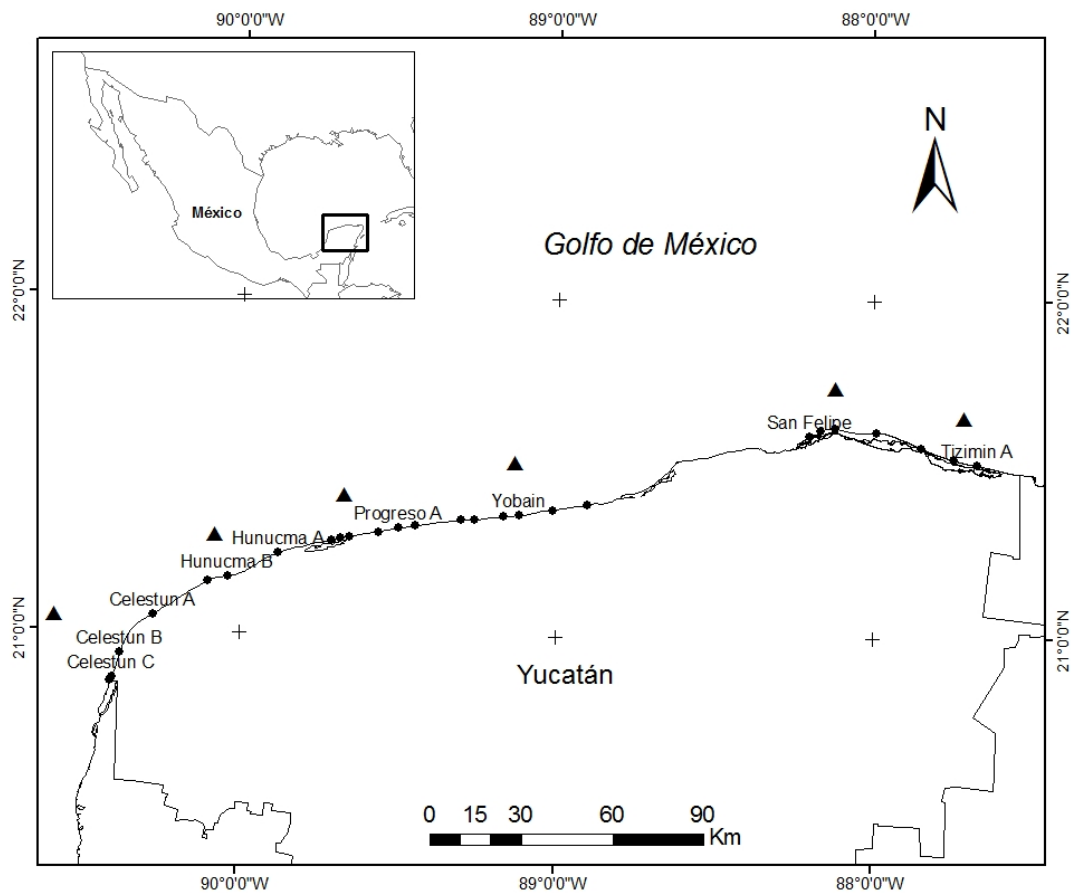


Figura 3. Zona de estudio y ubicación de sitios de muestreo, Costa del Estado de Yucatán.



Yucatán se encuentra en la provincia fisiográfica nombrada *Península de Yucatán*, y su territorio queda enclavado en dos subprovincias: a) *Carso Yucateco* en donde se ubica casi el 88% del estado y b) *Carso y Lomeríos de Campeche*, en la parte sur de la entidad, con 12 %. La mayor parte del territorio lo conforma una llanura que se formó como producto de la aparición de una plataforma marina, siendo la zona de Yucatán relativamente plana y baja (PNUD, 2010).

La geología regional es de naturaleza kárstica con un alto contenido de agua entre oquedades, fracturas y conductos. El agua continental descarga a través de estos conductos directamente al mar o a las lagunas, a veces evidentemente y otras de manera difusa en sitios desconocidos (Mariño y Enríquez, 2010).

En la zona costera, se han desarrollado playas y cuerpos de agua como el estero de Celestún, Yucalpetén, El Islote y Ría Lagartos. Al sur, se localiza el cerro de mayor altitud entre la llanura y el lomerío, Benito Juárez con 210 metros sobre el nivel del mar (msnm). Como resultado del movimiento de fragmentos o placas tectónicas de la corteza terrestre se formó una elevación muy estrecha y alargada en dirección noroeste-sureste que se conoce como Sierrita de Ticul (INEGI, 2010).

El estado presenta roca sedimentaria del Período Terciario y se localiza en todo el estado excepto en su parte norte; donde aflora la roca sedimentaria del Cuaternario. Paralelamente a la línea de costa se ubica el suelo. Toda la superficie estatal queda comprendida en la Era del *Cenozoico* con una edad aproximada de 63 millones de años. (INEGI, 2011).

El 85.5% de la superficie del estado presenta un clima cálido subhúmedo y el restante 14.5% presenta un clima seco y semiseco, que se localiza en la parte norte del estado. La temperatura media anual es de 26°C, la temperatura máxima promedio es alrededor de 36°C y se presenta en el mes de mayo, la temperatura mínima promedio es de 16°C y se presenta en el mes de enero. La precipitación media estatal es de 1 100 mm anuales, siendo los meses de junio a octubre los que presentan los niveles más elevados de precipitación (INEGI, 2011).

El territorio marino costero del estado presenta una variabilidad ambiental intra-anual, derivada principalmente de la temporalidad del régimen de lluvias, vientos y temperatura. Las condiciones climáticas regionales han permitido definir tres estaciones climáticas a lo largo del ciclo anual, cuyos límites no están siempre bien definidos: la estación de secas (de marzo a mayo); estación de lluvias (de junio a octubre) y frentes fríos provenientes del norte: llamados "nortes" (de noviembre a febrero). Adicionalmente, la Península de Yucatán experimenta una temporada de huracanes que ocurre entre junio y noviembre (Durán, 2011).

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2010), la Península de Yucatán se encuentra entre tres de las seis regiones donde se

generan tormentas tropicales y huracanes. Estas regiones corresponden a la porción sur del Golfo de México (Sonda de Campeche), el mar Caribe y la porción occidental del Océano Atlántico (Figura 4), siendo en esta última donde se generan los fenómenos de mayor potencia y recorrido. Entre 1966 y el año 2003, la región costera de Yucatán se ha visto afectada por 13 huracanes, siendo los más dañinos Gilberto (1988), Opal-Roxanne (1995) e Isidoro (2002).

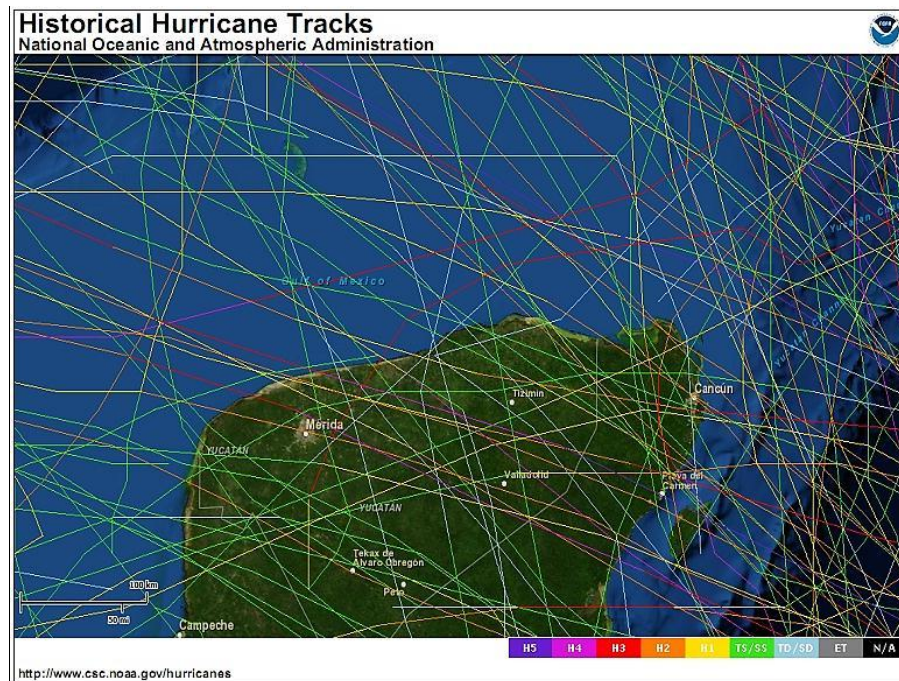


Figura 4. Trayectoria de Huracanes desde 1842 (Fuente: NOAA/ Coastal Services Center, 2012).

# I. Marco Teórico

## I.I. Teoría del Oleaje

El oleaje es un agente importante a estudiar en un análisis de peligrosidad de la zona costera, por ser un proceso que tiene una interacción directa con los sistemas costeros, aun cuando se origina en zonas distantes al continente.

Las ondas de los océanos son originadas por diversas causas: viento, fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la luna y el sol sobre las masas oceánicas, maremotos, diferencias de presión, tormentas, etc. Sin embargo, de todas ellas, el viento es el agente que incide en la generación de las ondas más comunes y de mayor densidad energética que impactan a la costa. Cuando el viento sopla a través de la superficie del mar las moléculas de aire interactúan con las moléculas de agua que están en contacto. La fuerza que se genera entre el aire y el agua modifica la superficie del océano, dando lugar a pequeños rizos, conocidos como ondas de capilaridad. Las ondas de capilaridad dan lugar a una mayor superficie de contacto, la cual incrementa la fricción entre agua y viento, ello da lugar al crecimiento de la ola que, cuando ha alcanzado un cierto tamaño, facilita que el viento pueda ejercer una mayor presión sobre ella con el consiguiente incremento de la misma (Calero *et al.* 2004).

Las ondas se caracterizan por su longitud de onda,  $L$ , altura de onda,  $H$ , y el periodo,  $T$  (Figura 5). La longitud de onda es la distancia entre dos crestas consecutivas; la altura de onda es la diferencia en altura entre una cresta y un valle; y el periodo es el tiempo en segundos que tarda un valle o un pico de la ola en recorrer su longitud de onda. La frecuencia,  $f$ , de la ola se define como el número de oscilaciones cresta a cresta (o valle a valle) de la superficie de la ola por segundo, visto por un observador fijo, siendo el inverso del periodo.

$$f = 1/T \qquad \text{Ecuación 1.}$$

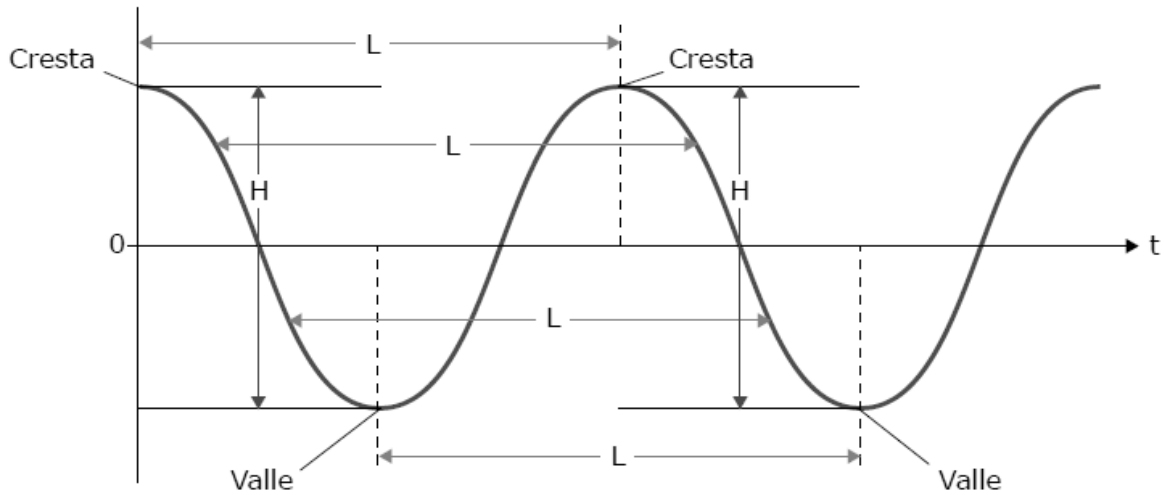


Figura 5. Onda senoidal (Fuente: Calero *et al.* 2004).

El océano no se compone de ondas sinusoidales puras como se han representado en la figura anterior, más bien presenta una superposición de muchas de ellas, cuya superficie puede ser reconstruida como suma de ondas de amplitud variable (Figura 6). Es la combinación de estas ondas lo que se observa cuando se mira la superficie del mar. La envolvente de estas ondas viaja a una velocidad distinta de la de las ondas individuales y se la denomina velocidad de grupo,  $c_g$ .

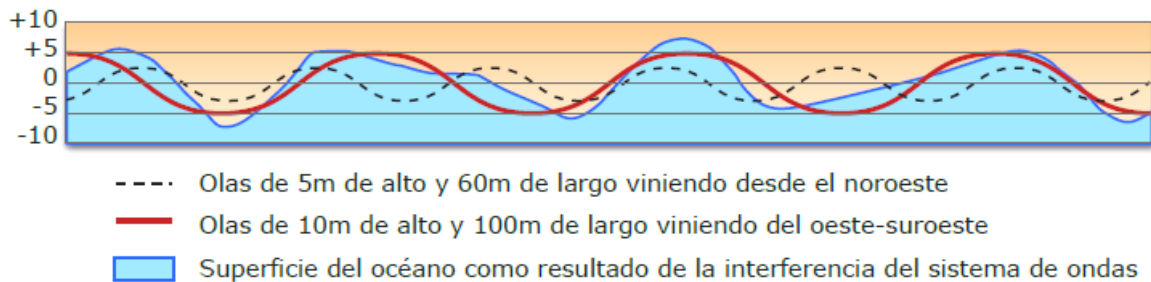


Figura 6. Superposición de ondas en un estado típico del mar (Fuente: Calero *et al.* 2004).

Las ondas de los océanos están constituidas por moléculas de agua que se mueven formando círculos. En la superficie del agua, en aguas profundas, los movimientos son del mismo tamaño que la altura de ola, pero estos movimientos disminuyen exponencialmente en tamaño al descender debajo de la superficie. El comportamiento de las ondas depende en gran medida de la relación que existe entre el tamaño de las ondas y la profundidad del agua donde ésta se está moviendo.

El movimiento de las moléculas de agua cambia de forma circular a elipsoidal cuando una ola llega a la costa y la profundidad del agua disminuye produciéndose un movimiento más horizontal (Figura 7).

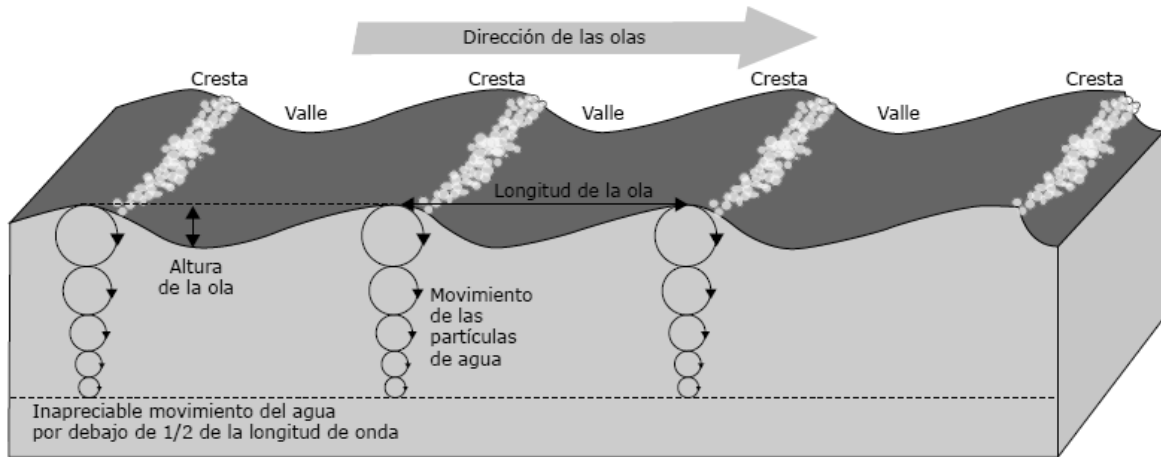


Figura 7. Movimiento de las moléculas de agua en las ondas (Fuente: Calero *et al.* 2004).

La velocidad o celeridad de ola  $c$ , en aguas someras se ve afectada por la profundidad, esta condición se cumple cuando la razón entre profundidad,  $h$ , y la longitud de onda es menor a 0.5.

$$c = \sqrt{gh} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Para aguas de profundidades intermedias, en donde generalmente la altura de ola es mucho menor que su longitud, teóricamente se describe su movimiento de la siguiente forma:

$$c = \sqrt{g/k \cdot \tanh(kh)} \quad \text{Ecuación 3.}$$

donde:

$k = 2\pi/L$ , Número de onda

$h$  = Profundidad del agua

$L$  = Longitud de onda

$g$  = Aceleración de la gravedad

$\tanh$  = Tangente hiperbólica

De ser el caso de aguas profundas, en donde la relación entre profundidad y longitud de onda es mayor que 0.5, el término  $kh$  es muy grande y la  $\tanh(kh)$  es muy próxima a la unidad, por lo tanto la expresión simplificada se expresa como:

$$c = gT/2\pi \quad \text{Ecuación 4.}$$

La velocidad de las ondas va disminuyendo y la dirección tenderá hacia la formación de un ángulo perpendicular a la batimetría conforme se aproxime a la costa, generando el fenómeno de refracción del oleaje. Las condiciones del oleaje se van modificando en función de su acercamiento a la costa, respondiendo a la batimetría y morfología de la zona, surgiendo fenómenos como el que se muestra en la Figura 8, en donde se caracteriza el comportamiento del oleaje visto de planta. Las líneas trazadas que se juntan están indicando la convergencia de energía de la ola (aumento de altura de ola), ya que el frente de las ondas se comprime, lo cual implica un aumento en su altura. Mientras que una separación de las líneas trazadas perpendicularmente al frente de ondas indica divergencia de energía (menor altura), equivalente a que el frente de ola se expande.

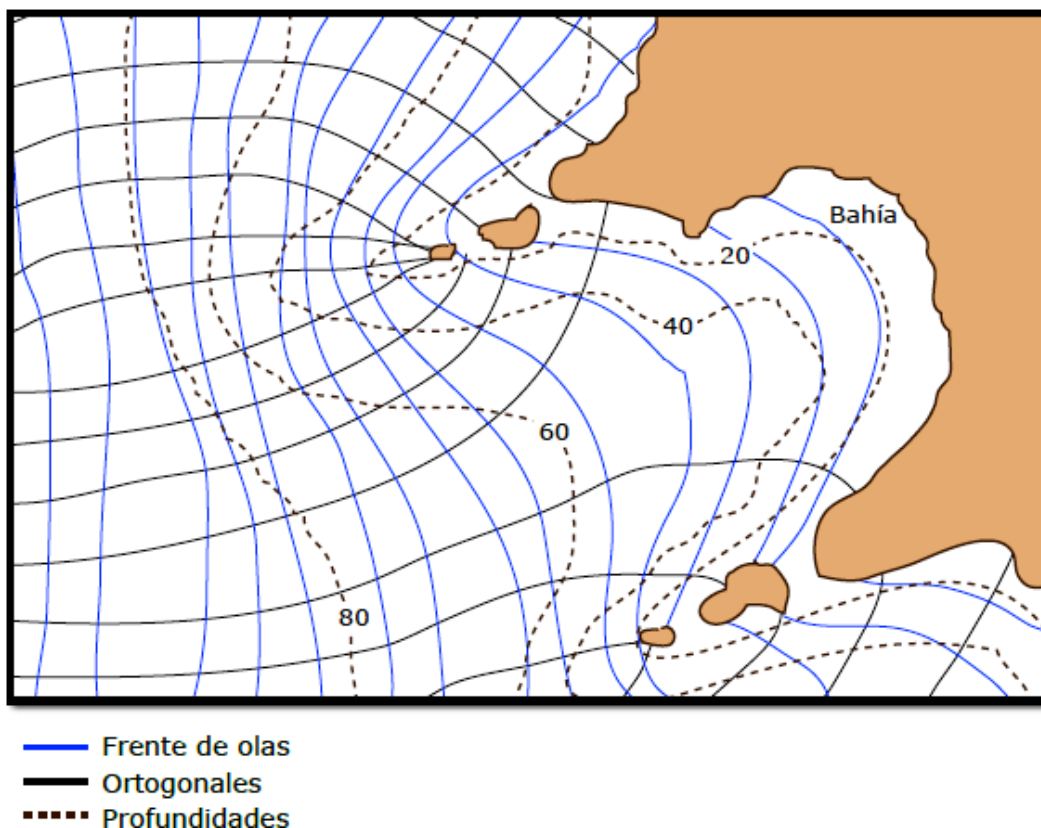


Figura 8. Divergencia y convergencia en la costa (Fuente: Calero *et al.* 2004).

El oleaje conforme se va aproximando a la playa, disminuye su velocidad y longitud de onda. En el caso de la altura de onda sucede lo contrario, que aumenta hasta que la velocidad de las partículas del fluido excede la velocidad de avance de la ola (velocidad de fase), la ola se hace inestable y rompe aproximadamente cuando se da la relación de 0.78 entre la altura de onda y la profundidad del agua (Figura 9).

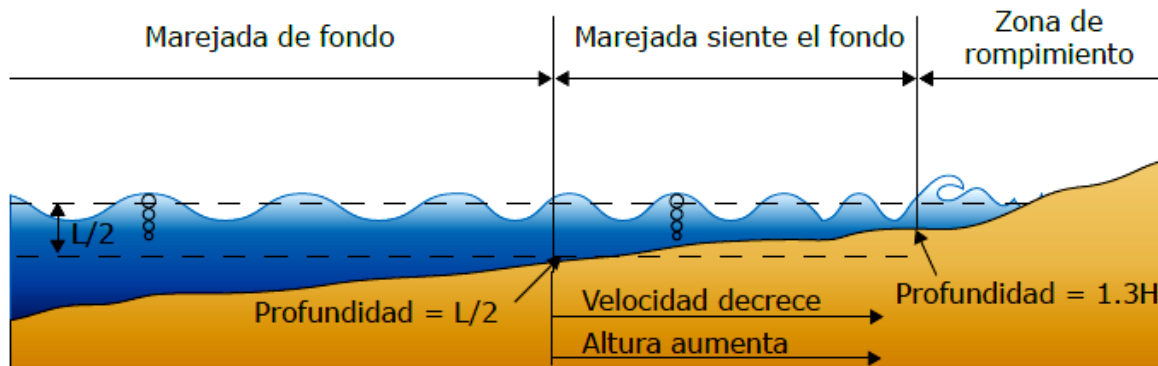


Figura 9. Rompimiento de ondas en la costa (Fuente: Calero *et al.* 2004).

El proceso en el cual interactúan el oleaje y la costa es cuando el tren de ondas se propaga en profundidades decrecientes, propiciando un aumento del peralte y una disminución de la celeridad de la onda que hace que el perfil de la misma vaya cambiando. Cuando el peralte sobrepasa un determinado valor, la onda se hace inestable, y deja de mantener la forma. Cuando la velocidad de las partículas en la parte superior de la cresta supera la celeridad de la onda, las partículas escapan de la cresta, lanzándose hacia delante, produciéndose la rotura de la onda. Este chorro de agua lanzado penetra de nuevo en la base de la onda provocando una gran turbulencia (Osorio *et al.* 2012).

Existen diferentes tipos de rotura del oleaje que se pueden asociar a la morfología de las playas. El número de Iribarren,  $\xi$ , es el parámetro universalmente conocido como clasificador del tipo de rotura.

$$\xi = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_b/L_\infty}} \quad \text{Ecuación 5.}$$

donde:

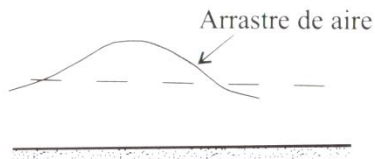
$H_b$  = Altura de ola en rotura

$L_\infty$  = Longitud de onda en aguas profundas

$\tan\beta$  = Pendiente de la playa

En función de su valor la rotura se clasifica en:

*Rompiente deslizante* (spilling breaker), se da en condiciones de baja energía, presentando múltiples líneas sucesivas de rompientes. De acuerdo a la clasificación propuesta por Galvin (1968) el  $\xi$  debe ser menor a 0.5. (Figura 10).



a) Rompiente deslizante

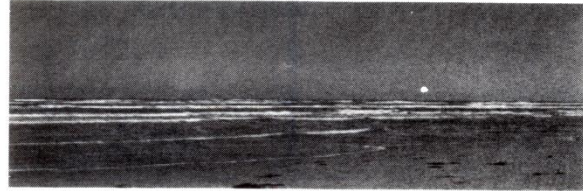
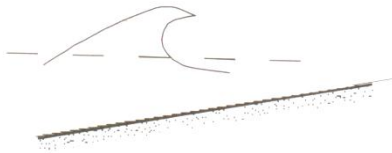


Figura 10. Tipo de rotura deslizante (Fuente: Vergara, 2011).

*Rompiente tipo zambullida* (plunging breaker), se presenta sobre pendientes de playa empinadas en las que la cresta de ola cae hacia adelante, produciendo salpicadura de agua y grandes vórtices que llegan hasta el fondo y provocan un levantamiento de considerables cantidades de sedimento, con valor de  $I_r$  entre 0.5 y 3.3 (Figura 11).

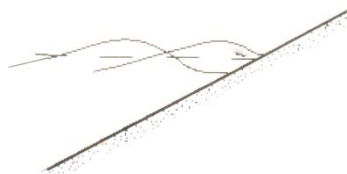


b) Rompiente de zambullida



Figura 11. Tipo de rotura zambullida (Fuente: Vergara, 2011).

Un tercer tipo de rotura de ola es clasificado como *frontal* (surging breaker), no tiene cresta inestable, la ola rompe al pie de un talud muy empinado y de manera muy precipitada causando que la cresta desaparezca (Figura 12), teniendo una dependencia con la pendiente de la playa y la relación de altura de ola en aguas profundas sobre el perfil de playa (Figura 13).



c) Rompiente frontal



Figura 12. Tipo de rotura frontal (Fuente: Vergara, 2011).



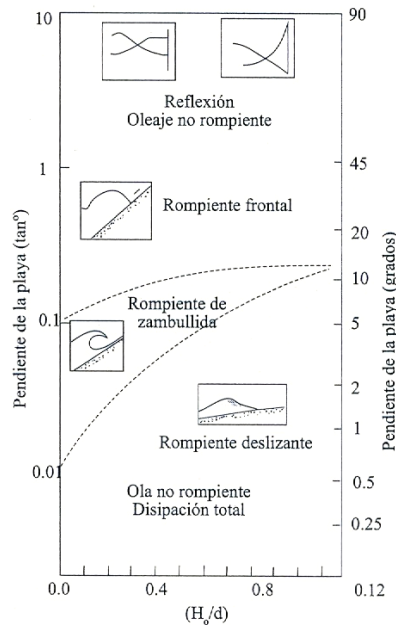


Figura 13. Clasificación de rompientes (Fuente: Galvin, 1968, y Carter, 1988 en Vergara, 2011).

## I.II. Mareas

Las mareas son movimientos oscilatorios del nivel del mar, debido a las fuerzas de atracción gravitacional que los astros, en particular la luna y el sol ejercen sobre los océanos. El comportamiento de las mareas y la regularidad de las mismas dependen principalmente de la posición relativa de la Tierra, el sol y la luna, la situación geográfica, la topografía local, la profundidad de las cuencas oceánicas y los fenómenos meteorológicos.

Cualquier punto  $P$  que se encuentre sobre la superficie de la Tierra está sujeto a un potencial gravitacional debido a la presencia de la luna o el sol igual a:

$$\Phi_l = -\frac{G \cdot M_l}{R_{Pl}} \quad \text{Ecuación 6.}$$

donde:

$G$  = Constante de gravitación universal

$R_{Pl}$  = Distancia entre el punto  $P$  y el centro de la luna (o el sol)

$M_l$  = Masa de la luna (o el sol)

Tanto la luna como el sol atraen a la Tierra y sus océanos, los cuales se deforman. El agua se acumula allí donde la atracción es máxima, es decir, en el punto del globo más cercano al astro. Además, gracias a la velocidad del movimiento, una fuerza centrífuga opuesta a la atracción mantiene la Tierra sobre su órbita. Esta fuerza centrífuga vuelve a empujar el agua, que se acumulará en el lado opuesto al astro.

Si el astro (luna o sol) está en el plano ecuatorial de la Tierra, se observan dos mareas altas y dos mareas bajas de la misma amplitud por día (Figura 14).

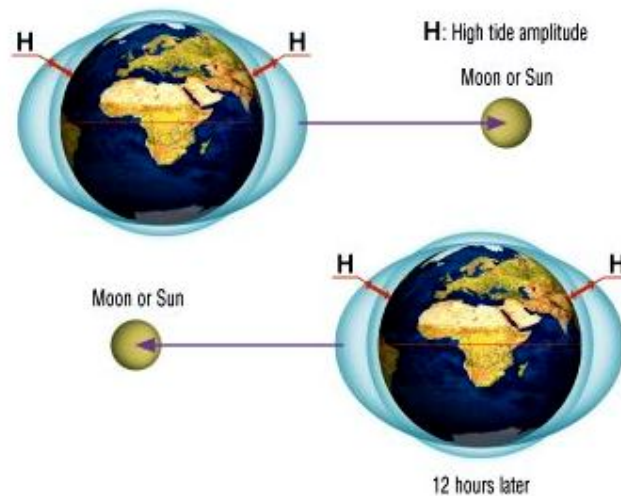


Figura 14. Marea cuando la luna o sol se encuentran perpendiculares al ecuador (Fuente: CNES, 2012).

La posición respectiva de la luna y el sol respecto a la Tierra origina un ciclo de variaciones mensuales: alineados, sus influencias aumentan; en ángulo recto, se atenúan; lo que provoca mareas de menor o mayor amplitud (Figura 15).

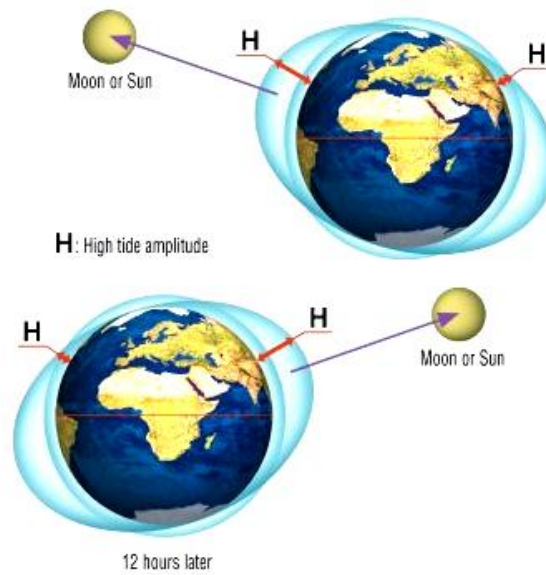


Figura 15. Marea cuando la luna o sol no se encuentran perpendiculares al ecuador (Fuente: CNES, 2012).

El proceso del efecto gravitacional de atracción de la luna, produce una protuberancia (pleamar) en los mares de la cara de la Tierra más cercana a la luna. Esto se debe a que los cuerpos de agua son un fluido con una densidad que permite la transformación de su forma. Esta transformación es más notable para los cuerpos de agua más cercanos a la luna, mientras que los mares más alejados de este astro experimentan una atracción lunar menor que la media.

Las mareas también intervienen en la modificación de las características de las costas, pues depositan o se llevan material. En la desembocadura de los ríos el material se puede depositar cerca de la orilla, formando los llamados bajos; o puede ser transportado y dispersado por las corrientes paralelas a la costa. Las características que tomarán las diferentes costas modificarán también la vida tanto vegetal como animal que en ese lugar se desarrolle; allí se encontrarán seres cuya forma de vida sufre una exposición cíclica al mar y al aire, a causa de las mareas (Cifuentes *et al.* 2005).

### I.III. Playas

Los sistemas costeros son altamente dinámicos por estar en contacto constantemente con agentes que actúan sobre ellos a diferentes escalas espacio-temporales (oleaje, mareas, tormentas, entre otros). Las playas son sistemas que se encuentran en la zona costera y están compuestos por sedimento no

consolidado que ha sido depositado y que tiene una variación de tamaño de grano que va de arena (0.063-2mm) a grava (2-64mm).

Haciendo un corte transversal en la costa, obtenemos el perfil de playa (Figura 16), mecanismo natural causante de la rotura y disipación de la energía de oleaje. Las ondas pueden alcanzar la costa con una gran cantidad de energía, teniendo potencial para causar grandes daños. Sometida a este oleaje, la playa reacciona reduciendo su pendiente total, alejando la zona de rotura de la orilla, con lo que se aumenta la disipación del oleaje antes que alcance la orilla. Este allanamiento de la playa bajo tormenta no se debe confundir con un proceso erosivo, que implica una pérdida permanente del material de la playa. A menudo playas con pendiente alterada protegen mejor las propiedades de la costa frente a ataques intensos del oleaje y por tanto, previenen la aparición de erosión auténtica. Esta característica de las playas de ajustarse a las fuerzas a las que se ve sometida, hace que sea un método efectivo para la defensa de la costa, y por tanto, que debemos conocer su comportamiento frente a los procesos a los que se ve sometida y parámetros que los rigen (García, 2003).

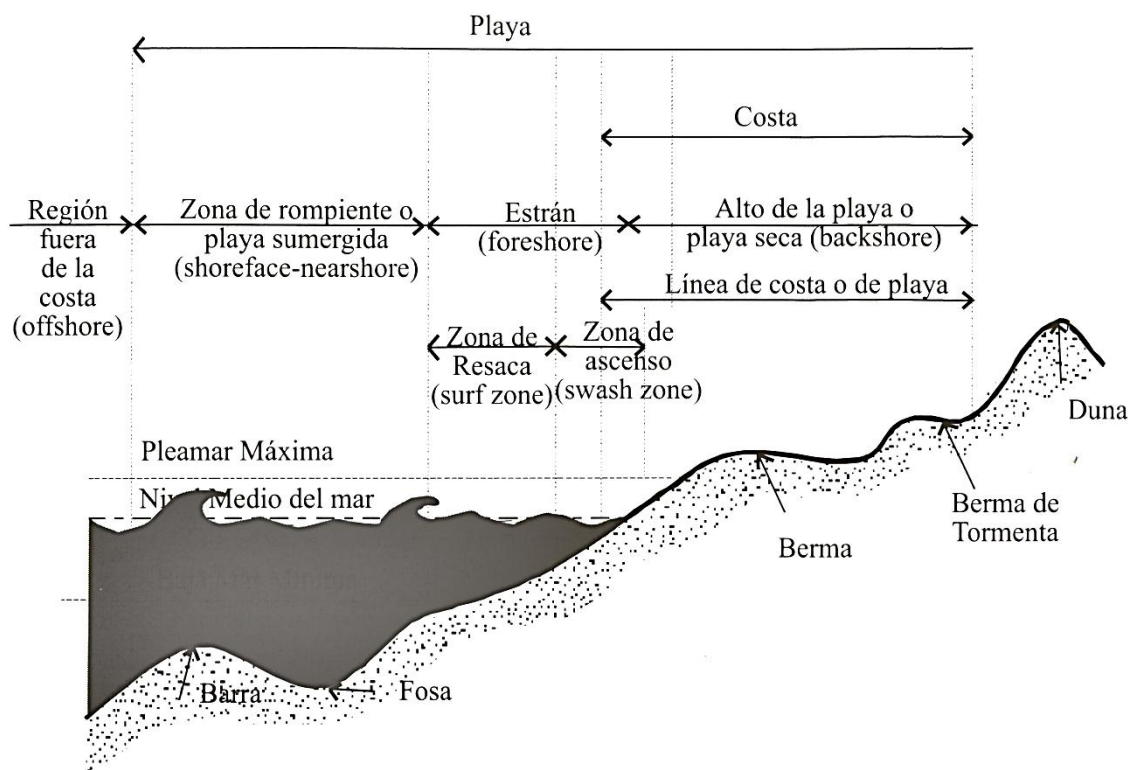


Figura 16. Perfil típico de playa (Fuente: Vergara, 2011).

Estos sistemas son constantemente modificados por el oleaje, las corrientes y el viento, lo que resulta en una diversidad morfodinámica como la propuesta por

Wright *et al.* (1984), que va desde playas macromareales disipativas hasta playas micromareales reflejantes.

La playa *disipativa* (Figura 17), tiene una pendiente muy suave y una zona de rompientes ancha. Pueden aparecer en el perfil una o varias barras longitudinales, paralelas a la línea de costa. Dada la geometría bidimensional del sistema, las corrientes de retorno son prácticamente inexistentes, salvo en el caso de discontinuidades marcadas por los propios contornos del sistema (arrecifes rocosos, límites extremos de la playa, etc.). Si definimos el parámetro de  $\xi$  en rotura (Ecuación 5), el valor para playas disipativas va por debajo de 0.5, de acuerdo con la clasificación de Galvin (1968), lo que implica que la energía del oleaje se va disipando gradualmente a lo largo del perfil.

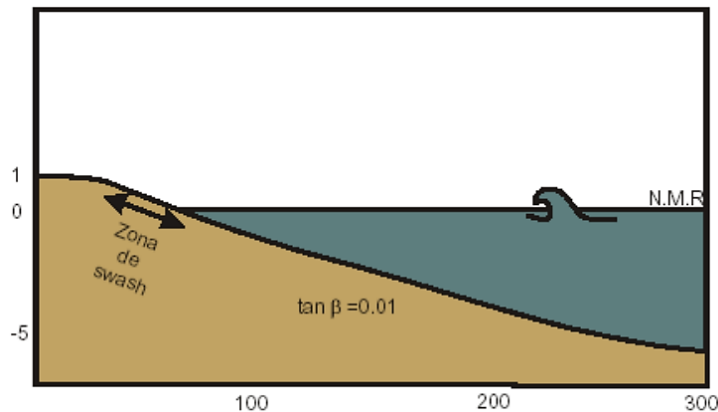


Figura 17. Perfil de playa disipativo (Fuente: Gutiérrez, 2011).

La playa *intermedia*, posee elementos tanto del estado disipativo como del reflejante, tiene una zona de disipación del oleaje que se amplía a medida que la altura de oleaje incrementa, conjunto a esto hay presencia de barras de arena, canales, corrientes de retorno y corrientes en la zona. De acuerdo con Wright *et al.* (1984), la forma de la playa cambia como respuesta a la altura de oleaje, se pueden tener playas rectas con cara inclinada, protegida por una barra de arena en la base de la playa, que se expone en la presencia de marea baja, producirse una separación entre las barras por corrientes profundas y canales con espaciamiento entre 150 y 300m o se propiciar un movimiento a lo largo del piso de playa con amplias corrientes de retorno (300-500m). Este tipo de playas tiene un valor de  $\xi$  entre 0.5 y 3.3.

La playa *reflejante* (Figura 18), se encuentra en el otro extremo de la escala de estados de playa. Las roturas se producen en voluta, colapso o en oscilación, sobre el frente de playa, que tiene pendiente elevada, con valores de  $\xi$  mayor a

3.3. La turbulencia relacionada con el proceso de rotura se ve confinada a la zona de ascenso-descenso sobre el frente de playa.

Frecuentemente aparecen formas sedimentarias altamente rítmicas en el talud, bajo condiciones de baja energía, el talud de playa finaliza por la parte superior en una berma alta y recta, tras la cual puede aparecer un canal, resultado de la incorporación de la berma al talud más tendido correspondiente a condiciones de mayor energía. El frente de playa suele contener, aunque no siempre, tamaños de grano más gruesos que la playa sumergida. Inmediatamente debajo del talud de playa, se suele encontrar un escalón pronunciado, compuesto de material grueso. La profundidad y altura de este escalón se incrementa con la altura de ola. En playas con marea, el barrido del oleaje sobre el escalón lo destruye, por lo que no aparece en el pie del frente de playa en la bajamar. Hacia el lado del mar del frente de playa, la pendiente disminuye notablemente, dando al perfil una forma cóncava bien marcada (Vidal *et al.* 1995).

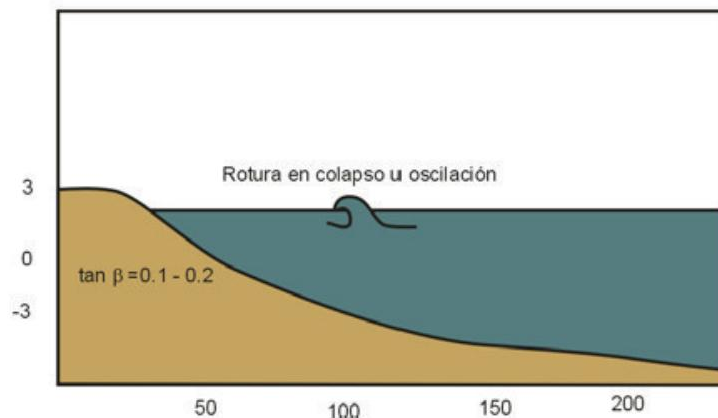


Figura 18. Perfil de playa reflejante (Fuente: Gutiérrez, 2011).

Los perfiles de playa sufren modificaciones a diferentes escalas temporales, en función de los agentes que fuerzan la respuesta de la costa. De acuerdo con la clasificación de Jiménez *et al.* (1993), estas modificaciones son del siguiente orden:

*Largo plazo*, aquellos que son modificados tanto en planta como de perfil, determinando el balance total de sedimentos. Cambios producidos principalmente en aporte de sedimento de ríos, variaciones relativas en el nivel del mar, en una escala temporal del orden de décadas o superior.

*Mediano plazo*, son los cambios que se pueden ver reflejados en una longitud de costa de kilómetros y escala temporal de años que no supera la

década. El principal agente que modifica la playa es el oleaje por su capacidad de transportar sedimento de forma longitudinal.

*Corto plazo*, se caracterizan por ser cambios que ocurren en un área más reducida, es decir la zona de rompientes y responde a patrones de oleaje y viento estacionales, que no sobrepasan el año de duración y que se dan de forma cíclica, incluso pueden tener periodos de duración de horas.

*Episódicos*, son aquellos cambios que se dan con un período duración que va de horas a días, pero no constantes en cuanto a periodicidad y estacionalidad.

#### I.IV. Tormentas

La superficie de la Tierra se divide en zonas polares, templadas y tropicales. Esta clasificación se establece de acuerdo a la temperatura de su superficie, la cual es una consecuencia directa de la energía radiante que proviene del sol, o sea, resultante de la inclinación del eje terrestre y del origen de traslación que da origen a las estaciones del año. La inclinación del eje de la Tierra ( $23^{\circ}27'$ ) produce que la radiación solar llegue casi de manera perpendicular hacia el ecuador durante todo el año, concentrándose mayor cantidad de calor, justo en la zona del planeta donde se encuentra la mayor superficie cubierta de océanos (Hernández *et al.* 2001).

Las condiciones descritas anteriormente generan que en la zona de Yucatán existan condiciones de humedad, que favorecen fenómenos meteorológicos, ya que la cantidad de vapor de agua inducido en la atmosfera se dispersa mediante corrientes de aire, transformándose de estado gaseoso a líquido a través del proceso de condensación. De acuerdo con las condiciones el proceso de condensación se puede dar diferentes formas entre ellas, las lluvias ciclónicas:

- De frente frío. El aire caliente es desplazado por una masa de aire frío que avanza.
- De frente caliente. El aire caliente asciende sobre la cuña de aire relativamente más frío empujada hacia el lado polar respectivo.

Las lluvias de frente frío (Nortes), son eventos de alta presión en la Península de Yucatán que se registran durante la temporada de frentes fríos (noviembre a febrero). Estas son causadas por invasiones de aire frío que empujan el aire caliente y lo levantan, formándose una superficie de discontinuidad. El contacto de esta superficie con el suelo es conocido como frente frío proveniente del norte.

Las lluvias de frente calor (ciclones) en los océanos se ve favorecidas cuando la temperatura de la capa superficial de agua supera los 26° C. Lo anterior, aunado a la existencia de una zona de baja presión atmosférica, hacia la cual convergen vientos de todas direcciones.

Los vientos en la zona circundante fluyen y aumenta el ascenso del aire caliente y húmedo que libera vapor de agua. El calor latente, ganado por la condensación del vapor de agua, es la fuente de energía del ciclón. Una vez que se inicia el movimiento del aire hacia arriba, a través de la columna central, se incrementa la entrada de aire en los niveles más bajos, con la correspondiente salida en el nivel superior del fenómeno. Por la influencia de la fuerza de rotación de la Tierra, el aire converge, gira y comienza a moverse en espiral, en sentido contrario a las manecillas del reloj, en el caso del Hemisferio Norte (SMN, 2010).

Los ciclones tropicales se clasifican en “depresión tropical”, “tormenta tropical” y “huracán”, en función de la velocidad de su Viento Máximo Sostenido en superficie (VMS).

- Depresión Tropical: VMS menor a 63 km/h.
- Tormenta Tropical: VMS entre 63 y 118 km/h.
- Huracán: VMS mayor a 118 km/h.

Los ciclones tropicales producen vientos fuertes, oleaje elevado, una sobre elevación del mar y lluvia abundante, tienen un impacto económico importante a escala mundial. Aun cuando actualmente se les da seguimiento mediante satélites, radares meteorológicos, aviones “caza-huracanes” y un ejército de personas en tierra, todavía cobran víctimas humanas, que en algunas ocasiones pueden contarse en cientos o miles (Rosengaus *et al.* 2002).

La importancia y peligro de los ciclones tropicales difiere entre tierra firme y superficie marina. Sobre los océanos las actividades humanas en riesgo son primeramente instalaciones petroleras, barcos y tráfico aéreo. En tierra, se ven amenazadas las vidas y actividades humanas en ciudades, pueblos, industrias, carreteras y cultivos que se encuentran a lo largo de la trayectoria del ciclón tropical (Figura 19).





Figura 19. Mérida, Yucatán, después del huracán Isidoro, septiembre de 2002 (Fuente: Rosengaus *et al.* 2002)

Es en la franja costera donde convergen distintos de los agentes destructivos de una tormenta tropical, como son la marea de tormenta, el oleaje, los vientos y lluvias intensas. Históricamente y a nivel mundial, la marea de tormenta ha sido responsable de una mayor cantidad de daños. El viento y la marea están concentrados dentro de unos pocos kilómetros del centro del ciclón, mientras que las lluvias intensas frecuentemente afectan áreas a cientos de kilómetros del centro de ciclón, esto es por el efecto de las bandas nubosas de la tormenta. Al mismo tiempo, es importante reconocer los aspectos benéficos de la lluvia provocada por los ciclones tropicales. Algunos ciclones que se mueven sobre regiones afectadas por periodos prolongados de sequía, pueden llegar a producir cantidades de lluvia de hasta unos 10 cm, que pueden ser importantes para mitigar las condiciones de aridez (CENAPRED, 2007).

En el Figura 20, se muestra el número de tormentas y huracanes que han ocurrido en el océano Atlántico, en el periodo de 1851 a 2000. Para su obtención se ha usado bases de datos que contienen información sobre la ocurrencia de ciclones tropicales en el Atlántico (Sistema Nacional de Protección Civil, 2002). En él se puede observar una disminución de la ocurrencia en las zonas montañosas.

Existe un corredor importante de presencia de ciclones tropicales entre la península de Yucatán y Cuba, y llega hasta las costas de Luisiana y Texas, en Estados Unidos. Se observa una acumulación de ciclones tropicales frente a Veracruz, y la isolínea de 20 ciclones tropicales corre paralela a la costa del Golfo de México, internándose a la altura de Campeche para salir al sur de Quintana Roo, es decir, la península de Yucatán está expuesta a un promedio de más de 20 ciclones tropicales en 150 años (Rosengaus *et al.* 2002).

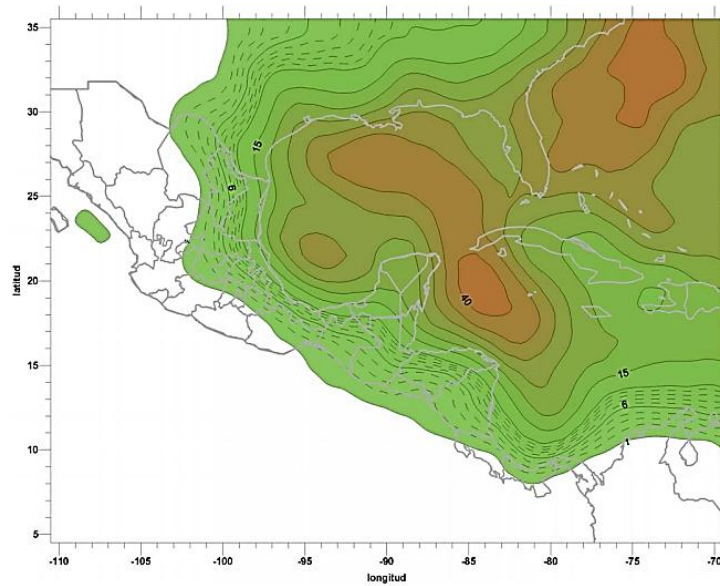


Figura 20. Distribución del número de tormentas tropicales y huracanes en el Atlántico Norte de 1851 a 2000 (Fuente: Rosengaus *et al.* 2002).

#### I.V. Erosión

La erosión costera es la modificación (retroceso) de la línea de costa preexistente con la consiguiente pérdida de sedimentos. Las causas de la erosión de las playas pueden ser naturales o inducidas por las actividades humanas. La velocidad de erosión en las playas puede variar considerablemente en el espacio y en el tiempo, por ejemplo las tormentas y huracanes pueden tener una respuesta inmediata en la erosión de las playas, mientras que los deshielos de las zonas polares y los hundimientos del terreno por causas tectónicas, pueden tardar más en reducir la anchura de las franjas playeras (Carranza, 2009). Siendo el efecto de tormentas y huracanes los que se evaluaron en este trabajo.

La erosión costera resulta de la combinación de varios factores, los naturales más importantes son: el viento, los temporales, las corrientes litorales, el aumento relativo del nivel del mar, así como los procesos en relieves costeros. Los factores antrópicos de erosión incluyen: las obras costeras, la ganancia de tierra al mar, la regulación fluvial (especialmente la construcción de presas), las operaciones de dragado, aclarados de vegetación, las explotaciones de gas y la extracción de agua.

Según Doody *et al.* (2005) la erosión costera conlleva tres tipos de impactos:

- Pérdida de superficie con un valor económico, social o ecológico (Figura 21).



Figura 21. Alcance de la erosión costera en la zona de residencias y negocios de la costa de Yucatán.

-Destrucción de las defensas costeras naturales por los temporales (generalmente sistemas dunares) que favorece la inundación (Figura 22).



Figura 22. Erosión del sistema dunar.

-Deterioro de las obras de protección, que también favorece el riesgo de inundación (Figura 23).



Figura 23. a. Deterioro de obras de protección costera y b. obras de restauración de playas.

Los procesos de erosión y de sedimentación costera han existido siempre y han contribuido a lo largo de la historia a modelar la gran diversidad de paisajes costeros. La erosión continental por la lluvia y la escorrentía superficial origina un volumen considerable de sedimentos que alcanzan la costa a través de los ríos. Estos sedimentos, los cuales se añaden a los procedentes de la erosión costera (acantilados o cúmulos de arena), ofrecen los elementos necesarios para el desarrollo de otros ambientes como arrecifes, llanuras de marea, marismas, dunas de arena, playas de arena y humedales.

Las playas pueden tener patrones de erosión prácticamente imperceptibles, pero cuando se presentan eventos de tormenta poco frecuentes, el impacto que se tiene sobre la playa es notable, de acuerdo a las características de la playa antes del evento. Debido a la presencia de un evento de tormenta, parte de la playa que normalmente no está expuesta al oleaje tiene contacto con este, resultando en cambios en la morfología de la playa y favoreciendo los procesos de erosión (Figura 24).

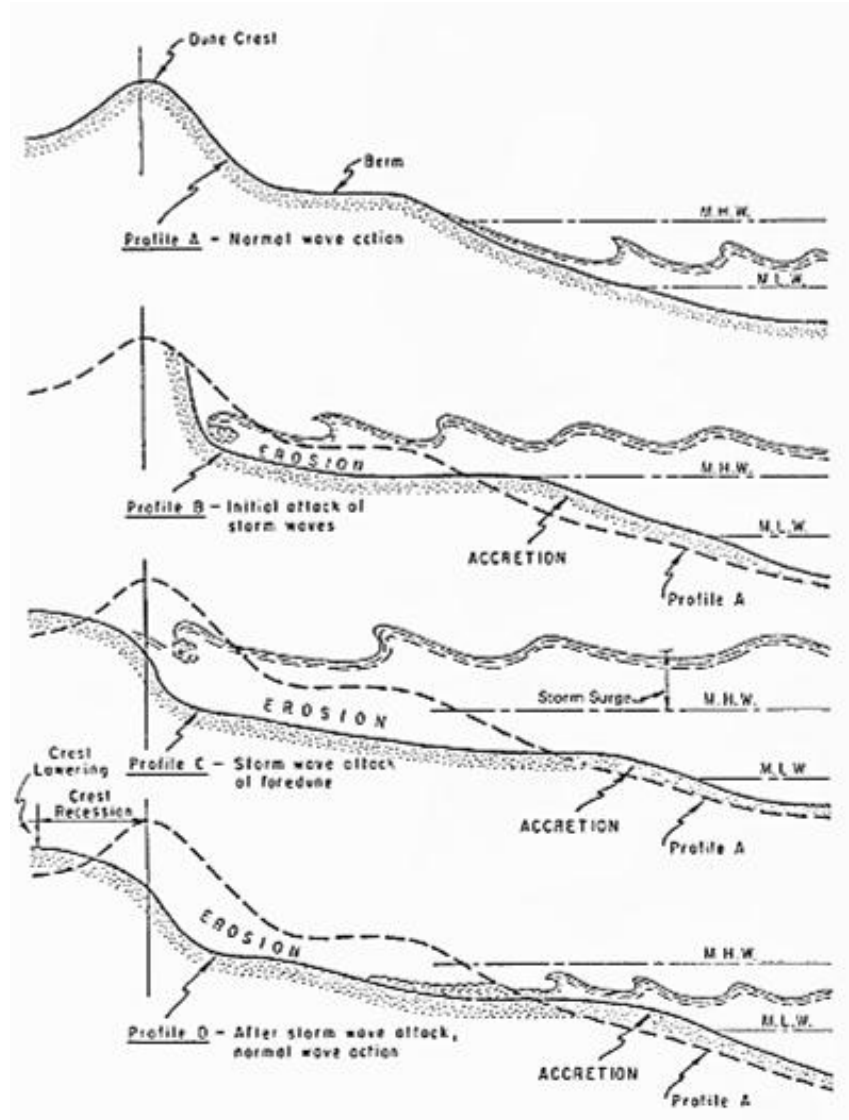


Figura 24. Diagrama del contacto del oleaje de tormenta sobre la playa y duna (Fuente: Shore Protection Manual, 1984).

## I.VI. Inundación

Es el fenómeno en donde el agua cubre de manera temporal el terreno que está normalmente emergido. Este es debido a la influencia de ríos, torrentes de montañas, curso de aguas intermitentes e inundaciones provenientes del mar en áreas costeras, clasificándose de la siguiente forma propuesta por Herrero *et al.* (2008) en la Figura 25.

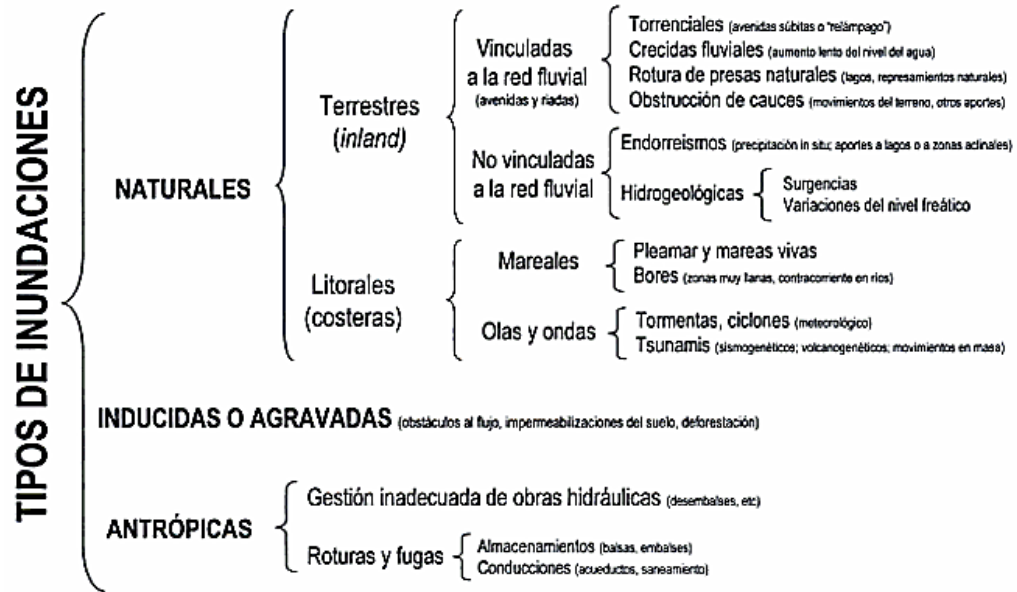


Figura 25. Clasificación básica de los tipos de inundación de acuerdo a su origen (Fuente: Herrero *et al.* 2008).

Las inundaciones costeras son generalmente resultado de los efectos de tormentas y temporales. Estas se definen como una elevación anormal y temporal del nivel del mar, causada por la tensión provocada por los fuertes vientos y (en menor grado) por la caída de la presión atmosférica, conociéndose como mareas de tormenta. Los efectos de estas tormentas pueden ser agravados por la variación de la marea astronómica, exacerbando los severos impactos en regiones costeras donde existen comunidades humanas establecidas (Figura 26).

La cota de inundación (Ecuación 7) es de gran importancia para conocer el alcance del nivel de agua cuando fenómenos meteorológicos se presenten en la costa. Esta se define como la suma de la marea meteorológica, astronómica y el *run up*, que se refiere al nivel máximo inducido por el oleaje en la costa (Valles *et al.* 2012).

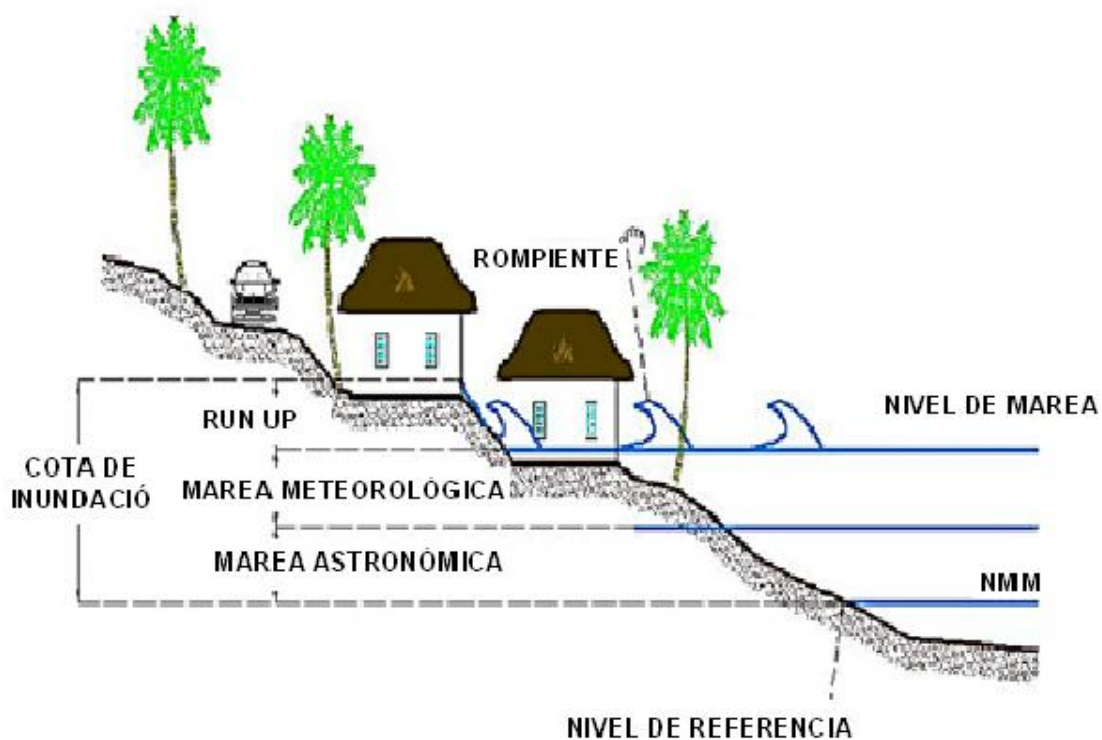


Figura 26. Cota de inundación provocada por una marea meteorológica (Fuente: Valles et al. 2012)

$$CI = MA + MM + R_u \quad \text{Ecuación 7.}$$

donde:

$CI$  = Cota de inundación

$MA$  = Marea astronómica

$MM$  = Marea meteorológica

$R_u$  = Run up

# **I. Metodología**

Para conocer el impacto de las tormentas en la zona costera del estado de Yucatán, se utilizó la metodología propuesta por Mendoza y Jiménez (2009), que consiste en: 1. Caracterización del agente forzante (oleaje de tormentas), 2. Caracterización de la zona costera (morfología), 3. Evaluación del impacto de tormenta en la costa, 4. Obtención de índices y 5. Mapeo de resultados.

## **II.I. Caracterización de Tormentas**

### **II.I.I. Datos**

Existen varias definiciones de tormenta, en este trabajo se utilizó la definición de eventos de tormenta en términos de oleaje que considera altura umbral y duración mínima. Los datos de oleaje utilizados para caracterizar las tormentas fueron obtenidos mediante un análisis hecho en el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) del Instituto de Ingeniería en la Unidad Académica de la UNAM en Sisal, Yucatán, cubriendo el periodo de 1979-2008 (Appendini *et al.* 2011). Se seleccionaron seis puntos representativos, situados a una profundidad aproximada de 10 m para obtener la variación espacial del oleaje cercano a la costa, cubriendo los sitios de muestreo elegidos (Figura 27 y Tabla 4 del Anexo). Cada nodo consta de registros de oleaje de cada 3 horas, con datos de altura de ola significativa  $H_s$ , periodo pico  $T_p$  y dirección  $\theta$ .



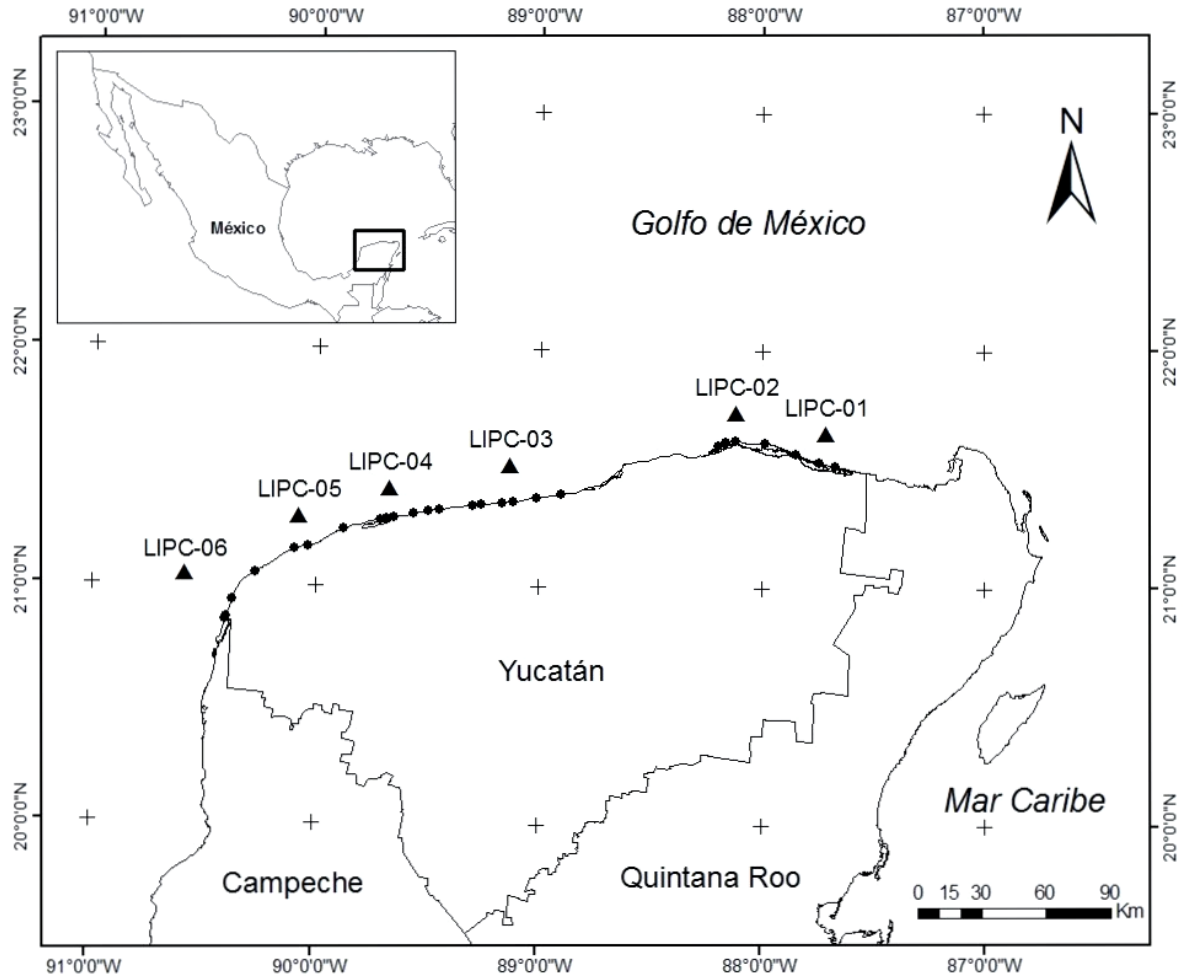


Figura 27. Ubicación de nodos de oleaje a una profundidad 10m (triángulos) y perfiles de playa (círculos).

### II.I.II. Identificación de tormentas

Para definir una tormenta en términos hidrodinámicos, se necesita especificar un valor umbral de altura significativa de ola y duración mínima en donde el oleaje exceda el valor umbral. No existe un criterio definido sobre cuales deben de ser estos valores de la tormenta dado que las condiciones meteorológicas varían espacialmente. Por ejemplo, en el Atlántico, Dolan y Davis, (1992) utilizaron un valor de altura de ola de 1.5 m basados en evidencias en campo, donde esta altura de ola en aguas profundas produce erosión en la cara de la playa. En el Mediterráneo Mendoza y Jiménez, (2008) utilizaron 2 m el cual fue obtenido utilizando dos veces la *Hs Media* y confirmando que se obtenía erosión en la playa con este valor; este mismo valor es utilizado por las Recomendaciones de Obras Marítimas en el Mediterráneo (EPPE, 1991). Por otra parte, el US Army, Corps of

Engineers, define este umbral en base a la  $H_s$  media más dos veces la desviación estándar ( $H_{s_{media}} + 2\sigma$ ). En el caso de Bromirski y Kossin (2008) utilizan el percentil 98 de la serie de altura de oleaje con un valor de 3 m para el Golfo de México y Atlántico, sin embargo este estudio está centrado en oleaje de huracanes

En el presente trabajo, se utilizaron dos criterios debido a que considera a los Nortes y a los Huracanes; (1)  $2 H_{s_{media}}$ ; y (2)  $H_{s_{media}} + 2\sigma$ .

En cuanto a la duración mínima, esta se estableció en 24 hrs debido a que un Norte dura entre uno y varios días y, además porque el régimen de marea es de influencia mixta con una dominancia diurna en las costas de Yucatán. De esta manera se asegura por un lado se registra el oleaje por Nortes y huracanes, y por otro que se tiene al menos, un nivel de marea alta por tormenta (Valle *et al.* 2011).

Las características de cada evento de tormenta tiene valores promedio de  $H_s$ ,  $H_s$  máxima,  $T_p$  medio,  $T_p$  máximo,  $\theta$  media,  $\theta$  asociada a la  $H_s$  máxima, así como la *duración* (en días) del evento y el contenido energético  $E$ .

Para la clasificación de las tormentas se utilizó el parámetro de contenido energético dado que esta variable contiene implícitamente la energía del oleaje, dada por la altura de ola distribuida a lo largo de la duración de la tormenta. En este trabajo el contenido energético  $E$  es definido como:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} H_s^2 dt \quad \text{Ecuación 8.}$$

donde:

$t_1$  y  $t_2$  Definen la duración de la tormenta.

### II.I.III. Clasificación y selección de tormentas

La clasificación de las tormentas se hizo mediante un análisis de clúster con el método de Ward en función del contenido energético ( $m^2 h$ ). El análisis de clúster es una técnica de exploratoria de datos para resolver problemas de clasificación, teniendo como objetivo una ordenación grupal de modo que el grado de similitud entre datos del mismo clúster sea más fuerte que el grado de similitud entre miembros de diferentes clústeres. Se plantean posibles fusiones de grupos y se elige en donde se presente mayor homogeneidad, optando por la fusión de aquellos grupos que menos incrementen la suma de cuadrados de las desviaciones al unirse. Posteriormente se hizo una clasificación supervisada basada en los niveles de semejanza separando los eventos en cinco niveles,

eligiendo cuales corresponden a cada clase de tormenta y calculando los valores promedio por cada clase.

Una vez que se obtuvo la clasificación se seleccionaron cinco tormentas reales representativas, con características similares a los valores medios de los eventos de cada clase.

## II.II. Caracterización de Playas

### II.II.I. Perfiles de playa

La caracterización del litoral Yucateco se hizo mediante una división de la zona costera en 27 secciones representativas. Para obtener estas secciones se tomaron en consideración: (i) la longitud de playa, (ii) la orientación de la costa, (iii) características similares del perfil de playa (iv) la división municipal y (v) la presencia de comunidades aledañas a la costa. De estas 27 secciones se estudian 26 sitios (Tabla 5 del Anexo), ya que una porción de la costa corresponde a manglar y no hay presencia de playas arenosas.

En cada sección se obtuvo un perfil de playa característico, obteniendo la topobatimetría de cada uno, la pendiente en la cara de la playa ( $\tan\beta$ ), la pendiente de la parte inmediata a la cara de la playa ( $\tan\alpha$ ) y la cota máxima del perfil.

Se hicieron tres campañas de mediciones de perfiles de playa: en diciembre de 2010, en abril de 2011 y en de agosto de 2011. De estas tres campañas se seleccionó el perfil más reflejante (medido en la cara de la playa) obtenido para cada sección, que generalmente fue el de agosto, época posterior a la temporada de eventos de tormenta, en donde hay una deposición de sedimento en la parte seca del perfil de playa generando un perfil con características más reflejantes. De esta forma se pretende caracterizar los eventos de tormenta con las condiciones más adversas para evaluar su impacto.

El levantamiento topográfico de los perfiles de playa se hizo con un equipo GPS diferencial *Mallegan* (Figura 28). Este equipo, además de recibir y procesar la información de los satélites, recibe y procesa, simultáneamente, otra información adicional procedente de una estación terrestre situada en un lugar cercano, fijo y conocido, permitiendo corregir inexactitudes.



Figura 28. Archer Field PC y GPS diferencial *Mallegan*.

Se ocuparon dos dispositivos móviles, un receptor GPS *rover* donde se guardaban los datos capturados y una *Archer Field PC* con bluetooth integrado que se conectaba al GPS *rover*, en donde se visualizaban los transectos seleccionados. De esta manera la persona portadora del GPS cuenta con una ruta para caminar desde el punto en donde inicia la cota máxima de la playa en dirección hacia el agua a cierta profundidad (la profundidad máxima alcanzada fue variable en función de las características meteorológicas y las características físicas del portador del instrumento). (Figura 29).



Figura 29. Medición de perfiles de playa, diciembre de 2010.

Para completar los perfiles de playa se hizo una campaña batimétrica, (agosto-septiembre de 2011), utilizando una ecosonda adaptada a un sistema de navegación marina. De esta manera se pudieron extender los perfiles hasta una profundidad en donde las variaciones eran mínimas (aproximadamente 6.4m).

Los datos capturados en las campañas son descargados y postprocesados para obtener los valores de  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , que se refieren a las coordenadas de cada punto registrado.

Los perfiles generados no fueron lo suficientemente largos para alcanzar la profundidad de 10 m, necesario para el modelado usado para el análisis de

respuesta morfológica. De esta manera se extendieron los perfiles aplicando la ecuación propuesta por Dean (1977).

$$h = Ax^{2/3} \qquad \text{Ecuación 9.}$$

donde:

$h$  =Profundidad

$A = 0.41D_{50}^{0.94}$ ;  $D_{50} < 0.4$  Función dada por Hanson y Kraus (1989)

$x$  =Distancia

Esta ecuación fue modificada para cada perfil en función de sus características particulares, debido a que se cuenta con la isobata de 10 m y sólo se midió la distancia a la que se encontraba de la costa, y el tamaño medio del grano de arena ( $D_{50}$ ) de cada sitio. Estos valores fueron sustituidos en la ecuación propuesta por Dean (1977), en donde se despejó y modificó el exponente.

Una vez que se obtuvieron los 26 perfiles se extrajo la cota máxima de la primera berma del perfil de playa, partiendo de la línea de costa hacia tierra dentro.

### II.II.II. Análisis granulométrico

El tamaño de grano es una propiedad muy importante de las partículas de sedimento en relación al arrastre, transporte y deposición de sedimento. Considerando esto, se hizo un análisis granulométrico utilizando muestras de cada uno de los 26 sitios de muestreo.

Las 26 muestras se secaron en un horno de secado *Thermo Scientific* a una temperatura de 50°C durante 24 hrs. Posteriormente se pesaron las muestras en una balanza *Ohaus Pioneer* (sensibilidad 0.01 g).

Para seleccionar la porción de la muestra se empleó el método del cuarteo, para generar muestras de aproximadamente 50 g, siendo necesario hacer un segundo cuarteo cuando las muestras registraba un peso superior.

El método más común y ampliamente aceptado para separar en clases los materiales arenosos y gruesos, es el uso de mallas de alambre o tamizado.

Para realizar la separación en clases de materiales arenosos y gruesos se utilizaron tamices de 125, 300, 355, 425, 500, 710, 1000, 1180 y 1400 micras. Se utilizaron los métodos de momentos y de Folk y Ward para obtener la distribución de grano, diagramas de tipo de sedimento y estimadores estadísticos (Ecuaciones 27-30 del Anexo). Finalmente se hizo una clasificación del sedimento en función del diámetro de grano, con la escala de Udden (1914) y Wetworth (1922) (Figura 56 de Anexo).

### II.II.III. Longitud de playas arenosas del estado de Yucatán

Se midió la longitud de costa que corresponde a playas arenosas de cada una de las 26 secciones y la zona de costa cubierta por vegetación, donde predomina el manglar *Rhizophora mangle*, denominado de franja (Dzilam de Bravo), que recibe diariamente la influencia de marea y está expuesto a fuertes vientos (Durán, 2011). Se ha tomado como línea base una línea que ha sido trazada en el programa Google Earth, con el objetivo de visualizar las zonas de playa y diferenciarlas de aquellas cubiertas manglar, para obtener el porcentaje de longitud de playa de cada sección tomando en consideración (i) la longitud de playa, (ii) la orientación de la costa, (iii) características similares del perfil de playa (iv) la división municipal y (v) la presencia de comunidades aledañas a la costa, respecto al total del litoral costero de Yucatán.

### II.III. Evaluación de impactos de tormenta

#### II.III.I. Análisis de erosión

El análisis de erosión se realizó utilizando el modelo LITPROF de evolución morfológica del perfil de playa ante eventos de tormenta desarrollado por el DHI Water & Environment y que forma parte del sistema de modelación LITPACK (2011). Este modelo ha sido utilizado ampliamente para hacer estudios de manejo costero ambiental y de riesgo, por ejemplo Appendini et al. (2006), Basco y Walker (2010).

La respuesta generada de perfil a una tormenta las condiciones de tormenta fueron analizadas con el modelo de evolución del perfil, LITPROF. STP proporciona la base determinista para la cuantificación de la distribución de

transporte transversal de la costa. LITPROF incluye los efectos de los cambios en la morfología del clima de oleaje y el régimen de transporte que permite un desarrollo de perfiles de variables en el tiempo los campos de la onda incidente.

Este modelo asume que la hidrodinámica y las condiciones del sedimento son constantes a lo largo de la costa y que los contornos de profundidad son paralelos a la línea de costa, por lo tanto la morfología es únicamente descrita por un perfil *cross-shore*.

El límite offshore (costa afuera) de las condiciones de oleaje en el tiempo es función de  $H_s$ ,  $T_{p_{medio}}$ , y la dirección de oleaje. La transformación del oleaje a través del perfil es calculado incluyendo los efectos de asomeramiento, refracción, fricción por fondo, y rotura de oleaje.

El transporte de sedimento se calcula en base a un modelo hidrodinámico de oleaje que resuelve la evolución temporal de la capa del límite de fondo.

El nivel de cambio del fondo es descrito por la ecuación de continuidad para la sedimentación:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{1-n} \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad \text{Ecuación 10.}$$

donde:

$z$  = Profundidad

$q_s$  = Transporte *cross-shore*

$n$  = Porosidad del material de fondo

$x$  = Distancia

El modelo LITPROF para ser ejecutado requirió de una tabla de transporte generada en PRFTABL en donde se delimitan las dimensiones de los valores de entrada, con valores mínimos y máximos que cubran las condiciones hidrodinámicas que se simularon. El modelo PRFTABL hizo una interpolación y se generaron los datos que se necesitan para caracterizar los cambios *cross-shore* en la zona de estudio.

En el modelo PRFTABL se especifica las condiciones de:

$\alpha_0$  = Ángulo de ola en aguas profundas

$H$  = Altura de ola

$H/D$  = Relación altura de ola – profundidad del agua

$T$  = Periodo de onda

$dD/dY$  = Pendiente de la playa

$Diss$  = Tasa de disipación

$V$  = Corriente longitudinal (*longshore*)

Una vez que se generó la tabla con las dimensiones deseadas se hicieron archivos para cada perfil de los 26 sitios de muestreo, estos archivos incluyen la siguiente información:

Topo-batimetría: perfiles *cross-shore*, obtenidos durante la caracterización de playas en la campaña de campo.

Rugosidad de fondo: es considerada para obtener una descripción de la geometría del fondo y se representó mediante la rugosidad equivalente de Nikuradse. Este es uno de los valores definidos para todo el dominio y el más habitual cuando no se dispone de más información, corresponde a una densa capa de esferas cuya rugosidad es igual al diámetro de grano.

$$r = 2.5d_{50} \quad \text{Ecuación 11.}$$

Diámetro medio del grano: se ha tomado el valor del  $D_{50}$  (mm) de la cara de la playa, el cual es considerado uniforme a lo largo del perfil.

Velocidad de caída: considerada uniforme a lo largo del perfil y definido en la Ecuación 12:

$$V_t = \frac{gd^2(\rho_p - \rho_m)}{18\mu} \quad \text{Ecuación 12.}$$

donde:

$g$  = Aceleración gravitacional

$d$  = Diámetro de partícula

$\rho_p$  = Densidad de partícula

$\rho_m$  = Densidad del medio

$\mu$  = Viscosidad del medio



Dispersión geométrica: de acuerdo con el modelo se obtuvo como resultado de:

$$DG = d_{84}/d_{16} \quad \text{Ecuación 13.}$$

Para la representación del clima de oleaje se generaron series temporales de Hs, dirección, factor de dispersión y Tp para cada tipo de tormenta (I-V). Se tomó un nivel constante del mar (nmm = 0) asumiendo que no había una diferencia en el nivel medio del mar (nmm) durante la duración de las tormentas. Estos datos son ingresados en el modelo para obtener la respuesta del perfil de playa.

Los datos de entrada del modelo también requirieron la orientación de la playa con respecto al norte, el espacio (2 m) que hay entre cada dato que se tiene a lo largo del perfil, disipación de energía por fricción de fondo y el valor máximo del ángulo de pendiente de la playa que se estableció en 15°, con la finalidad de generar el escenario con las condiciones más extremas.

En cuanto a las condiciones generales dadas en el modelo para la descripción espectral de las olas, se definieron como olas irregulares, donde los parámetros de rotura de oleaje fueron determinados por los valores Gamma1 y Gamma2, en donde se especificó a *Gamma1=1* (parámetro que controla las condiciones de la pendiente de la ola) y *Gamma2=0.8* (parámetro que caracteriza la transformación de la altura de ola conforme se acerca progresivamente hacia la costa hasta una profundidad crítica en la que la ola se hace inestable y rompe). Se consideró también la dispersión direccional que es especificado en la serie de tiempo del oleaje. Debido a la falta de perfiles de playa pre y post tormentas, no es posible calibrar el modelo, por lo que se realizaron pruebas de sensibilidad del modelo variando los parámetros de rotura a fin de ver el efecto de estos. Los valores utilizados fueron para Gamma1 0.8, 1 y 1.2 y para Gamma2 0.6, 0.8 y 1, resultando seis combinaciones.

El modelo LITPROF simula las transformaciones del oleaje a lo largo de perfil, estimando la variación *cross-shore* de la *H* con la ecuación de conservación de energía de ola (Ecuación 14).

$$\frac{d}{dx} (E_f \cos \alpha) = D_{br} + D_{bf} \quad \text{Ecuación 14.}$$

donde:

$E_f$  = Flujo de energía de ola

$\alpha$  = Angulo de incidencia de la ola

$x$  = Distancia

$D_{br}$  = Disipación resultando de la rotura de oleaje

$D_{bf}$  = Energía disipada resultado de la fricción de fondo

El flujo de energía de ola se calculó usando la teoría lineal del oleaje:

$$E_f = \frac{1}{16} \rho g H_{rms}^2 c \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad \text{Ecuación 15.}$$

donde:

$\rho$  = Densidad del agua

$g$  = Aceleración gravitacional

$H_{rms}$  = Raíz cuadrática media de H

$c$  = Celeridad

$k$  = Número de onda

$h$  = Profundidad

Se determinó la disipación de energía de ondas irregulares como resultado de la rotura de oleaje de acuerdo a Battjes y Janssen (1978).

$$Diss = \frac{\rho g Q_b H_m^3}{4T h} \quad \text{Ecuación 16.}$$

donde:

$Q_b$  = Fracción de ondas rompiendo

$H_m$  = H máxima

$T$  = Tp medio

El modelo morfológico hace uso de la ecuación de continuidad para el fondo marino.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-n} \cdot \frac{\partial q_{s,x}}{\partial x} \quad \text{Ecuación 17.}$$

donde:

$z_b$  = Profundidad

$n$  = Porosidad

$q_{s,x}$  = Tasa de transporte *cross-shore*

De esta forma llevando a cabo la modelación del oleaje de tormentas y la respuesta de las payas se obtuvieron perfiles con los que se calculó la erosión costera a este tipo de eventos.

### II.III.II. Análisis de inundación

La caracterización de la cota de inundación se hizo para poder estimar el indicador de potencial de inundación IPI. Se calculó el *run up*,  $R_2$ , empleado las formulaciones propuestas por Stockdon *et al.* (2006), tomando en cuenta el parámetro no-dimensional, número de Iribarren,  $\xi$ , que es interpretado como el parámetro que describe la dinámica de la pendiente de la playa (Battjes, 1974).

$$\xi = \frac{\beta}{(H/L_0)^{1/2}} \quad \text{Ecuación 18.}$$

donde:

$\beta$  = Pendiente de la playa

$H$  = Altura de ola en aguas profundas

$L_0$  = Longitud de onda

La pendiente de la cara de la playa resulta de la ecuación de la pendiente de la recta.

$$\beta = \left( \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad \text{Ecuación 19.}$$

donde:

$y_2$  y  $y_1$  son valores de un punto del perfil en el eje  $y$

$x_2$  y  $x_1$  son valores de un punto del perfil en el eje  $x$

La longitud de onda en aguas profundas se determina por la siguiente ecuación.

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \text{Ecuación 20.}$$

De acuerdo al valor de  $\xi$  obtenido para cada uno de los sitios de muestreo se determinó cuál de las formulaciones de Stockdon *et al.* (2006) se emplearía. En el

caso en donde los perfiles tuvieron un  $\xi < 0.3$ , básicamente playas con condiciones extremadamente disipativas, se empleó la siguiente ecuación para obtener el *run up*:

$$R_2 = 0.043(H_0L_0)^{1/2} \quad \text{Ecuación 21.}$$

Si el valor de  $\xi$  estaba dentro del rango de 0.3 a 1.25, que corresponde a playas intermedias, se empleó la siguiente formulación de *run up* con un 2% de excedente:

$$R_2 = 1.1(0.35\beta(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta^2+0.0004)]^{1/2}}{2}) \quad \text{Ecuación 22.}$$

Otra variable considerada en este estudio fue la marea astronómica máxima (*MA*), que no incluye la marea meteorológica. Dado que no existen datos disponibles de marea meteorológica a largo plazo en el área y de que la finalidad de este trabajo es caracterizar la respuesta de playa a eventos extremos, se utilizó un valor constante para la *MA* que es de 0.3 m, la cual de acuerdo con lo reportado por Vega *et al.* (1997) en Rey (2012) y corresponde al alcance de marea viva (0.6 m de amplitud) a lo largo de la costa de la Península de Yucatán. Este dato se le adicionó al *run up* resultante de cada clase de tormenta para cada perfil.

Teniendo en cuenta que el cambio de la pendiente de la playa tiende a ser más suave después de la cara de la playa, se aplicó un factor de corrección entre 0.6 y 1 al potencial de inundación propuesto por Van der Meer y Janssen (1995). El factor de corrección se aplicó solo en las playas que contaban con una pendiente ( $\alpha$ ) ascendente en la parte trasera de la cota máxima, donde el resultado de gamma  $\gamma$  fuera positivo (Figura 30 y ecuación 23).

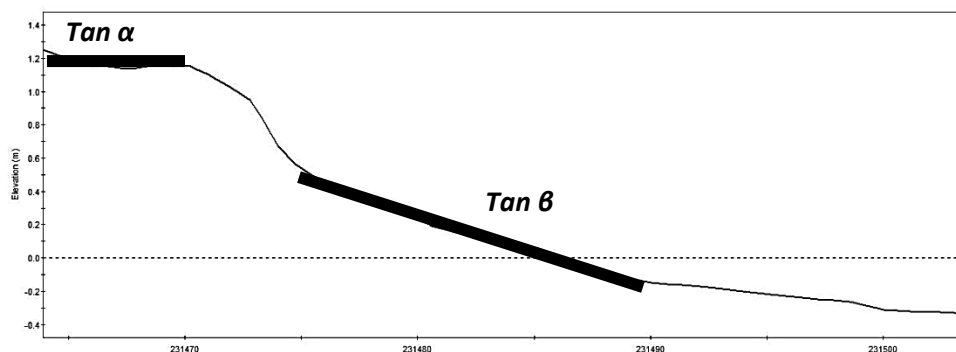


Figura 30. Pendientes de playa ( $\tan \alpha$  y  $\beta$ ).

$$\text{Gamma } \gamma = \alpha / \beta \quad \text{Ecuación 23.}$$

II.IV. Indicadores

II.IV.I. Indicador de potencial de erosión

Para construir el indicador de potencial de erosión (IPE), se ha empleado información de carácter cuantitativo: por una parte se utilizó el ancho de playa dividido entre el alcance de la tormenta medio en términos de retroceso de la playa (Figura 31):

$$IPE = \frac{AX}{AP} \quad \text{Ecuación 24.}$$

donde:

$AX$  = Retroceso de playa a la cota del nmm.

$AP$  = Ancho de playa

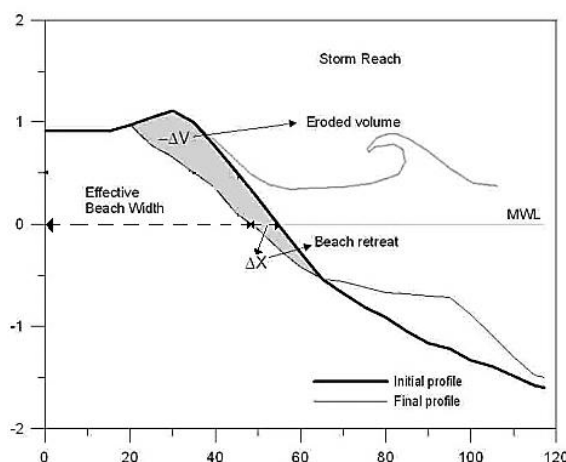


Figura 31. Esquema de erosión costera posterior a una tormenta (Fuente: Mendoza, 2008).

Para hacer la clasificación del IPE, se asignó una escala aritmética de clases entre 0 y 1, dividida por intervalos de 0.2.

0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Muy Bajo (MB)	Bajo (B)	Medio (M)	Alto (A)	Muy Alto (MA)	

donde:

0 es la condición de menor potencial y 1 la condición de mayor potencial de erosión.

II.IV.II. Indicador de potencial de inundación

El IPI es descrito gráficamente en la Figura 32 y definido con la ecuación 25, que se aplicó para cada uno de los cinco tipos de tormenta.

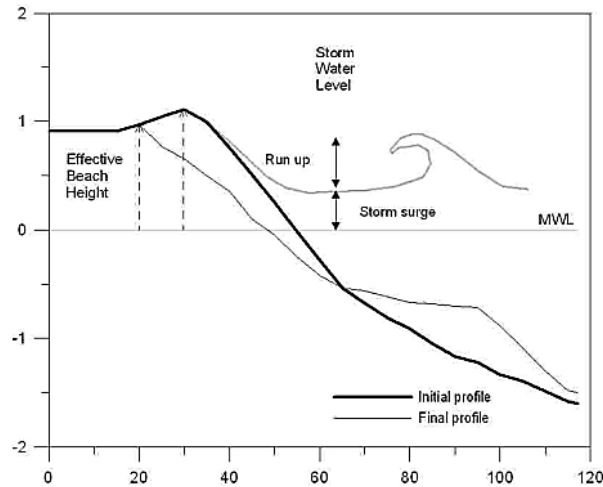


Figura 32. Esquema de inundación costera ante una tormenta (Fuente: Mendoza, 2008).

$$IPI = \frac{R_u + MA}{CM} \quad \text{Ecuación 26.}$$

donde:

$R_u$  = Run up representativo

$MA$  = Marea astronómica

$CM$  = Cota máxima de la playa

Para clasificar el IPI se ocupó la misma metodología que en el IPE, asignando una escala aritmética 0 y 1, dividida por intervalos de 0.2. Indicando el valor de peligrosidad en términos de inundación.

### II.IV.III. Indicador de Peligrosidad

El indicador de peligrosidad se obtuvo de la combinación de IPE e IPI utilizando un promedio ponderado de los dos indicadores anteriores, Esto se utilizó para darle mayor peso a los valores de peligrosidad alto y muy alto. (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de valores del IP.

<b>IPE\IPI</b>	<b>MB</b>	<b>B</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>MA</b>
<b>MB</b>	MB	B	B	M	A
<b>B</b>	B	B	M	M	A
<b>M</b>	B	M	M	A	MA
<b>A</b>	M	M	A	A	MA
<b>MA</b>	A	A	MA	MA	MA

### II.IV.IV. Elaboración de mapas de potencial de erosión, inundación y peligrosidad

Una vez obtenidos los resultados de peligrosidad se elaboraron mapas regionales de potencial de erosión, potencial de inundación y peligrosidad. Finalmente, se presentan de manera particular los resultados de las tormentas tipo IV (Correspondiente a los Nortes más extremos y tormentas más frecuentes) y tipo V (huracanes) en cinco zonas (Tizimín, Río Lagartos-San Felipe, Dzilam de Bravo-Dzidzantún, Yobaín-Sinanché-Telchac Puerto, Dzemul-Ixil-Progreso y Hunucmá-Celestún) a una escala 1:250,000 para tener una mejor apreciación de los resultados.

En cada uno de los mapas correspondientes se generaron tres franjas: en la franja superior se caracteriza el IPI, en la intermedia el IPE y en la franja inferior el IP. Estas franjas han sido generadas a partir de la línea de agua obtenida del levantamiento topográfico hecho por el LIPC en junio de 2011 con el sistema LIDAR (Laser Detection and Ranging). La línea de agua se ocupó como base para generar tres buffers dirección tierra dentro (300, 600 y 1000m), seccionando estas franjas para caracterizar cada sitio de muestreo.

### II.V. Cuantificación de la longitud de costa con potencial a impactos de tormenta

De los 260 km de longitud de costa que corresponde a playas arenosas se cuantificó las proporciones con los distintos niveles de potencial a erosión, inundación y peligrosidad, repitiéndose para los cinco tipos de tormentas caracterizadas. Los datos se representaron en diagramas circulares para

visualizar el porcentaje de las playas que pueden estar en peligro con respecto a la longitud total del litoral de Yucatán.



## II. Resultados y discusiones

### III.I. Tormentas clasificadas y caracterizadas

Los dos criterios utilizados para calcular la altura umbral a partir de la cual definir las tormentas (Mendoza y Jiménez, [2008] y US Army Corps of Engineers) arrojaron el mismo resultado: una altura umbral de 1.5 m. La información de oleaje de los seis nodos utilizados resultó en una Hs media de 0.75 m y la desviación estándar de 0.39.

Se identificaron un promedio de 272 tormentas por nodo. Una vez identificadas las tormentas, se procedió a su agrupamiento en clases mediante un análisis de *clusters*, posterior a la clasificación supervisada se generaron cinco clases. Para ello se tomó en cuenta la partición del dendrograma obtenido, la consistencia de los *clusters* y la variación del contenido energético dentro de cada grupo (Figura 33). La escala en cinco categorías se hizo para mantener una analogía con otras escalas existentes (Saffir-Simpson [1973], Dolan y Davis [1992] Mendoza y Jiménez [2011]). La escala final seleccionada cataloga las tormentas en: I-débil, II-moderada, III-significante, IV-severa y V-extrema (Figura 34).

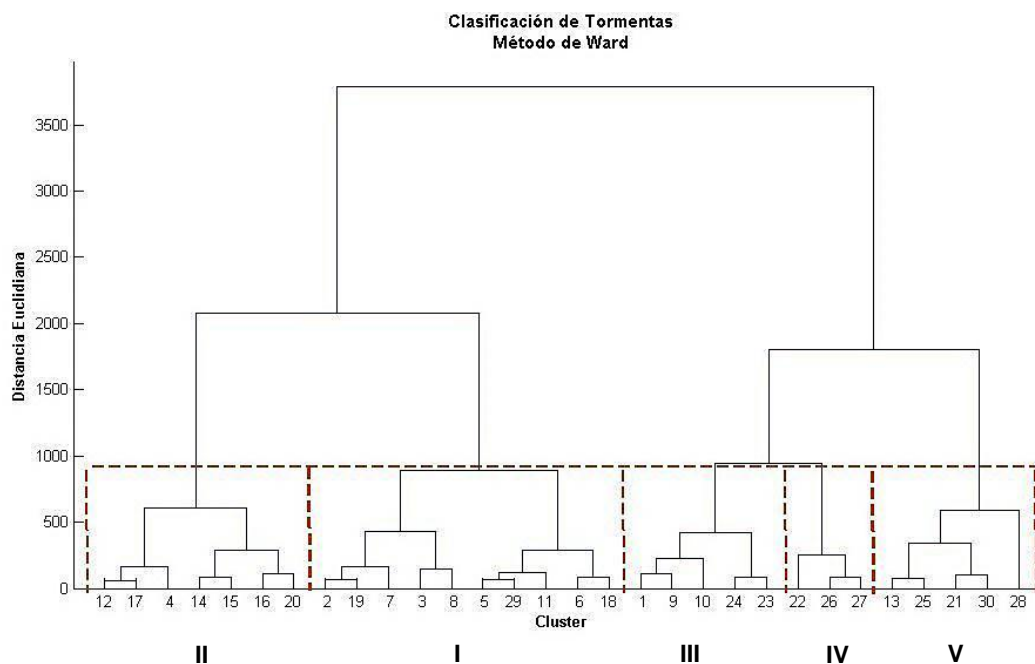


Figura 33. Clasificación de tormentas mediante análisis de clúster.

Los valores medios de cada clase de tormenta se representan en la Tabla 2 y la Figura 34, donde se puede observar el comportamiento ascendente de todas las variables con un patrón similar de incremento entre la duración y la energía con la clase de tormenta.

Tabla 2. Valores promedio de cada clase de tormentas clasificada.

Tormenta	Hs Max (m)	Tp Max (s)	Duración (días)	Energía de Tormenta (m <sup>2</sup> h)
I	2.28	9.76	1.34	122.54
II	2.86	10.77	2.02	242.85
III	3.05	11.45	2.94	388.98
IV	3.09	11.63	4.53	587.60
V	3.25	12.76	6.16	930.39

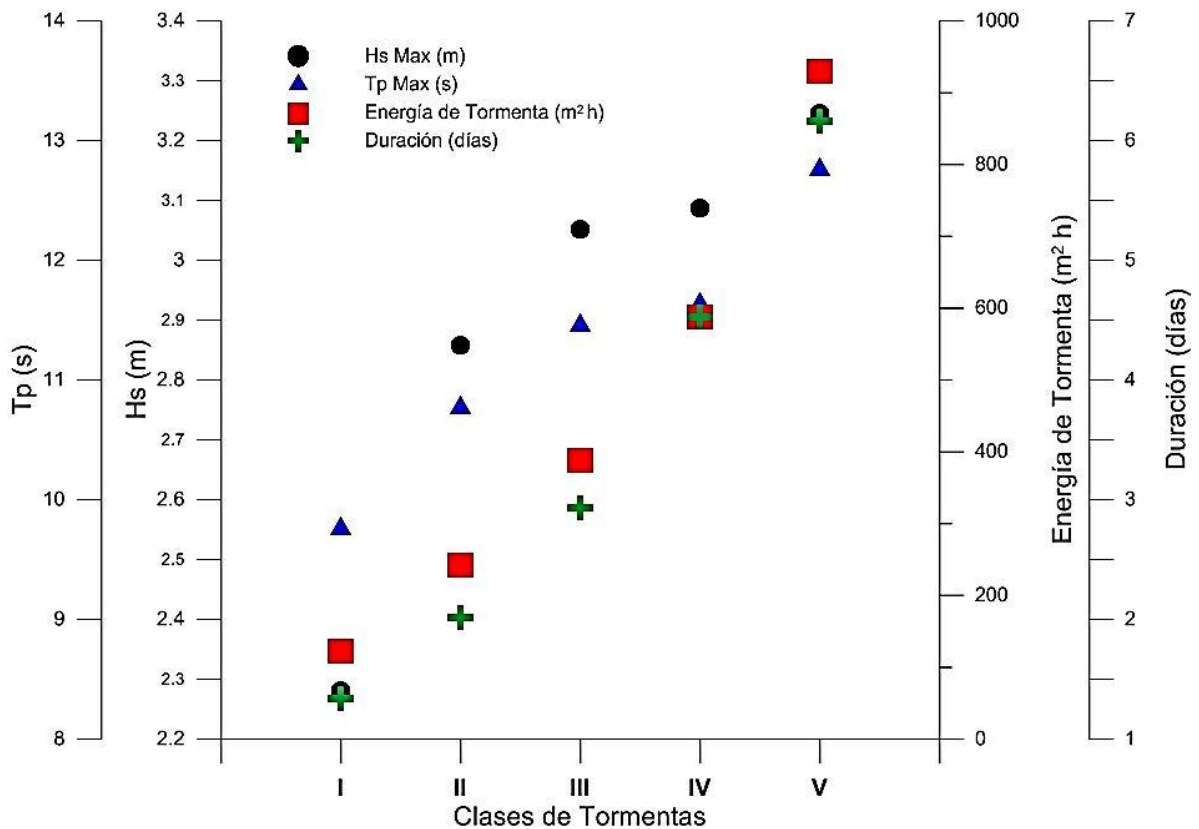


Figura 34. Valores promedio para cada tipo de tormenta.

Para concluir la caracterización de tormentas, se eligieron cinco eventos reales que tuvieran características similares a las de los valores medios (Tabla 2), resultando los cinco eventos de la Tabla 3.

Tabla 3. Eventos de cada tipo de tormenta caracterizados y modelados, para conocer la respuesta de la playa de los sitios de muestreo.

<b>Tipo</b>	<b>Fecha de inicio</b>	<b>Hs Media (m)</b>	<b>Tp Medio (s)</b>	<b>Duración (días)</b>	<b>Energía (m<sup>2</sup> h)</b>	<b>Dirección (°)</b>	<b>Evento de influencia</b>
I	09-04-2003	1.83	8.46	1.4	115.68	347	Norte
II	29-12-1987	2.17	8.10	2.00	242.15	7.5	Norte
III	20-11-2006	2.32	8.99	2.75	374.84	355.6	Norte
IV	02-11-2001	2.30	9.13	4.00	542.28	23	H. Michelle
V	21-09-2002	2.23	9.16	6.38	791.25	32	H. Isidoro

El evento caracterizado en tormenta tipo IV corresponde a una interacción entre un frente frío proveniente de la parte norte del continente americano y la influencia del huracán Michelle. Este huracán inicio como depresión tropical el 29 de octubre y el 2 de noviembre de 2001 se convirtió en huracán tipo IV en la escala de intensidad *Saffir-Simpson*. La trayectoria de este evento no pasó directamente por las costas del estado de Yucatán. Sin embargo el oleaje generado entre los dos eventos ocasionó oleajes energéticos en la zona de estudio.

El evento de tormenta tipo V que se caracterizó, corresponde al huracán Isidoro que ocurrió en septiembre de 2002. De acuerdo con Servicio Meteorológico Nacional, este evento se generó a partir de una onda tropical el 14 de septiembre en el mar Caribe, al suroeste de la isla de Trinidad. El 19 de septiembre se encontraba en el suroeste de Cuba y a 510 km de Cozumel, Quintana Roo, intensificándose como huracán y siguiendo una trayectoria dirección Oeste. A partir del 21 de septiembre se encontraba en la costa Norte de la Península de Yucatán, siguiendo lentamente su trayectoria hacia el Oeste cubriendo toda la franja costera del estado de Yucatán, causando severos daños materiales. Posteriormente, siguió una trayectoria hacia tierra degradándose a tormenta tropical, para después retornar hacia el norte (24 y 25 de septiembre) con dirección a la costa de Estados Unidos en donde se disipó degradándose a depresión tropical el 26 de septiembre.

El hecho de que los eventos caracterizados coincidan con algunos de los que se han registrado anteriormente, corrobora la existencia de eventos que son una referencia para la evaluación del potencial de peligrosidad y saber qué impacto de tormentas que se puede generar en zonas costeras.

### III.II. Caracterización de playas

De los 26 perfiles obtenidos, la figura 35 presenta la pendiente de la cara emergida de la playa ( $\tan \beta$ ) y  $\xi$ . Se puede observar una similitud entre la distribución de valores de pendiente de playa y  $\xi$  que define el tipo de rotura que tendrá el oleaje en relación a la playa. En la distribución de los datos se observa una tendencia de valores máximos que generalmente se encuentran en la zona Oeste de la costa de Yucatán y los mínimos van a partir de la zona centro hacia el Este. Los resultados de  $\xi$  mantienen una relación que tiende 5:1 respecto a la pendiente de la playa, también se observa que en 20 de las 26 localizaciones de muestreo predominan playas disipativas con  $\xi < 0.5$  y con rotura de oleaje clasificado como deslizante. Las seis localizaciones restantes ubicadas en la parte Oeste, son playas intermedias con una rompiente de oleaje zambullida.

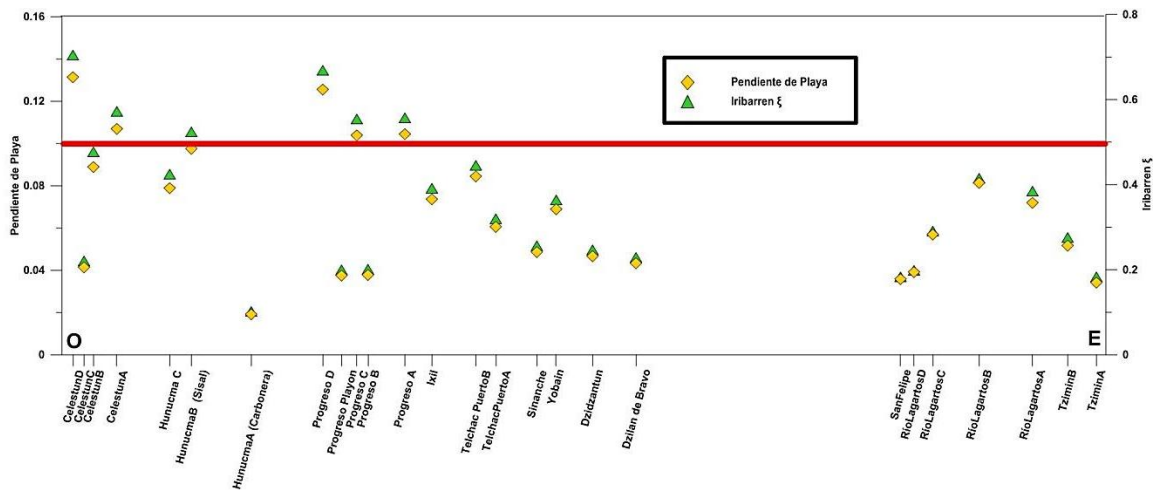


Figura 35. Valores de pendiente de playa y número de Iribarren (los símbolos que se encuentran debajo de la línea representan las playas disipativas y los que se encuentran sobre ella, corresponden a playas intermedias).

En cuanto al  $D_{50}$  de la cara de la playa (Figura 36), los valores obtenidos están clasificados como arena que va de fina a media ya que no superan el 0.5 mm a excepción de Río Lagartos D con un  $D_{50}$  de 0.54mm. La distribución de los valores es homogénea, con una leve tendencia de incremento en la zona Oeste de Yucatán.

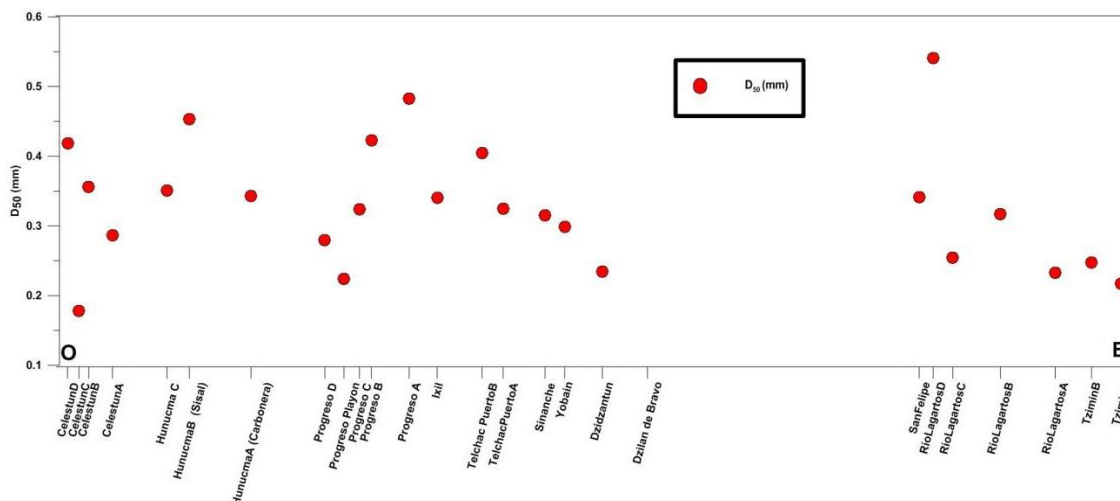


Figura 36. Valores de D<sub>50</sub> de las playas de Yucatán.

### III.III. Respuesta de la playa

#### III.III.I. Erosión costera

Se obtuvo el cambio de la línea de costa ( $\Delta x$ ) entre perfiles iniciales y los resultantes en la cota 0 (nmm) después de evaluar los eventos de tormenta (Figura 37), en donde los valores máximos son encontrados en las localizaciones correspondientes a Tizimín A (18 m), Río Lagartos C, D (17 m y 15 m), San Felipe (17 m), Sinanché (17 m) y Telchac A (18 m) para la tormenta tipo V.

Por otra parte, en cinco de los sitios de muestreo el nivel de erosión fue nulo para los cinco tipos de tormenta. Este fue el caso para Celestún A y D, Hunucmá B (Sisal), Progreso C (Progreso Malecón) y Playón de Progreso, donde no se produjo un retroceso de línea de costa, resultando en ocasiones procesos de acreción.

Se observó que el impacto de las tormentas que genera procesos erosivos responde a la dirección del oleaje y la orientación de la playa. Se dieron casos en los que una tormenta tipo I causaba un mayor retroceso en la línea de costa comparado con el inducido por una tormenta tipo III. Un ejemplo de esto es San Felipe sitio de muestreo con una orientación de 330°, que presentó un mayor retroceso (9.4 m) en la tormenta tipo I con una dirección promedio de oleaje de 347°, siendo menor el retroceso (5.9) con la tormenta tipo III con una dirección promedio de oleaje de 23°.

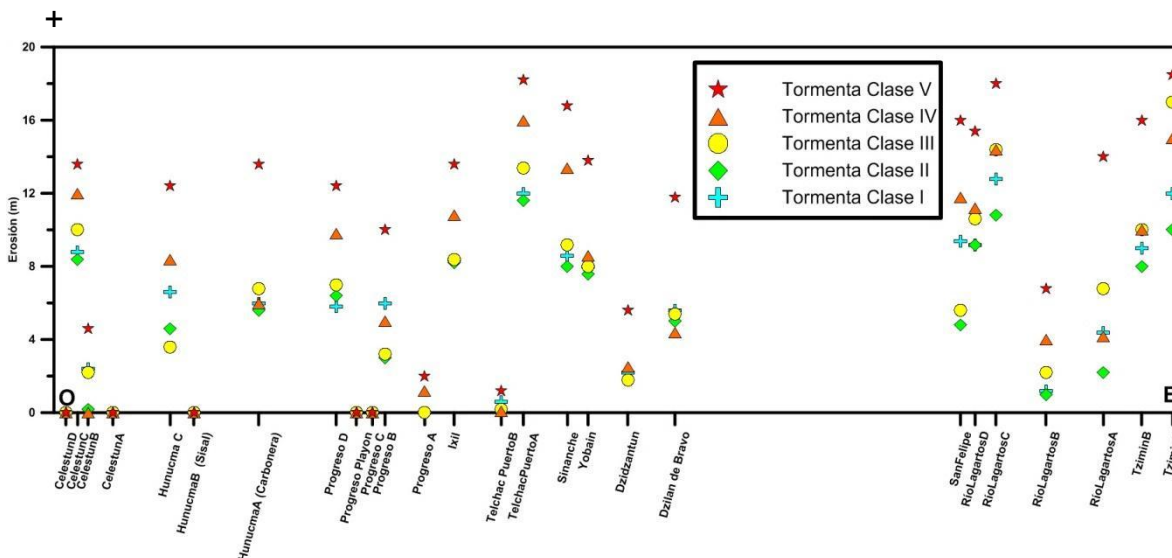


Figura 37. Retrocesos de línea de costa resultante después de una tormenta con respecto al perfil inicial.

Los sistemas de barras sumergidas son factor que interviene en los procesos erosivos. Un ejemplo de esto es el caso de Celestún D, lugar en donde el perfil de playa presenta una barra a una distancia de 10 m del nmm, de aproximadamente 0.6 m de altura, y donde el retroceso de playa fue nulo, diferenciándose de Celestún C, en donde existe una barra, pero más distante de la costa (30 m aprox.), con la mitad de altura, presentándose un retroceso de playa que alcanzó los 13.6 m en los eventos más extremos.

### III.III.II. Run up

La figura 38 presenta los valores de *run up* obtenidos para las cinco tormentas, en donde se puede observar que los mayores valores se dan en los sitios de San Felipe (2.3m) seguido de Río Lagartos B, Celestún D y Hunucmá C con *run up* de 1.9m, para eventos de tormenta tipo V.

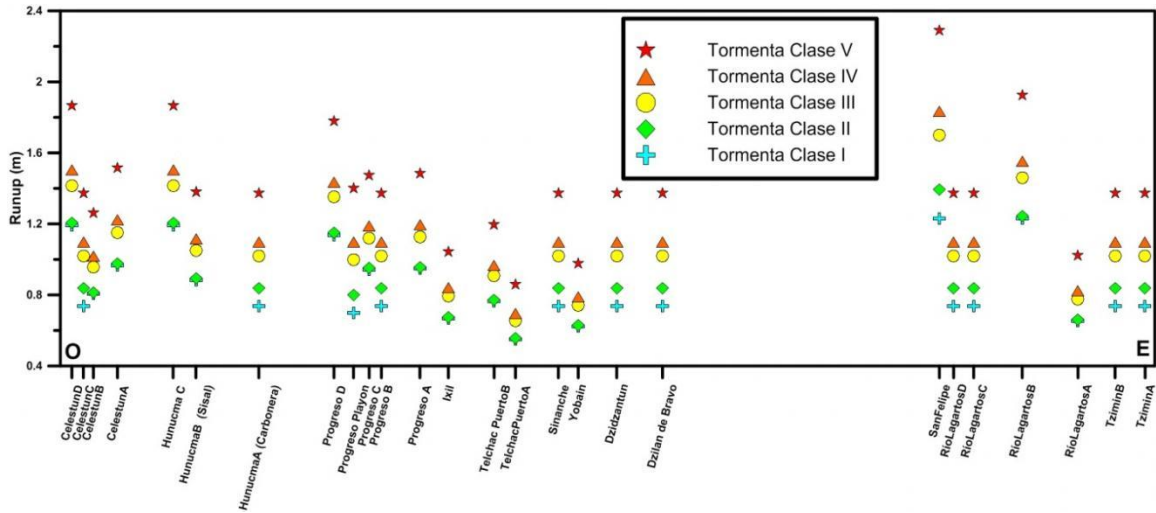


Figura 38. Valores de *run up* para cada clase de tormenta en diferentes localidades de la costa de Yucatán.

La distribución de los valores de *run up* en general presenta mayores valores en la parte oeste de la costa coincidiendo con la distribución de los valores de  $\xi$ , sin embargo en la parte este se puede observar que sobresalen San Felipe y Río Lagartos, puntos en donde no se aplicó el factor de corrección por no contar una pendiente ( $\alpha$ ) ascendente en la parte trasera de la cota máxima.

En la Figura 39, se caracterizó el valor de *run up* más la marea astronómica (0.3m), quedando prácticamente una distribución similar a la del *run up*, sólo que con el incremento de la marea y estos valores son los considerados para calcular el IPI.

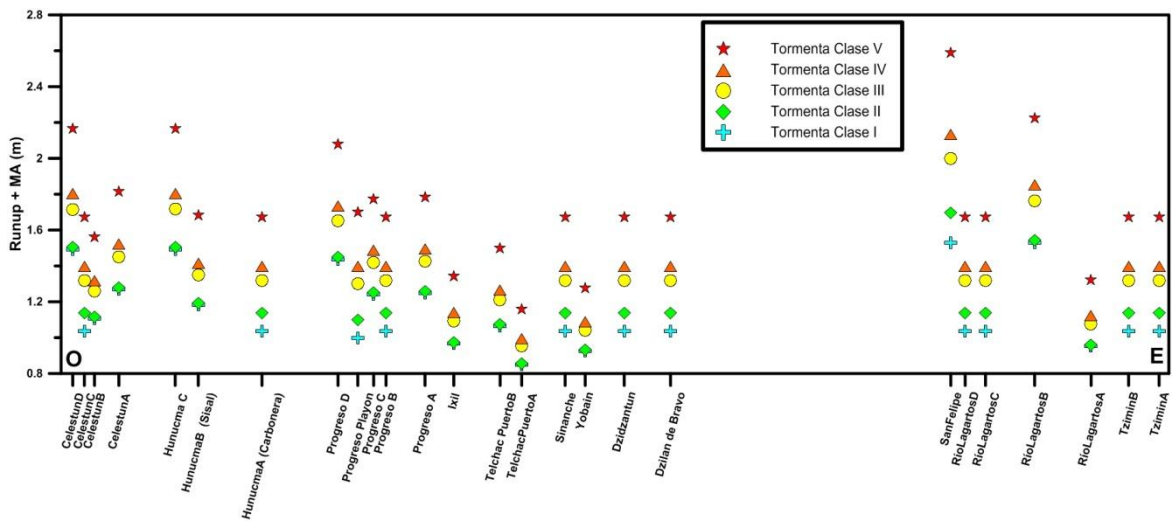


Figura 39. Valores de *run up* más marea astronómica para cada clase de tormenta en diferentes localidades de la costa de Yucatán.

### III.IV. Indicadores de potencial de erosión, inundación y peligrosidad

Una vez obtenidos los resultados de erosión e inundación para cada una de las cinco tormentas seleccionadas, se generaron los tres índices (IPE, IPI e IP), considerando las características de cada playa.

La Figura 40 muestra el potencial de erosión para todas las tormentas consideradas. Cabe destacar que las secciones correspondientes a Río Lagartos B y C presentan valores muy altos a todos los niveles de tormenta, esto como resultado de la relación entre el retroceso de playa y ancho. Por otra parte sólo se encontró este nivel para las otras secciones de Río Lagartos y las de Progreso, Sinanché y Yobaín para las tormentas tipo IV y V.

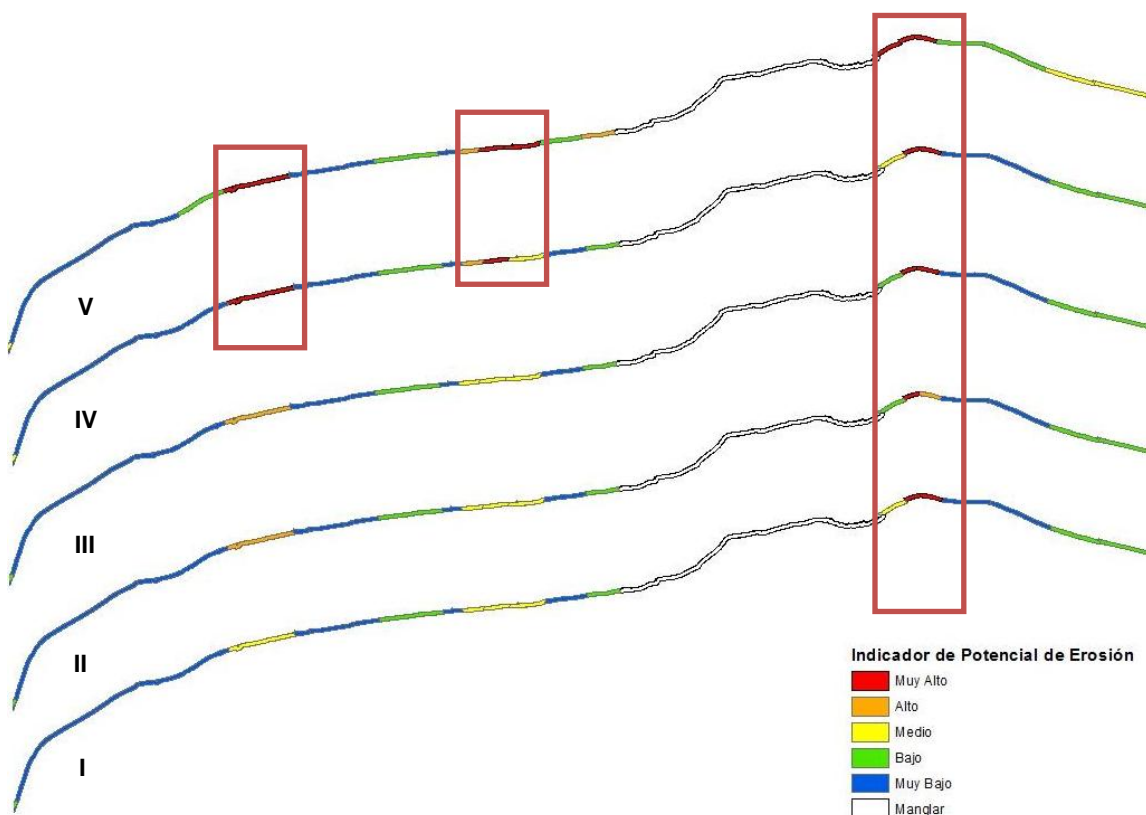


Figura 40. Indicador de potencial de erosión por tormentas.

La figura 41 muestra el potencial de inundación (IPI) para las cinco tormentas consideradas, identificando tres zonas en donde el IPI presenta valores alto y muy alto. Estas zonas son Río Lagartos A y B y San Felipe en la región Este. Dzilam y Dzidzantún en la parte central. Progreso A y D, Hunucmá A, B y C, y Celestún B y



D en la parte Oeste. Es importante mencionar que de las 12 localizaciones evaluadas en seis de ellas existen asentamientos humanos.

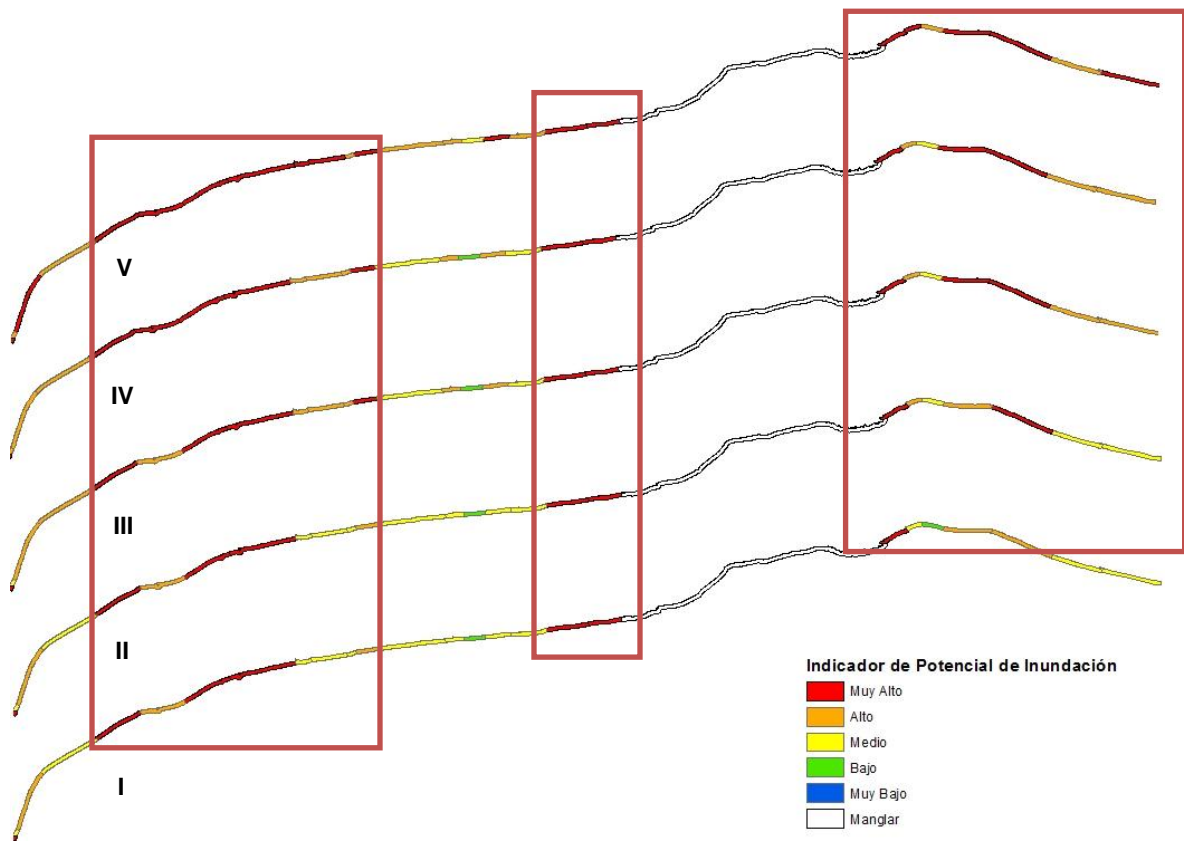


Figura 41. Indicador de potencial de inundación.

La figura 42 presenta el IP para las cinco tormentas consideradas, presentando niveles muy altos para todos los tipos de tormentas en la porción de San Felipe y Progreso D, también se identifica un zona integrada por las localidades de Dzidzantún, Yobaín y Sinanché, la cual se ubica en la parte central, y solo se ve afectada por eventos de tormenta tipo V.

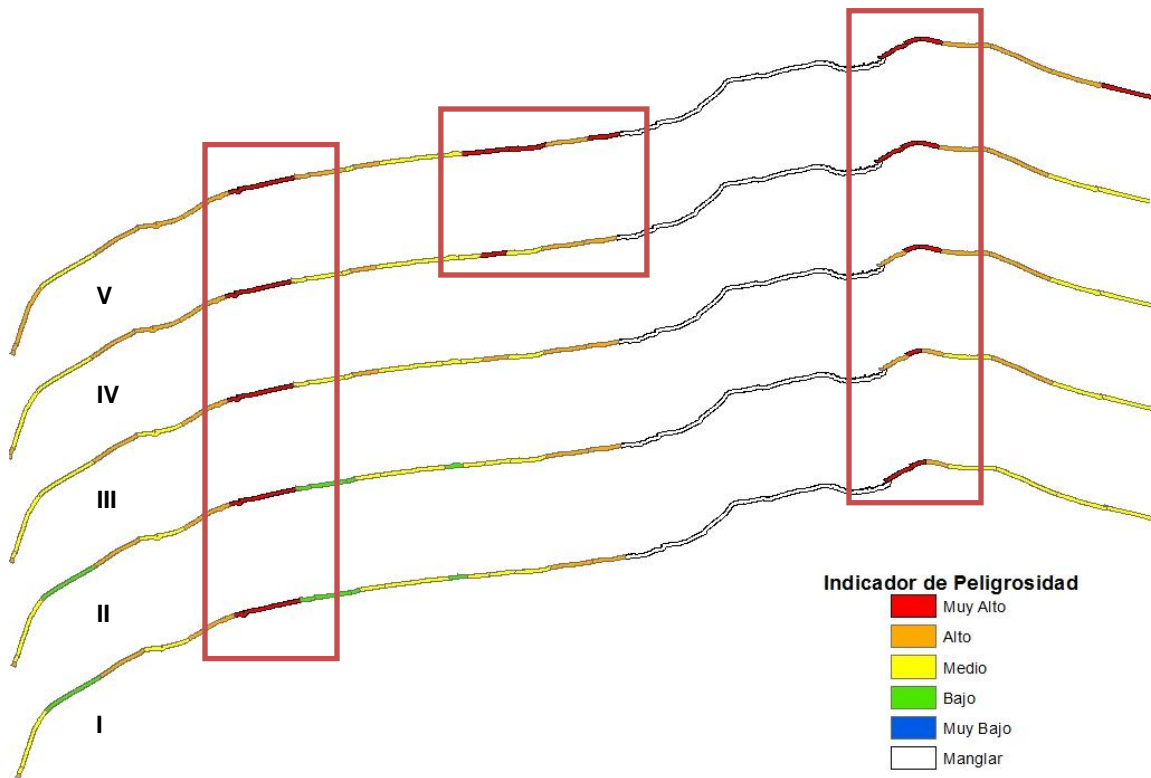


Figura 42. Indicador de peligrosidad.

A continuación se presentan mapas de los indicadores de peligrosidad para las tormentas tipo IV y tipo V en donde se detalla el nivel del indicador de peligrosidad (IP) por municipio y que a su vez se pueden observar los niveles de los indicadores de inundación y erosión.

#### III.IV.I. Indicadores de potencial de erosión, inundación y peligrosidad a tormentas tipo IV

La Figura 43, representa los municipios de Celestún y Hunucmá. El primero presenta valores de peligrosidad medio para la mayoría del municipio y alto para la porción sureste, zona donde se concentra la población del municipio, razón por la que es necesario considerar la prevención de riesgos, resultando en una zona a considerar para la prevención de riesgos. El nivel de peligrosidad de Hunucmá es alto, siendo esta zona más propensa a inundación que a erosión debido a la presencia de playas anchas. Es por esto que la única población asentada en esta región, Sisal (Hunucmá B), es más propensa a este tipo de afectaciones.

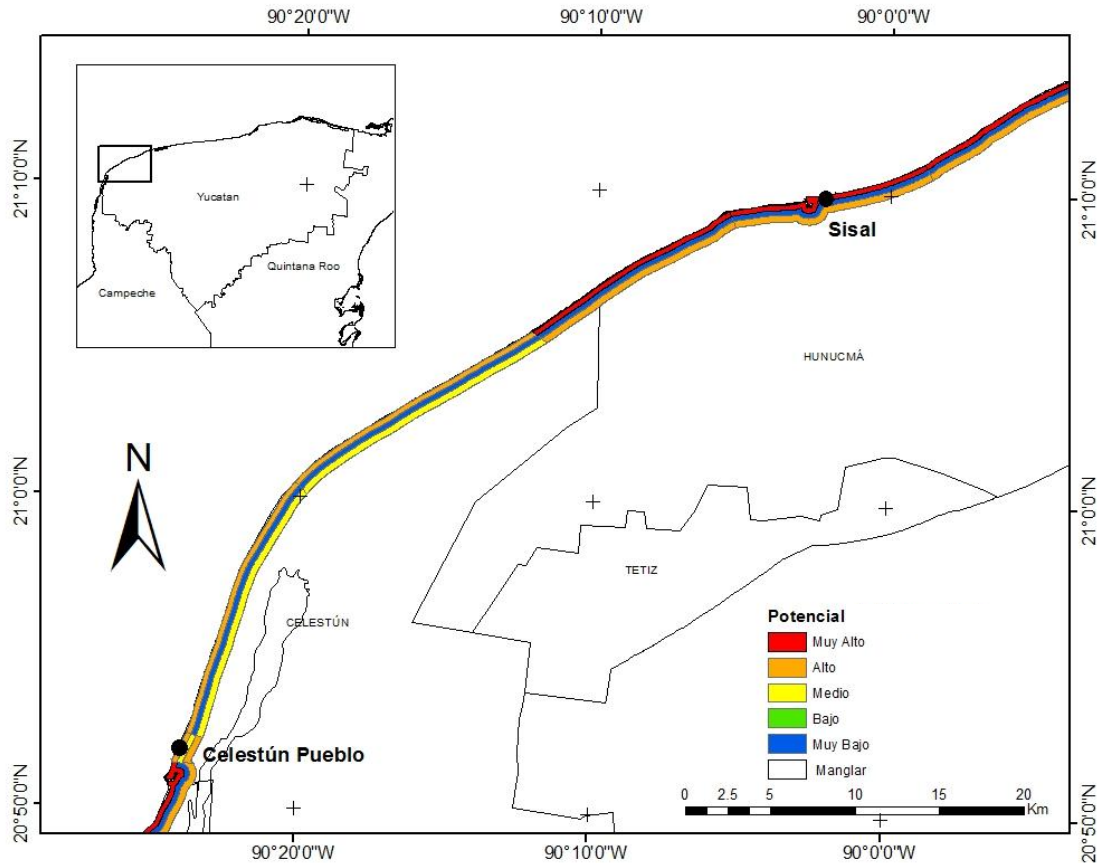


Figura 43. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en los municipios de Celestún y Hunucmá.

La Figura 44, se aprecia de manera clara que en la porción Oeste del municipio de Progreso existe una zona con un potencial de peligrosidad muy alto, zona donde se encuentra la comunidad de Chelem (Progreso D), que en la actualidad presenta problemas de erosión críticos agravados por la destrucción de las dunas y su sustitución por infraestructura ubicada prácticamente en la línea de costa. De esta manera, esta zona requiere de la aplicación de mitigación o prevención de riesgos. La parte central del municipio (Playón y Puerto Progreso) presenta un valor medio, dado en parte por el considerable ancho de la playa. En el extremo Este del municipio la comunidad de Chicxulub presenta un potencial alto, debido al efecto de la inundación. En Chicxulub la cobertura de infraestructura es menor que en Chelem, pero con propiedades de mayor valor económico. Finalmente los municipios de Dzemul e Ixil presentan un valor medio y las infraestructuras localizadas detrás de la playa son, básicamente, casas de verano.

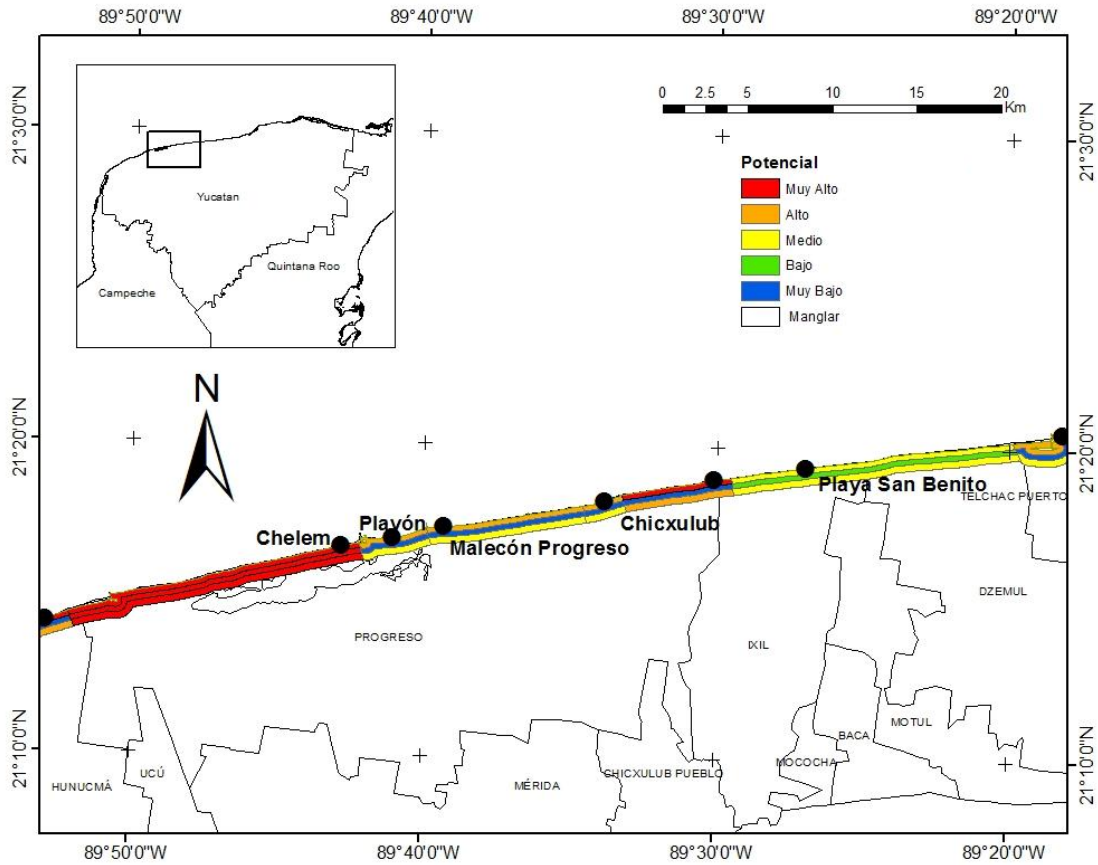


Figura 44. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en los municipios de Progreso, Ixil y Dzemul.

La Figura 45, se observan los municipios de Telchac y Yobaín con IP medio. En el primer caso el pueblo de Telchac es propenso a la erosión, mientras que en el segundo caso, la población de Chabihau estaría afectada por ambos peligros.

La población de San Crisanto en Sinanché presenta un potencial de peligrosidad muy alto. Por otra parte los municipios de Dzidzantún y Dzilam de Bravo presentan un valor alto, en cuyos casos las poblaciones de Santa Clara y Dzilam, se verían afectadas por inundación.

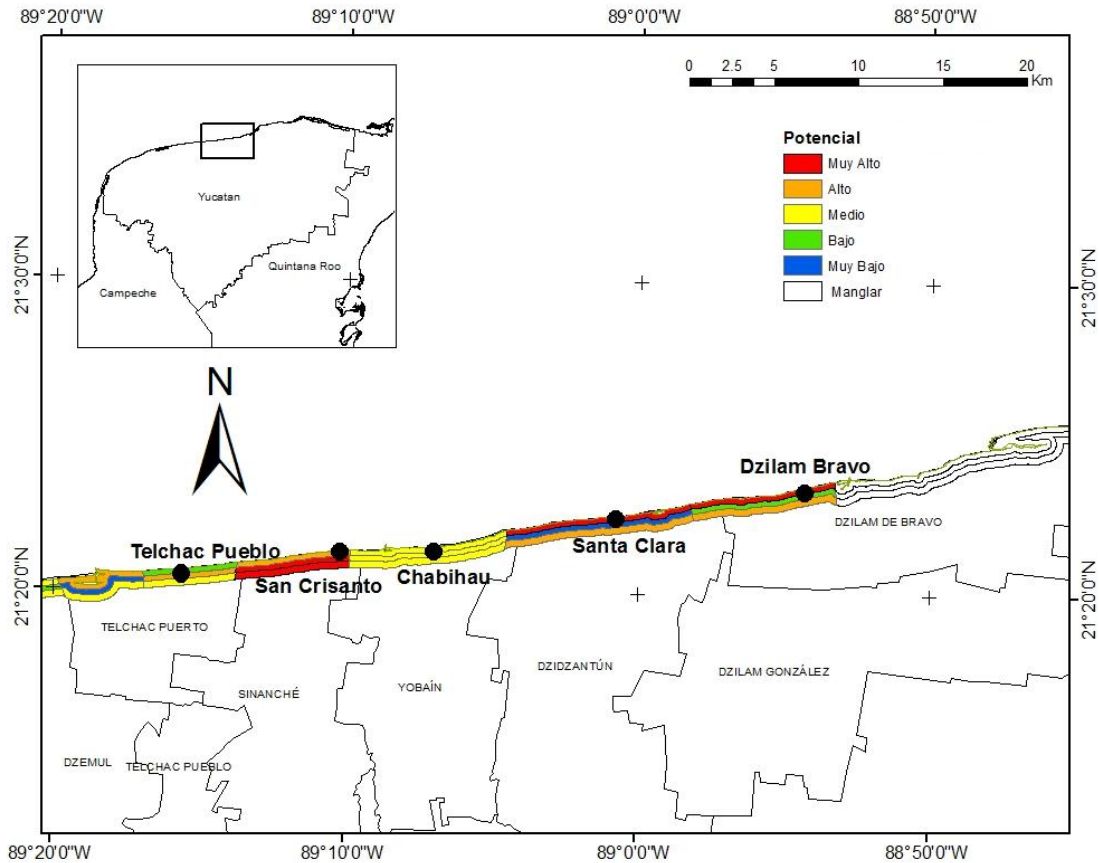


Figura 45. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en los municipios de Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún y Dzilam de Bravo.

La Figura 46 muestra los municipios de San Felipe, Río Lagartos y parcialmente Tizimín; en los primeros dos, los valores de peligrosidad son muy altos, a pesar de que las poblaciones se encuentran en la parte posterior de la isla de barrera. Existen evidencias de inicios de desarrollo que deben considerar estos potenciales de peligrosidad para futuros desarrollos de asentamientos humanos. El extremo Oeste de Tizimín presenta un valor alto de peligrosidad, a causa de la cota baja presente en esta sección por tanto la población de Las Coloradas es más propensa a la inundación que a la erosión.

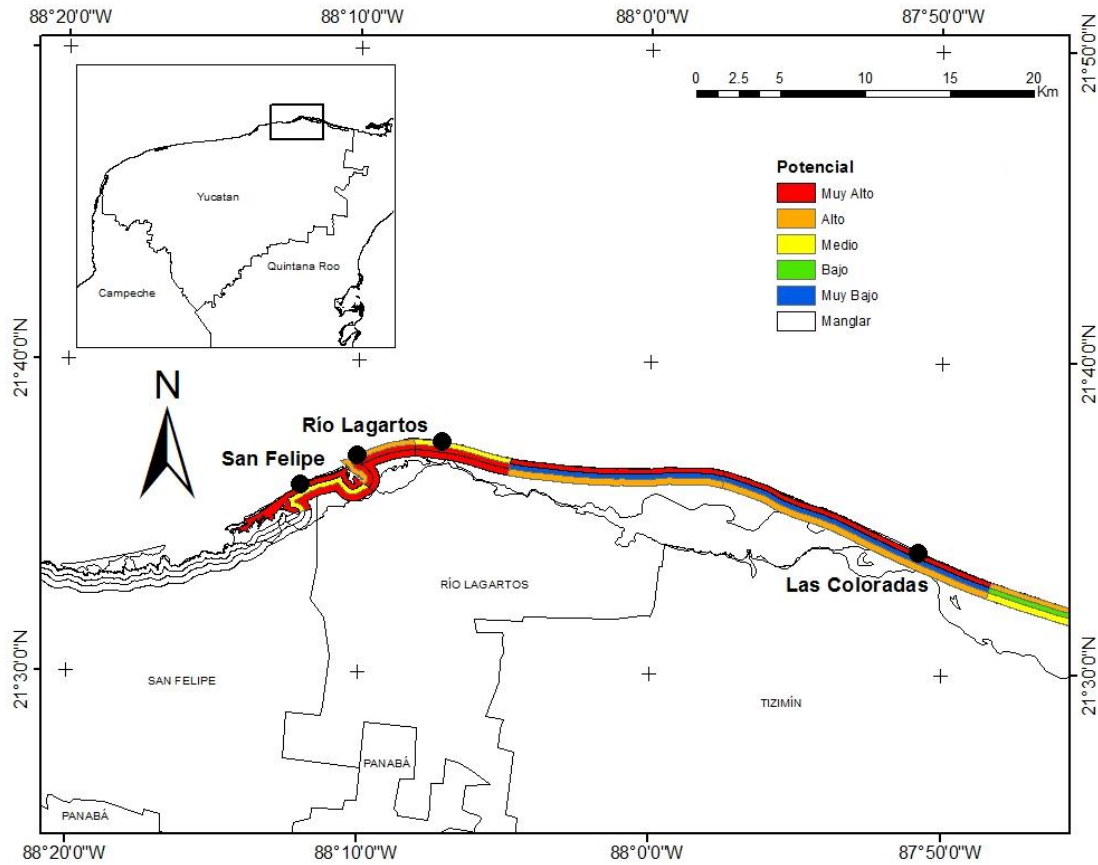


Figura 46. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en los municipios de San Felipe y Río Lagartos.

La última porción de costa (Figura 47), se ubica en la parte más oriental de la costa de Yucatán, cubriendo el municipio de Tizimín: Esta zona está mayoritariamente despoblada, sin embargo en el extremo oriente se encuentra la población de El Cuyo, la cual presenta un potencial de peligrosidad medio, ya que, a pesar de tener playas anchas es medianamente propensa a la inundación.

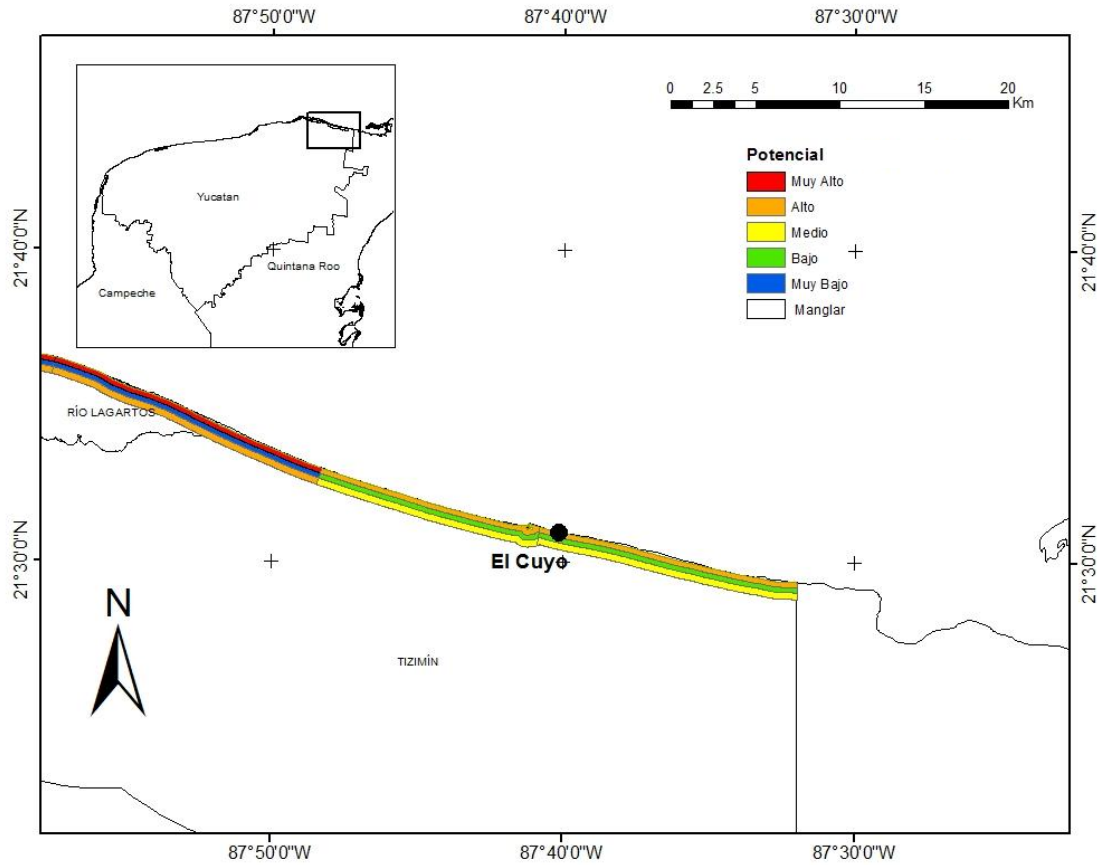


Figura 47. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo IV en el municipio de Tizimín.

### III.IV.II. Indicadores de potencial de erosión, inundación y peligrosidad a tormentas tipo V

Las condiciones de peligrosidad en las playas de Celestún y Hunucmá con la tormenta tipo V (Figura 48), se agudizan, especialmente para el pueblo de Celestún y Sisal con una potencial de peligrosidad Alto, el resto de los sitios de estos dos municipios se mantiene con los niveles de IPE e IPI, similares a la respuesta en la tormenta tipo IV.

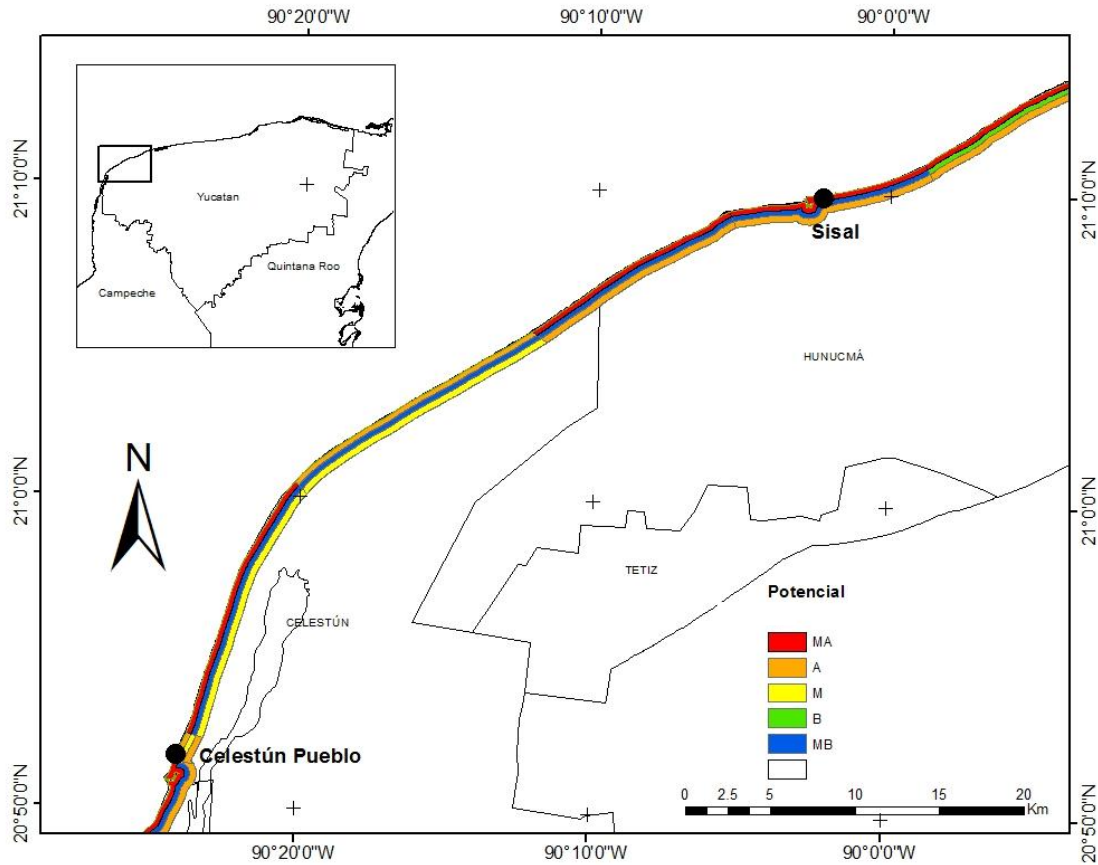


Figura 48. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en los municipios de Celestún y Hunucmá.

En la tormenta tipo V, para los municipios de Progreso, Ixil y Dzemu (Figura 49) los niveles de los índices se mantienen parecidas a las de la tormenta tipo IV, con excepción de la sección del Playón de Progreso, que subió un nivel de peligrosidad. En este sentido es importante hacer un estudio más detallado del municipio de Progreso sobre todo en la zona de Chuburná-Chelem que considere la densidad poblacional (dado que es el de mayor población costera en el estado de Yucatán con 53 958 habitantes (INEGI, 2010) y el valor económico de la infraestructura que podría ser afectada cuando se presentan tormentas tipo IV y V.



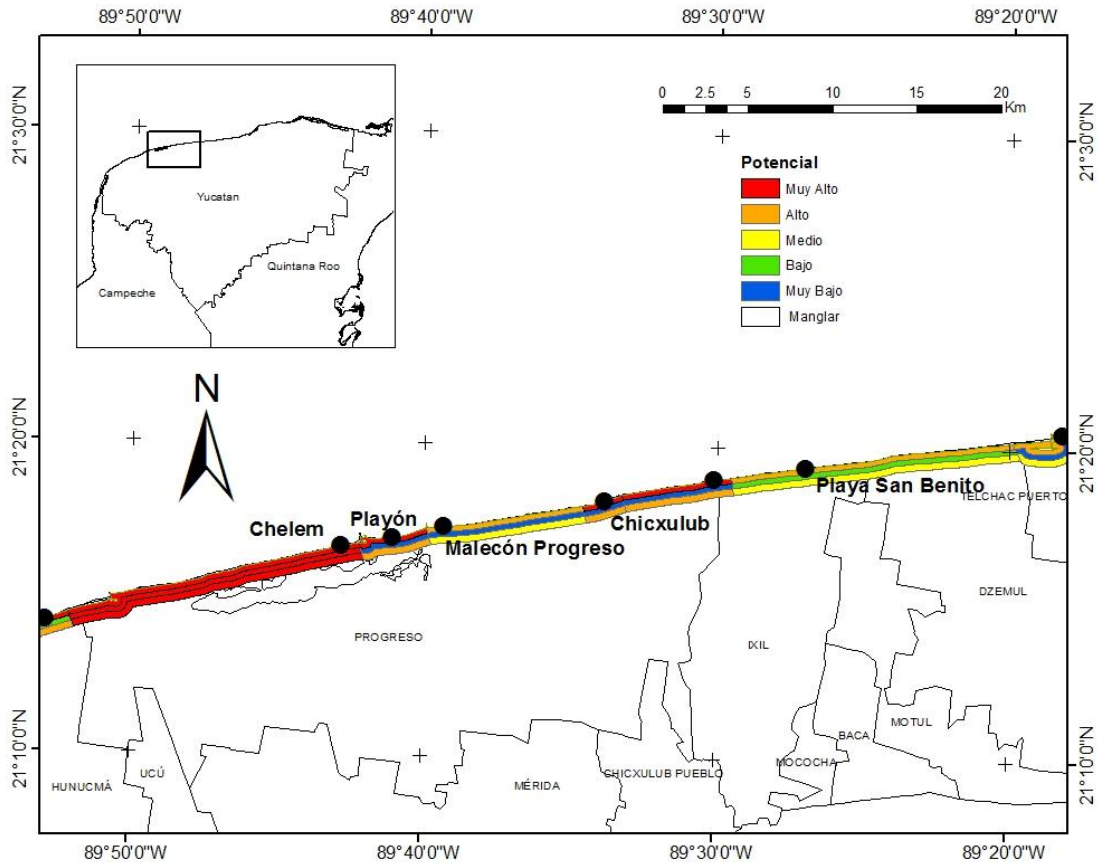


Figura 49. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en los municipios de Progreso, Ixil y Dzemul.

La Figura 50, se puede observar que el IP presenta valores alto y muy alto en cinco de las seis secciones, a diferencia de las tormentas tipo IV en donde una sección presentaba un valor alto y otro muy alto. En estos sitios existen las comunidades de Telchac, San Crisanto, Chabihau, Santa Clara y Dzilam de Bravo, lo que argumenta el seguimiento de futuros estudios sobre esta zona con la necesidad de involucrar aspectos más específicos.

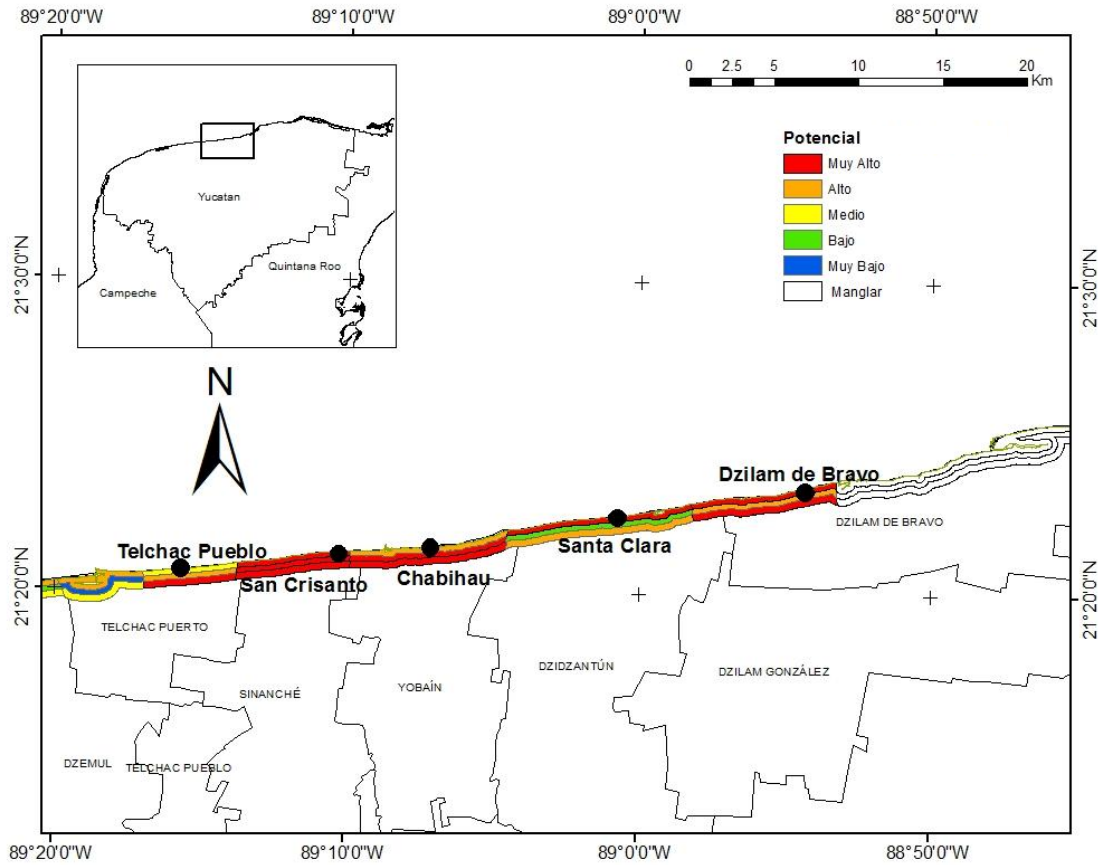


Figura 50. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en los municipios de Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún y Dzilam de Bravo.

En los municipios de San Felipe, Río Lagartos y parcialmente Tizimín (Figura 51) el potencial de peligrosidad no varió con respecto a las tormentas tipo IV.

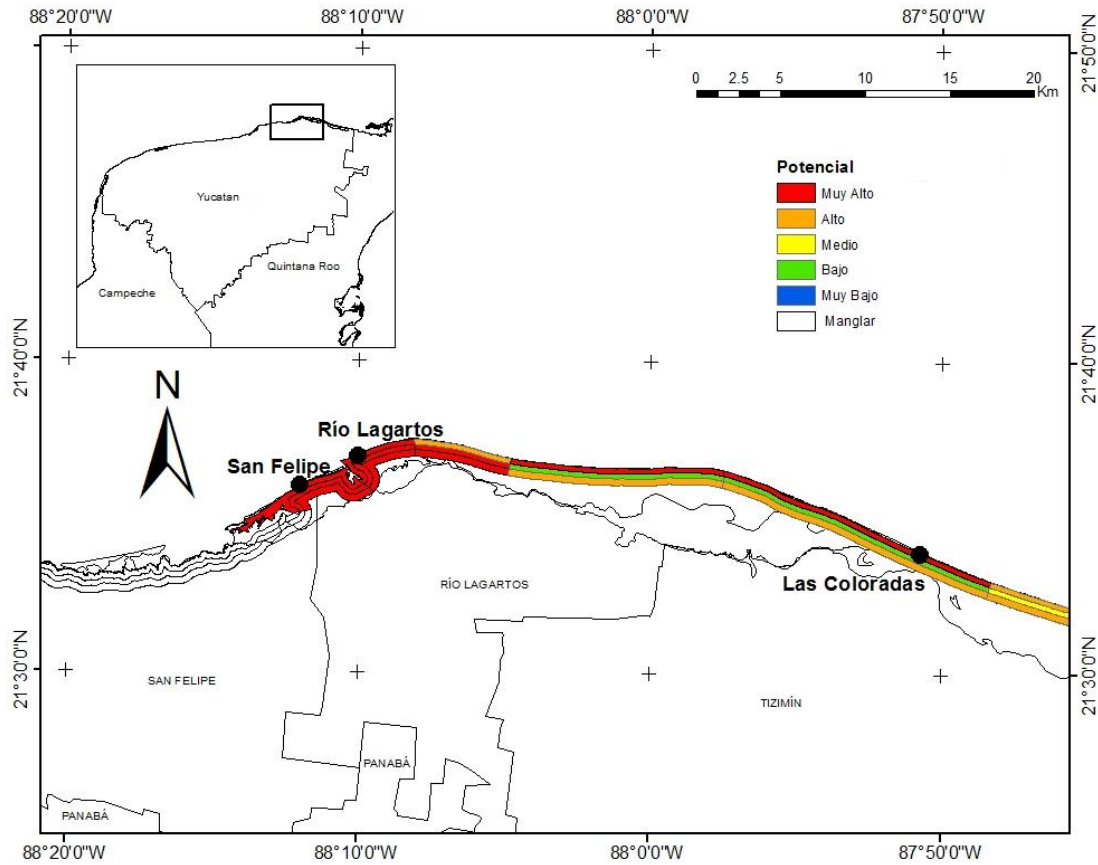


Figura 51. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en los municipios de San Felipe y Río Lagartos.

Finalmente para el caso de Tizimín (Figura 52) si bien, el potencial de inundación incrementó para la comunidad de El Cuyo, en general el potencial de peligrosidad no varió con respecto a las tormentas tipo IV.

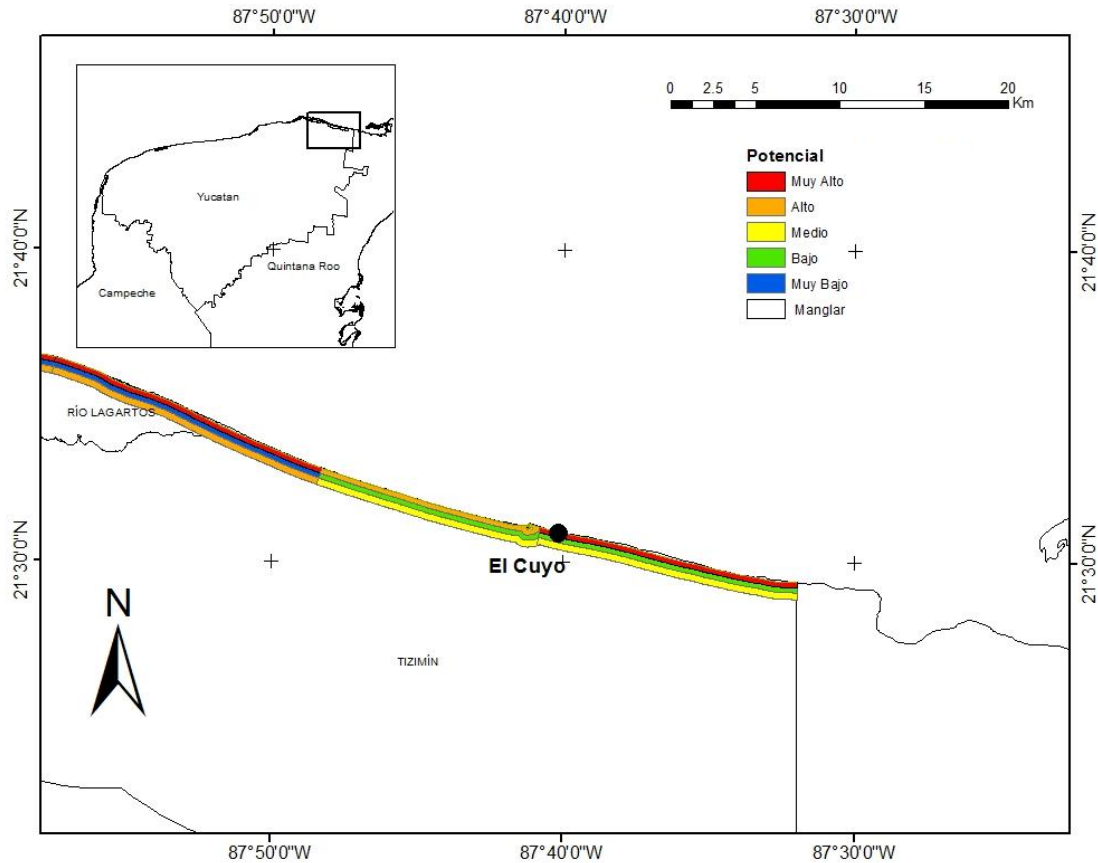


Figura 52. Indicadores de potencial de inundación (franja superior), erosión (franja intermedia) y peligrosidad (franja inferior) con tormentas tipo V en el municipio de Tizimín.

### III.IV.III. Potencial de erosión en la costa expresada en porcentaje

La longitud de costa con potencial de erosión varía en función del tipo de tormenta al que el sistema esté expuesto. En el caso de los eventos evaluados las proporciones de costa cambian como se representa en la Figura 53. De acuerdo con esta figura se observa que para las tormentas tipo I hasta la tipo IV poco más de la mitad de las playas presentan un potencial muy bajo (55%) y solo con la presencia de tormentas tipo IV y V, se presenta un porcentaje significativo de valores alto y muy alto variando desde un 16% en el primer caso hasta un 27% en el segundo caso, estas playas corresponden a siete sitios de muestreo de los cuales cinco son regiones pobladas (Dzilam de Bravo, Chabihau, San Crisanto, Telchac Pueblo y Chelem), por lo que es recomendable considerar planes de prevención en estas zonas identificadas.

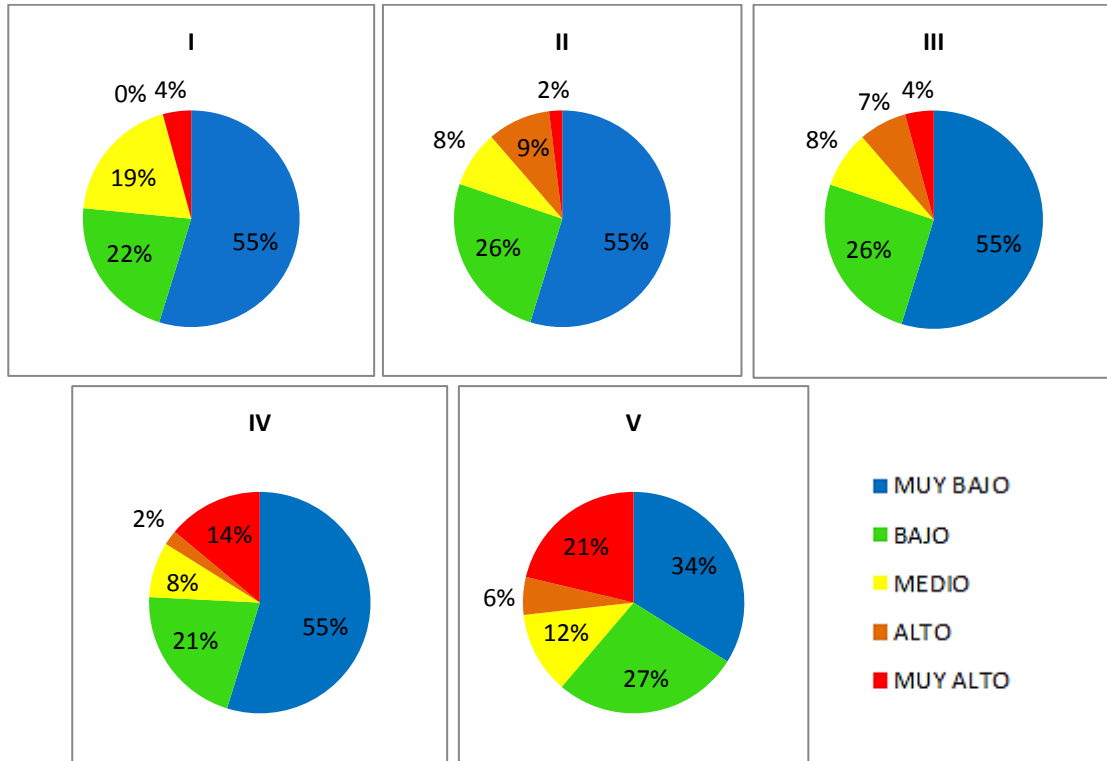


Figura 53. Porcentaje de longitud de costa con potencial de erosión en respuesta a cada uno de los cinco tipos de tormenta.

#### III.IV.IV. Potencial de inundación en la costa expresada en porcentaje

Los eventos de inundación en términos generales tienen un potencial de peligrosidad mayor comparado con el de procesos erosivos. Esta diferencia se distingue desde los eventos de tormenta menos energéticos. Si solo se toman en cuenta valores de IPI alto y muy alto se puede observar, que en las tormentas tipo I el 54% de longitud de costa se ve afectado, el 56% para las tormentas tipo II. A partir de los eventos tipo III hay un incremento muy grande llegando hasta el 85% con un ligero incremento para eventos tipo IV (86%) y prácticamente cubriendo la totalidad del litoral de Yucatán para los eventos tipo V, con el 98% de la longitud de costa afectada (Figura 54).

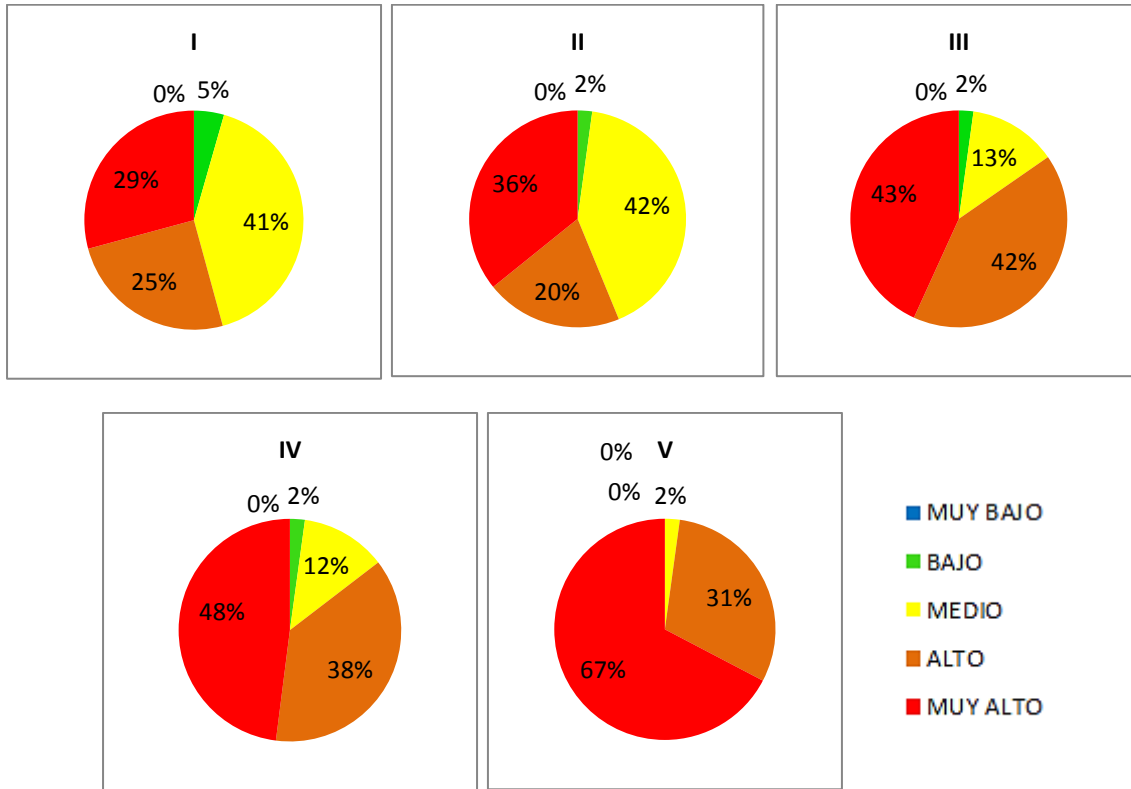


Figura 54. Porcentaje de longitud de costa con potencial de inundación en respuesta a cada uno de los cinco tipos de tormenta.

Es importante resaltar que, el alcance de estos valores, es solo considerando la marea astronómica, faltando por analizar el alcance de la marea de tormenta, por lo que es muy probable que la evaluación presente valores de potencial de inundación más altos.

Durán (2011) reporta que el 28% de la superficie del estado de Yucatán se constituye por *planicies subhorizontales* que se caracterizan por ser verdaderamente planas y sólo representan montículos menores de 5 m. Por el análisis anterior cualquier anomalía en el nivel del mar podría propiciar severas afectaciones. La costa de Yucatán tiene en su mayoría playas con una pendiente muy suave, que al ser expuestas a eventos de oleaje de tormenta pueden afectar gravemente el ámbito social, económico y ambiental de la zona, como ha ocurrido con eventos registrados anteriormente.

III.IV.V. Potencial de peligrosidad en la costa expresada en porcentaje

En la figura 55 podemos visualizar el porcentaje de costa que tiene un determinado IP por impactos de tormenta para cada una de las cinco clases. Este índice integra los valores del IPE e IPI y se puede observar como las tormentas tipo I afectan el 34% de las playas considerando los niveles alto y muy alto. Este se incrementa al 40% para las tormentas tipo II, 50% para las tipo III, 56% en las tipo IV y por ultimo ascendiendo hasta 88% en las tormentas tipo V. Es decir, la mitad de la totalidad de longitud de las playas arenosas está en peligro al paso de un evento de tormenta que no necesariamente sea de gran intensidad (a partir de las tormentas tipo III).

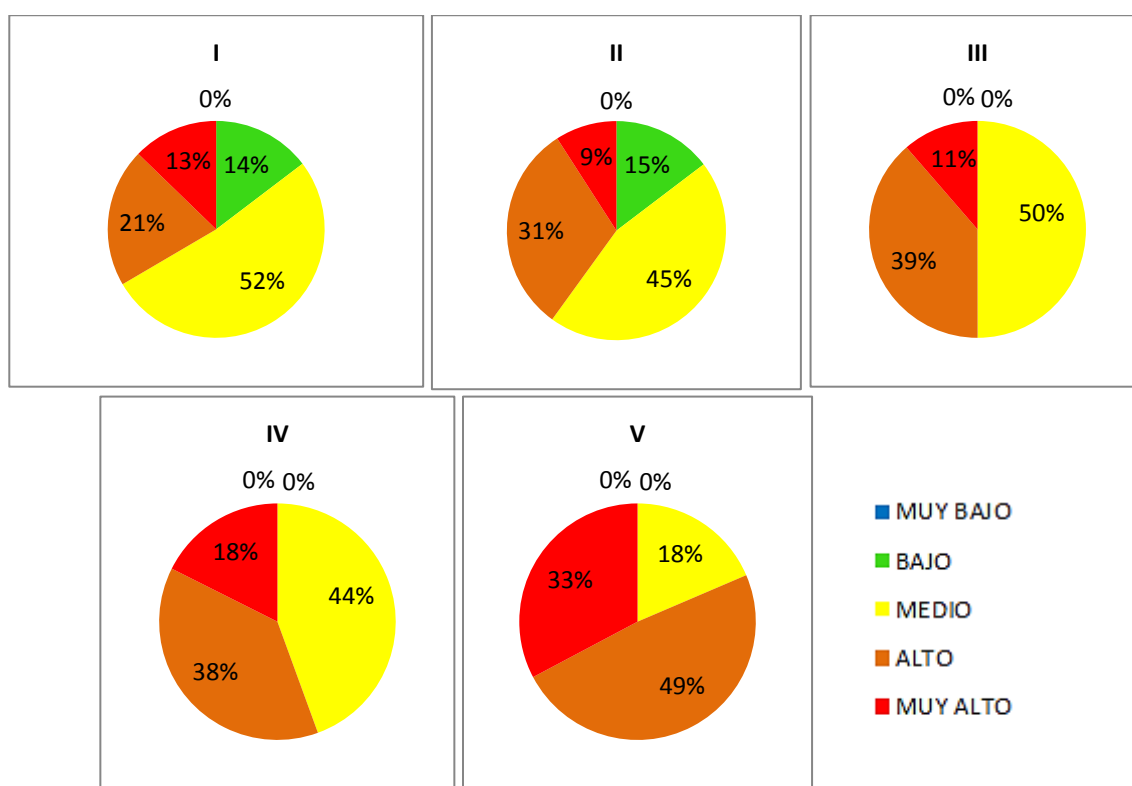


Figura 55. Porcentaje de longitud de costa con potencial de peligrosidad en respuesta a cada uno de los cinco tipos de tormenta.

### **III. Conclusiones y recomendaciones**

Este trabajo presenta una metodología de para la evaluación de la peligrosidad ante el impacto de tormentas en la costa de Yucatán. La aplicación está basada en la utilización de indicadores para evaluar la peligrosidad en base a los dos principales procesos generados por el impacto de tormentas: el potencial de erosión y el de inundación. En ambos casos los indicadores desarrollados combinan información del impacto y la capacidad de respuesta de la playa. Finalmente la integración de ambos procesos se lleva a cabo a través de un índice de peligrosidad.

Para realizar esta evaluación fue necesario caracterizar el agente forzante, así como el medio receptor. Para el primero, se ha obtenido una clasificación de las tormentas que afectan a la región de Yucatán utilizando datos de un periodo de 30 años. Esta clasificación, basada en cinco tipos de tormenta definidas en términos de oleaje, es homologa a las dadas por Mendoza y Jiménez (2008) y a las escalas de vientos de huracanes *Saffir-Simpson* (1973). Para el segundo, se realiza una caracterización de las playas arenosas del estado de Yucatán. Se ha encontrado que predominan las playas disipativas con  $\xi < 0.5$  en 20 sitios de muestreo y seis clasificadas como intermedias con un valor de  $\xi$  entre 0.5 y 3.3 ubicadas en la parte occidental de la costa.

En base a las tormentas y a las características de las playas, se evaluaron los procesos erosivos inducidos por eventos de tormenta. Estos procesos presentan valores máximos con retrocesos del orden de los 18 m en Río Lagartos C Telchac Pueblo y El Cuyo. Por otra parte, existe un número de localizaciones en las que los eventos de tormentas más energéticos no producen una erosión significativa, como es el caso de Celestún A y D, Sisal, Malecón Progreso y Playón de Progreso. Es importante destacar que el estudio no considero la presencia de estructuras que pueden incrementar/disminuir la peligrosidad. El caso más claro es el del playón de progreso que está protegido para oleaje del noreste NE por el puerto de altura.

En términos de inundación, los valores máximos de *run up* variaron entre 0.6 y 2.3 m. En general la distribución de los valores son homogéneos pero sobresalen cinco sitios: Río Lagartos B, San Felipe, Progreso D, Hunucmá C y Celestún D. De estas cinco locaciones, solo en Progreso D existen asentamientos humanos (Chelem). En términos generales la zona costera de Yucatán es más propensa a la inundación que a la erosión frente a los impactos de tormenta. En la



caracterización del *run up*, no se consideró el efecto que pueden producir las barras de arena sumergidas en la disipación de la energía proveniente del oleaje, lo que podría minimizar el alcance de este parámetro y se sugiere se evalúe en futuros estudios con el objetivo de excluir posibles sobreestimaciones.

Cabe señalar que la erosión costera solo afecta de forma directa al frente de playa, mientras que el alcance de las inundaciones costeras pueden tener un impacto en un área más extensa generando impactos directos en infraestructura, vías de comunicación, pérdida de vidas, entre otros, así como efectos secundarios tales como enfermedades, escasez de alimento, contaminación y problemas de desechos (Departamento de Desastres de Guatemala, 2007)

De acuerdo con los mapas generados las comunidades de Chelem en Progreso, Santa Clara en Dzidzantún, Chabihau en Yobaín y San Crisanto en Sinanché presentan un mayor potencial de peligrosidad y dado que actualmente no se cuenta con la información para generar herramientas de prevención de riesgos exclusivamente de estas zonas se sugiere continuar estudios más detallados.

Los perfiles de playa deben mantenerse actualizados, dado que las propiedades como ancho y elevación de la playa, afectan de manera directa a la peligrosidad.

Se sugiere que se considere el nivel de la marea de tormenta ya que es un elemento clave en la caracterización de la inundación.

Finalmente se recomienda la calibración del modelo LITPROF y del *run up*, que por limitantes de datos, en este trabajo no se llevaron a cabo, pero sí que son de suma importancia para validar los resultados obtenidos.

## **Bibliografía**

Aarne, P., Jeffrey, J. y Weiner, R., 1994, Environmental Engineering, Butterworth Heinemann, [http://www.ajdesigner.com/phpstokeslaw/stokes\\_law\\_terminal\\_velocity.php](http://www.ajdesigner.com/phpstokeslaw/stokes_law_terminal_velocity.php) (consultado 15 de abril de 2012).

Appendini, C., Medina, J., Galofre, J., López, J. y Palmeiro, A., 2006, Beach nourishment in Cunit, Spain: Shifting from hard to soft protection, Coastal Engineering, 4082-4091.

Appendini, C., Oropeza, F., Torres-Freyermuth, A., Salles, P., López, J. y Mendoza, E., 2011, Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: wind reanalyses assessment, Applied Ocean Research. Sometido 2011.

Baquerizo, A., Losada, M. y López, M., 2004, Fundamentos del movimiento oscilatorio, <http://es.scribd.com/doc/48762026/90/Rotura-del-oleaje> (consultado 26 de abril de 2010).

Basco, D. y Walker, R., 2010, Application of the coastal storm impulse (COSI) parameter to predict coastal erosion, 12 p.

Battjes, J. y Janssen, J., 1978, Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proc. 16<sup>th</sup> Conf. on Coastal Engineering, ASCE, pp. 569-587.

Battjes, J., 1974, Surf similar, proceedings of the 14th Conference of Coastal Engineering. ASCE, pp. 466-480.

Bromirski, P. y Kossin, J., 2008, Increasing hurricane wave power along the U.S. Atlantic and Gulf coasts, Journal of Geophysical Research, Vol. 113, C07012, 10 p.

Buitrago, N., y Posada, B., 2009, Metodología para el levantamiento de perfiles de playa. Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral, Colombia, 297 p.

Calero, P., Carta, J. y Padrón, J., 2012, Energía, [http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/cursos/energia\\_p/le\\_00portada.html](http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/cursos/energia_p/le_00portada.html) (consultado 30 de marzo de 2012).

Carabias, J. y Landa, R., 2005, Agua, medio ambiente y sociedad, México, Colegio de México, UNAM, Fundación Gonzalo Río Arronte.

Carranza, A., 2005, Consideraciones Ambientales del Litoral en el Golfo de México. Trabajo presentado en: 1er Encuentro Internacional del Mar 2005, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Coatzacoalcos, Veracruz.

Carranza, A., 2009, Causas y consecuencias de la erosión de playas, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 13 p.

Carranza, A., Macías, H. y Arias, A., 2003, El Calentamiento global y las intrusiones salinas de la zona costera. IV Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, San Luis Potosí, S.L.P., México, 10-12 Septiembre de 2003.

Centre National D'études Spatiales CENS, 2012, <http://www.aviso.oceanobs.com/es/kiosco/dosieres/observing-the-ocean-from-space-leaflet-series/mareas-el-oceano-bajo-influencias/el-sol-y-la-luna/index.html>, (consultado 13 de abril 2012).

Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED, 2007, [http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3112008Fasc. Ciclonas\\_2007.pdf](http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3112008Fasc. Ciclonas_2007.pdf) (consultado 15 de abril de 2012).

Cifuentes, J., Torres, P. y Frías, M., 1995, El Océano y sus Recursos III, Las Ciencias del Mar: Oceanografía, Física, Matemáticas e Ingeniería, Fondo de Cultura Económica, México, <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/oceano.htm>, (consultado 13 de abril 2012).

Comisión Intersecretarial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas CIMARES, 2007, Política Nacional de Mares y Costas de México, <http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/cimares/Paginas/cimares.aspx>, (consultado 19 de mayo de 2012).

Comunidad Portuaria de Yucatán, 2009, <http://comunidadprogreso.blogspot.mx/>, (consultado 22 de marzo de 2012).

Consultoría en Ingeniería Marítima y Ambiental, 2011, Proyecto de instalación de tubos geotextiles para el control de erosión costera y protección de infraestructura de predios veraniegos, en Uaymitún, Yucatán, <http://www.axisingenieria.com.mx>, (consultado 14 de mayo de 2012).

Cuevas, J., 2009, Morphodynamics of carbonate beaches in the Yucatán Peninsula. *Ciencias Marinas*, 35, 307-320.

Dean, R., 1977, Equilibrium profiles, *Us Atlantic Gulf and Coasts*, Ocean Engineering, Delaware University, No. 12.

Departamento de Desastres de Guatemala, 2007, <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc14901/doc14901-d.pdf>, (consultado 3 de junio de 2012).

DHI, 2011, LITPACK, An Integrated Modeling System for Littoral Processes And Coastline Kinetics. Short Introduction and Tutorial, DHI Water & Environment.

Dolan, R. y Davis, R., 1992, An intensity scale for Atlantic coast northeast storms, *Journal of Coastal Research*, 8 (4), 840–853.

Doody, P., Ferreira, M., Lombardo, S., Lucius, I., Misdorp, R., Niesing, H., Salma, A., Smallegange, M., Serra, J., Roca, E., Fernández, P. y Pérez, C., 2005, Vivir con la erosión costera en Europa, [http://www.eurosion.org/project/eurosion\\_es.pdf](http://www.eurosion.org/project/eurosion_es.pdf), (consultado 15 de abril de 2012).

Durán R., 2011, Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 496p.

Eisen, M., Spellman, P., Brown, P. y Botstein, D., 1998, Cluster analysis and display of genome-wide expression patterns, *PNAS*, 95, No. 25.

El Ente Público Puertos del Estado EPPE, 1991, ROM 0.3-91. Oleaje. Anejo 1. Clima Marítimo en el litoral español. Puertos del Estado Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

El Universal, 26 de Marzo de 2012, <http://www.eluniversal.com.mx/nacion/195104.html>, (consultado 26 de marzo de 2012).

Galvin, C., 1968, Breaker type classification on three laboratory beaches, *Geophysical Research*, Vol. 73.

García, A., Xool, M., Euán, J., Munguía, A. y Cervera, M., 2011, La costa de Yucatán en la perspectiva del desarrollo turístico, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 82 p.

García, S., 2003, Predicción de los cambios en el perfil de playa mediante parámetros simples, Universidad Politécnica de Catalunya, España,

<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/6000> (consultado 8 de mayo de 2012).

Gobierno del Estado de Yucatán, 2012, [http://www.yucatan.gob.mx/procivvy/clasificacion\\_ciclon.php](http://www.yucatan.gob.mx/procivvy/clasificacion_ciclon.php), (consultado 16 de mayo de 2012).

Google Earth, 2011, <http://www.google.com/earth/index.html>, (consultado 15 de abril de 2012).

Guido, P., Ramírez, A., Godínez, L., Cruz., S. y Juárez, A., 2009, Estudio de erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, México, Avances en Recursos Hidráulicos, No. 20, pp. 41-56.

Gutiérrez, O., 2011, Desarrollo de una metodología para el estudio de la morfología de playas basado en mapas auto-organizativos de imágenes digitales, Tesis para obtener grado de Doctor, Universidad de Cantabria, España, [http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/48555/8de8.OQGGanexos\\_bibliografia.pdf?sequence=10](http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/48555/8de8.OQGGanexos_bibliografia.pdf?sequence=10), (consultado 19 de mayo de 2012).

Guza, R. y Thornton, E., 1982, Swash oscillations on a natural beach, Journal of Geophysical, 87, 483-490.

Hanson, H. y Kraus, N., 1989, Genesis: generalized model for beach profile change. Tech. Re. CERC-89-19.

Hernández, M., Azpra, E., Carrasco, G., Delgado, O. y Villicaña, F., 2001, Los Ciclones Tropicales de México, Instituto de Geografía de la UNAM, México, 123 p.

Herrero, A., Laín, L. y Llorente, M., 2008, Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones, Guía metodológica para su elaboración/Instituto Geológico y Minero de España, Instituto Geológico y minero de España, 133 p.

HolaYucatán, 01 de Junio de 2011, <http://holayucatan.com.mx/index.php/2011/07/01/celestun-bajo-el-agua/>, (consultado 29 de marzo de 2012).

Hunt, I., 1959, Design of seawalls and breakwaters, Journal of the Waterways and Harbors Division, 83, 123-152.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2005, <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=31> (Consultado 28 de septiembre de 2011).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2010, [http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/div\\_municipal.aspx?tema=me&e=31](http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=31) (Consultado 28 de septiembre de 2011).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2011, <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/yuc/geolo.cfm?c=444&e=31>, (consultado 29 de marzo de 2012).

International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR), 1994, Yokohama Message and Plan of Action, United Nations, Geneva.

Jiménez, J.A. y Sánchez-Arcilla, A., 1993 Influencia de la pendiente en la evolución del perfil de playa. II Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Gijón, (en prensa).

Juárez, M., Propin, C. y Padilla, L., 1995, La concentración regional de la población costera en México entre 1930 y 1999, Revista Geográfica, Instituto Panamericano de Geografía e Historia. México, 122, 20-48.

Mariño, I. y Enríquez, C., 2010, Estudios batimétricos y de calidad de agua de lagunas costeras de Yucatán, Laboratorio de Procesos Costeros y Oceanografía Física, Departamento de Recursos del Mar, CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Reporte FOMIX-Yucatán 066254, 119 p.

Maskrey, A., 1999, Navegando entre bruma. La aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgo en América Latina, Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina, 295 p.

Mendoza, E.T y Jiménez, J., 2009, Regional geomorphic vulnerability analysis to storms for Catalan beaches, Proceedings of the Institution of Civil Engineering: Maritime Engineering, ICE, 162, 3, 127 –135.

Mendoza, E.T, 2001, Modelo de Riesgo a la erosión costera por oleaje de tormenta: Caso estudio Playas de Rosarito, Baja California México. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera, Universidad Autónoma de Baja California, México, 89 p.

Mendoza, E.T. y Jiménez, J., 2008, Clasificación de tormentas costeras para el litoral catalán (Mediterráneo NO), Ingeniería Hidráulica en México, 23, 21-32.

Mendoza, E.T., 2008, Coastal Vulnerability to Storms in the Catalan Coast, Tesis para obtener el grado de Doctor, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 192 p.

Mendoza, E.T., Jiménez, J.A. y Mateo, J. 2011 A coastal storms intensity scale for the Catalan sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.11, 9, 2453-2462.

Morales, J. y Pérez, J., 2007, Crecimiento poblacional e instrumentos para la regulación ambiental de los asentamientos humanos en los municipios costeros de México, Instituto Nacional de Ecología, México, <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/gacetas/497/gabrielyperez.html> (consultado 11 de mayo de 2012).

Naciones Unidas para el Socorro en Caso de Desastres UNDRO, 1979, *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*, Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Geneva. Nijkamp, P., Rietveld, P., 1990, *Managing Coastal Erosion*, National Academy Press, Washington D.C. 182 p.

National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, 2006, *Atlas de Riesgos Costeros*, [http://gcmd.nasa.gov/records/NOAA\\_NCDDC\\_CRA.html](http://gcmd.nasa.gov/records/NOAA_NCDDC_CRA.html), (consultado 19 de mayo de 2012).

National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA/ Coastal Services Center, 2012, <http://www.nhc.noaa.gov/climo/>, (consultado 9 de mayo de 2012).

Organización de las Naciones Unidas, (ONU), *Integrated and coordinated implementation and follow-up of major, United Nations conferences and summits*. Nueva York, Estados Unidos de América, 10 y 11 de mayo de 1999, p. 18, [www.un.org/documents/ecosoc/docs/1999/e1999-11](http://www.un.org/documents/ecosoc/docs/1999/e1999-11) (consultado 16 de mayo de 2012).

Organización Panamericana de la Salud OPS, 2003, *Fenómenos Naturales*, <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cursouni/MFOfennat.pdf>, (consultado 27 de septiembre de 2011).

Osorio, A. y Álvarez, O., 2012, *Ingeniería de Puertos y Costa*, <http://www.oceanicos.unalmed.edu.co/cursos/ingCostas/index.htm> (consultado 26 de abril de 2012).

Padilla, L., 2000, *La población en la región costera de México en la segunda mitad del siglo XX*, *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 41, 81-95.

Palacio, A., 2004, *Riesgos naturales y susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes* Aplicación de SIG en la costa baja acumulativa del

suroeste de Campeche, Centro EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche, 287-306.

PAP/RAC.ICZM Protocol in the Mediterranean, 2007, <http://www.pap-thecoastcentre.org/razno/PROTOCOL%20ENG%20IN%20FINAL%20FORMAT.pdf>, (consultado 28 de noviembre de 2011).

Petróleos Mexicanos (PEMEX), 2008, <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=71&catID=11947&contentID=18212>, (consultado 22 de marzo de 2012).

Phleger, F., 1969, Some general features of coastal lagoons, en Memorias Simposio Internacional Lagunas Costeras, UNAM-UNESCO, México, 5-26.

Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2010, <http://www.pnud.org.mx>, (consultado 28 de septiembre de 2011).

Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente POETCY, 2006, <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/>, (consultado 19 de mayo de 2012).

Rey, W., 2012, Evaluación Hidrodinámica y modelación numérica de la laguna de La Carbonera, Yucatán, Tesis para obtener grado de Maestro, Universidad Autónoma de Yucatán, México, 109 p.

Roberts, T. M., Wang, P., y Kraus, N. C., 2010, Limits of Wave Runup and corresponding Beach-Profile Change from Large Scale Laboratory Data, Journal of Coastal Research, 26, 184-198.

Rosengaus, M., Jiménez, M. y Vásquez, M., 2002, Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación, México. 108 p.

Saffir, H., 1973, The Military Engineer; y Simpson, R., 1974, Weatherwise, <http://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws.pdf>, (consultado 24 de mayo de 2012).

Salas, I., Pérez, R., García, O., Rodríguez, C. y Pérez, A., 1998, Mapa de peligro pos surgencia de ciclones tropicales, [http://www.met.inf.cu/sometcuba/boletin/v04\\_n01/espanol/art1.htm](http://www.met.inf.cu/sometcuba/boletin/v04_n01/espanol/art1.htm) (consultado 15 de abril de 2012).

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2006, <http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/Documents/document>



[os%20ordenamiento/estrategia\\_nacional\\_oe\\_mares\\_costas.pdf](#), (consultado 28 de septiembre de 2011).

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2008, <http://www.semarnat.gob.mx>, (consultado 28 de septiembre de 2011).

Servicio Meteorológico Nacional, México SMN, 2010, <http://smn.cna.gob.mx>, (consultado 2 de junio de 2012).

Servicio Meteorológico Nacional, México SMN, 2012, <http://smn.cna.gob.mx>, (consultado 8 de mayo de 2012).

Shore Protection Manual, 1984, Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, <http://es.scribd.com/doc/60908177/SPM-Vol-1> (consultado 13 de abril de 2012).

Short, A.D., 1996, The role of wave height, period, slope, tide range and embaymentisation in beach classification: A review. *Revista Chilena de Historia natural* 69:586-604.

Sistema Nacional de Protección Civil, 2002, <http://www.proteccioncivil.gob.mx>, (consultado 1 de junio de 2012).

Stockdon, H.F., Holman, R.A. Howd, P.A. y Sallenger Jr., 2006, Empirical parameterization of setup, swash, and runup, *Coastal Engineering*, 53, 573-588.

Swiss Reinsurance Company Swiss Re, [http://media.swissre.com/documents/sigma2\\_2012\\_en.pdf](http://media.swissre.com/documents/sigma2_2012_en.pdf), (consultado 26 de abril de 2012).

US Army Corp of Engineers, <http://frf.usace.army.mil/>, (consultado 22 de mayo de 2012).

Valle, A., Mariño, I., Enriquez, C. y Waterhouse, A., 2011, Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point source submarine groundwater discharges into the coastal ocean, *Limnology and Oceanography*, 56(4): 1213–1224.

Valles, J., Serrano, J., Beltrán, H., Cerón, R. y Escobar, E., 2012, Evaluación de marea de tormenta o surgencia, <http://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/estudios/surgencia/> (consultado 13 de abril de 2012).

Van der Meer, J. y Janssen, W., 1995, Wave run-up and wave overtopping at dikes, in: Wave forces on inclined and vertical wall structures, Kobayashi, N. and Demirebilek, Z., ASCE, 1–27 p.

Vega, C., Hernández, M. y De La Cruzagüero, G., 1997, Los Peces de la Reserva de Celestún, PRONATURA y CINVESTAV-Mérida, México.

Vergara, M., 2011, Zonas y procesos costeros, Instituto Politécnico Nacional, México, 362 p.

Vidal, C., Losada, M. y Medina, R., 1995, Modelos de morfodinámica de playas, <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/3718/1/article4.pdf> (consultado 13 de abril de 2012).

Wright, L., y Short, A., 1984, Morphodynamics variability of surf zones and beaches, *Marine Geology*, 56, 93-118.

# Anexo

## Figuras

Grain Size		Descriptive term	
phi	mm		
-10	1024	Very Large	Boulder
-9	512	Large	
-8	256	Medium	
-7	128	Small	
-6	64	Very small	
-5	32	Very coarse	Gravel
-4	16	Coarse	
-3	8	Medium	
-2	4	Fine	
-1	2	Very fine	
0	1	Very coarse	Sand
1	microns 500	Coarse	
2	250	Medium	
3	125	Fine	
4	63	Very fine	
5	31	Very coarse	Silt
6	16	Coarse	
7	8	Medium	
8	4	Fine	
9	2	Very fine	
		Clay	

Figura 56. Escala del tamaño de grano modificado por Udden (1914) y Wentworth (1922).

## Ecuaciones

### Método de momentos

$$\bar{x} = \exp \frac{\sum f \ln m_m}{100} \quad \text{Ecuación 27.}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f (m_m - \bar{x})^2}{100}} \quad \text{Ecuación 28.}$$

donde:

$\bar{x}$  = Media

$f$  = Frecuencia en porcentaje

$m_m$  = Intervalo en el sistema métrico

$\sigma$  = Desviación estándar

Método de Folk y Ward (1957)

$$\bar{x} = \exp \frac{\ln P_{16} + \ln P_{50} + \ln P_{84}}{3} \quad \text{Ecuación 29.}$$

$$\sigma = \exp \left( \frac{\ln P_{16} - \ln P_{84}}{4} + \frac{\ln P_5 - \ln P_{95}}{6.6} \right) \quad \text{Ecuación 30.}$$

donde:

$P$  = Diámetro de grano

Tablas

Tabla 4. Coordenadas de los nodos de donde se han tomado los datos de oleaje de tormenta.

Nodo	Latitud (°)	Longitud (°)
Celestún	21.044086	-90.584277
Hunucmá	21.290851	-90.078686
Progreso	21.414639	-89.671212
Yobaín	21.515472	-89.132347
Río Lagartos	21.742703	-88.117881
Tizimín	21.655712	-87.708147

Tabla 5. Coordenadas de los 26 sitios de muestreo en la zona costera del Estado de Yucatán.

<b>ID</b>	<b>Punto</b>	<b>Orientación de playa (°)</b>	<b>Comunidad</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Longitud (°)</b>
1	Tizimín A	13	El Cuyo	21.515952	-87.669309
2	Tizimín B	16	El Cuyo Oeste	21.531473	-87.744167
3	RiaLag A	24	Río Lagartos Este	21.564815	-87.845550
4	RiaLag B	6	Las Coloradas	21.610288	-87.987509
5	RiaLag C	6	Río Lagartos Barra	21.623037	-88.118929
6	RiaLag D	337	Río Lagartos Playa	21.615984	-88.166966
7	San Felipe	330	San Felipe Playa	21.599568	-88.199916
8	Dzilam A	348	Dzilam de Bravo	21.390809	-88.905262
9	Dzidzantún	352	Santa Clara	21.374598	-89.012730
10	Yobaín	356	Chabihau	21.357380	-89.118817
11	Sinanché	356	San Crisanto	21.354644	-89.170529
12	Telchac A	358	Telchac Puerto	21.344223	-89.261214
13	Telchac B	359	CINVESTAV Telchac	21.342311	-89.302894
14	Dzemul/Ixil	352	San Benito	21.322899	-89.449279
15	Progreso A	355	Chicxulub Este	21.315806	-89.501238
16	Progreso B	341	Chicxulub	21.303923	-89.563356
17	Progreso C	356	Progreso Malecón	21.289029	-89.654656
18	Playón	356	Playón	21.282768	-89.684051
19	Progreso D	346	Chelem	21.277880	-89.713087
20	Hunucmá A	338	Bocana	21.236536	-89.881705
21	Hunucmá B	352	Sisal	21.164677	-90.037096
22	Hunucmá C	315	Punta Piedra	21.150733	-90.100442
23	Celestún A	326	Faro Celestún	21.049151	-90.274133
24	Celestún B	287	Hotel Eco-Paraíso	20.933233	-90.374297
25	Celestún C	294	Celestún Pueblo	20.860968	-90.400306
26	Celestún D	308	Celestún Puerto	20.849052	-90.404836