



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**Maestría en Ingeniería (Ingeniería Civil)**

**ESTUDIO DE OBRAS DE PROTECCIÓN  
COSTERA. CASO MÉXICO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

**RAÚL GONZÁLEZ AVILÉS**

TUTOR:

DR. PEDRO GUIDO ALDANA, INSTITUTO MEXICANO DE  
TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA)

Cuernavaca, Morelos abril del 2013

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa

Secretario: Dr. Octavio Ramón Salazar San Andrés

Vocal: Dr. Pedro Guido Aldana

1er.Suplente: M.I. Pino Durán Escamilla

2do. Suplente: Dr. Carlos Escalante Sandoval

Lugar donde se realizó la tesis:

Cuernavaca, Morelos, UNAM, Campus Morelos

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Pedro Guido Aldana

-----  
FIRMA

*A mis padres:*

*Tec. Raúl González Torres*

*Enfermera. Jovita Avilés Paredes*

*Porque gracias a la dedicación, a su apoyo, a los consejos y a la responsabilidad de inculcarme la cultura del estudio para alcanzar mis propósitos y metas, para ellos mi agradecimientos total de todo corazón.*

*A mis hermanas*

*Leticia González Avilés*

*Ma. Elizabeth González Avilés*

*Por los buenos consejos y ser un claro ejemplo de responsabilidad y deseo de superación.*

## Agradecimientos

A todas las personas con quien conviví en estos años y me dejaron muy buenos recuerdos, con quienes intercambiamos ideas y desarrollamos un crecimiento profesional y personal.

A los excelentes docentes quienes me impartieron consejos tanto académicos como vivencias personales en las aulas de clase, para un mejor desarrollo en nuestra vida, dejándome como propiedad el deseo de la superación en el ámbito académico y personal. Al Dr. Pedro Guido Aldana quien confió y me brindó las facilidades en el desarrollo de este documento.

Mi gratitud para el personal de la DEDFI- UNAM campus Morelos por todas las atenciones recibidas.

Agradezco al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por darme la oportunidad de realizar un importante logro en mi carrera profesional.

A mis compañeros y amigos de aulas en lo personal para Arturo López Zúñiga, Rafael Briseño, Rodrigo Santos, Eugenia Maya, Misael Alcaraz, con quienes me apoye y me hicieron más amena la estancia en esta parte del camino.

## OBJETIVOS

1. Estudiar la situación de algunas playas / sectores costeros del mundo y en particular de México
2. Conocer los diferentes procesos costeros que inciden en la formación y estabilidad de las playas
3. Hacer una revisión de las diferentes alternativas de protección costera conocidas en la fecha, remarcando las más prometedoras en cuanto a efectividad – costo para la recuperación y estabilidad de las playas
4. Realizar un estudio de caso en México
5. Conocer los retos que existen en la actualidad en relación con la conservación de las playas, en particular las de México



**INDICE GENERAL**

**INDICE GENERAL..... VII**

**CAPÍTULO I MARCO DE REFERENCIA ..... 1**

**1.1 Introducción .....1**

**1.1.1 Breviario del contenido (marco teórico) ..... 1**

**1.1.2 Historia (cronología de protecciones costeras y sus usos) ..... 2**

1.1.2.1 El periodo de los romanos .....3

1.1.2.2 Época Moderna..... 3

1.1.2.3 El Desarrollo Tecnológico..... 4

**1.2 Impacto del cambio climático sobre la estabilidad de las playas en el mundo y en México.....5**

**1.2.1 Introducción..... 5**

**1.2.2 Principales afectaciones ..... 6**

**1.2.3 Evaluación económica y ambiental ..... 7**

**1.2.4 Planteamiento de programas (Capacitación, educación y estrategias) para el soporte costero ..... 9**

**1.2.5 Efectos del cambio climático en México ..... 10**

1.2.5.1 Información general golfo de México ..... 10

1.2.5.2 Economía del turismo ..... 12

1.2.5.3 El desarrollo costero y estructuras de protección de la costa ..... 12

**1.3 Impacto Medioambiental de la Erosión Costera ..... 13**

**1.3.1 Inicio de erosión costera ..... 13**

**1.3.2 Variación de erosión costera ..... 14**

**1.3.3 La erosión costera frente al cambio climático ..... 15**

**1.4 Situación de las playas y su manejo en algunos países del mundo en México .....16**

**1.4.1 Situación y consideraciones ..... 16**

**1.5 El futuro del manejo costero en México .....18**

**1.6 Proyectos de recuperación de playas desarrollados en México.....19**

**1.6.1 Las costas como activos de la nación, usufructo de un medio ambiente frágil..... 19**

**1.6.2 Nuevos escenarios medioambientales, desarrollo sí, pero sostenible ..... 21**

**1.6.3 Soluciones mixtas ..... 22**

**1.6.4 Modelación antes de construcción, Instrumentación y monitoreo remoto..... 23**

**CAPÍTULO II. PROCESOS COSTEROS..... 25**

**2.1 Introducción .....25**

**2.2 Origen de las Playas .....26**

<b>2.3 El clima marino .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4. Procesos sedimentarios .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.1. Sedimentos en suspensión.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.2. Transporte de sedimentos. ....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.3. Depósito del sedimento. ....</b>	<b>34</b>
<b>2.5. Procesos del oleaje .....</b>	<b>34</b>
<b>2.5.1. Teoría de ondas. ....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.2. Clasificación del oleaje. ....</b>	<b>37</b>
<b>2.5.3. Medición del oleaje.....</b>	<b>39</b>
<b>2.6. Mareas y su influencia .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7. Otros procesos Oceanográficos.....</b>	<b>42</b>
<b>2.7.1. Corrientes oceánicas. ....</b>	<b>42</b>
<b>2.7.2. Circulación atmosférica.....</b>	<b>43</b>
<b>2.7.3. Presión atmosférica.....</b>	<b>44</b>
<b>2.7.4. Viento.....</b>	<b>45</b>
<b>2.7.5. Tormentas y eventos extremos. ....</b>	<b>46</b>
<b>CAPÍTULO III OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Revisión de los criterios de diseño .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.1 Revestimientos .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.2 Diques.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.3 Muros .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.4 Tablestaca .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.5 Dren de playas .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.6 Estructuras perpendiculares a la playa.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.7 Espigones .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.8 Estructuras separadas de la playa .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.9 Rompeolas sumergidos .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.10 Geotextiles.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.11 Dunas.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.12 Mediante empalizadas .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.13 Sedimentaciones en zonas costeras. ....</b>	<b>52</b>
<b>3.2 Propuesta de estructuras de protección costera.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.1. Colocación de rompeolas sumergidos, segmentados y paralelos a la línea de costa .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.1.1 Criterios de diseño.....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.2 Regeneración de playas. ....</b>	<b>58</b>
<b>3.2.2.1 Criterios de diseño.....</b>	<b>58</b>
<b>3.2.2.2 Funcionamiento dinámico .....</b>	<b>59</b>



---

3.2.2.3 Características de proyecto.....	60
3.2.2.4 Diseño de la forma del perfil.....	60
<b>3.2.3 Construcción y restauración de dunas .....</b>	<b>61</b>
3.2.3.1 El sistema dunar de la playa: Funciones, valores y limitaciones .....	62
3.2.3.2 Criterios de diseño .....	66
<b>CAPÍTULO IV ESTUDIO DE CASO PLAYA CANCÚN Y LA RIVIERA MAYA.....</b>	<b>70</b>
<b>4.1. Introducción .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2. Antecedentes .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3 Problemática .....</b>	<b>73</b>
<b>4.4 Estudios y propuestas .....</b>	<b>73</b>
4.4.1 Comisión Federal de Electricidad - CFE.....	73
4.4.2 Instituto de Ingeniería – UNAM.....	77
<b>4.5 Acciones realizadas, situación actual y necesidades de las playas de Cancún y la Riviera Maya.....</b>	<b>89</b>
<b>4.5.1 Acciones realizadas en Cancún y la Riviera Maya .....</b>	<b>89</b>
<b>4.5.2 Situación actual y necesidades de Cancún .....</b>	<b>90</b>
<b>4.5.3 Situación actual y necesidades de las Playas de la Riviera Maya</b>	<b>91</b>
<b>4.5.4 Situación actual y necesidades de la Isla de Cozumel.....</b>	<b>92</b>
<b>4.6 Proyecto de restauración y recuperación de la zona federal Marítimo terrestre de Cancún, Playas del Carmen y Cozumel .....</b>	<b>93</b>
<b>4.6.1 Actividades de Dragado .....</b>	<b>93</b>
4.6.1.1 Componentes del aire .....	102
4.6.1.2 Sustrato costero arenoso .....	102
4.6.1.3 Componentes agua, flora y fauna .....	103
4.6.1.4 Componentes factor social.....	110
<b>4.7. Alternativas de solución .....</b>	<b>111</b>
<b>4.7.1 En el corto plazo .....</b>	<b>111</b>
<b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES.....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXOS DE FIGURAS .....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXOS DE TABLAS.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS DE GRÁFICAS.....</b>	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>119</b>

## CAPÍTULO I MARCO DE REFERENCIA

### 1.1 Introducción

#### 1.1.1 Breviario del contenido (marco teórico)

Algunas décadas atrás el ser humano tuvo la necesidad de manipular algunos medios de transporte para su beneficio, principalmente para su desplazamiento individual de una zona a otra, recolección de comida o transporte de carga, aprendió a utilizar herramientas para cumplir sus propósitos. De los medios más utilizados para moverse fue sobre superficies de agua, utilizando aéreas de refugio de sus embarcaciones, algunas de ellas conocidas hoy en día como “**costas**” a esta actividad se le ha denominado navegación marítima, que es una de las más antiguas y la cual fue un paso primordial para el desarrollo y la cultura de todas las civilizaciones del mundo. Durante esta época no había gran desarrollo tecnológico enfocado a esta área, por lo cual el proceso de construcción de los puertos, espigones, la manipulación de mercancía fue elaborado y realizados a mano.

Debido a desastres naturales y a la caída de imperios, algunos de estos puertos antiguos han desaparecido, de las que persisten todavía son estudiadas por algunos arqueólogos en las cuales se han concentrado obras de protección como rompeolas (Ver Fig.1.1 Rompeolas Antiguo), que son algunas de las características que se pueden observar en los puertos modernos.



Fig. 1.1 Rompeolas Antiguo Fuente: Imágenes de Internet google

Algunas de estas obras se formaron con el tiempo y su geografía aporta una protección natural en costas o bahías, los rompeolas se han añadido para complementar la protección requeridas por los hombres en las diferentes zonas de embarcación y para acceso al agua potable en algunos casos.

Antiguos puertos se pueden dividir en tres grupos de acuerdo a sus patrones estructurales y el desarrollo de habilidades de ingeniería (Frost, 1963):

1. Los primeros fueron cortadas de roca, en que las características naturales como los arrecifes de mar adentro se han adaptado para dar refugio a las embarcaciones anclados.
2. En el segundo grupo, las paredes verticales se construyeron en agua poco profunda conveniente para servir como rompeolas y los lunares. Puertos de este tipo fueron en bahías protegidas, y muchas veces las paredes relacionado con las defensas de una ciudad amurallada (por ejemplo, la antigua Tiro, en la costa del Líbano). A menudo, estas cuencas se puede cerrar al tráfico el uso de cadenas para impedir la entrada de las naves enemigas (Franco, 1996). c.
3. El tercer grupo eran los puertos que se han impuesto incluso en las costas poco prometedor por el uso de innovaciones romanos como el arco y el cemento hidráulico mejorado. Proyectos como éste requiere de los recursos de ingeniería, construcción y financiación de un gran imperio.

Todos los puertos antiguos tenían una cosa en común: tenían que estar libres de sedimentos. Esto se logró por diversos medios. Uno de ellos fue por el diseño de las partes exteriores del puerto para que desviara las corrientes de rodamiento de sedimentos. La segunda fue al permitir un control que la corriente fluya a través del puerto o lavándolo cuando sea necesario por medio de canales. Por ejemplo, en Sidón, una serie de tanques (como piscinas) fueron cortados en el lado del puerto de un arrecife de roca natural. Los tanques llenos de agua clara que se llevó a cabo en el lugar con compuertas. Cuando las puertas se abrieron, las corrientes de agua clara limpiarían el interior del puerto. Pruebas documentales y arqueológicas demuestran que ambos Tiro y Sidón fueron florecientes y los puertos de gran alcance de la Edad de Bronce hasta la época romana y por lo tanto debe haber sido limpios de sedimentos más de mil años (Frost, 1963). Otro método de prevención de limo consistía en desviar los ríos a través de canales de modo que durante una parte o la mayor parte del año, el flujo se adentra en el mar en lugar bien lejos del puerto.

#### 1.1.2 Historia (cronología de protecciones costeras y sus usos)

Los orígenes de algunas construcciones sobre obras de protección se registran a través de la historia en la época de los egipcios que construyeron espigones en el río Nilo en la pirámide de (Zoser) 2500 años a.c.

El Minoico que fue una civilización de la edad de cobre y bronce ubicada al sureste de Austria, construyeron un rompeolas en Nirou Khani en Creta 1500.a.c fue una estructura pequeña construida de material extraído de canteras. La historia muestra espigones construidos en China, pero por lo general en una fecha posterior. Existe la posibilidad de que el puerto más sofisticado realizado artificialmente fue el de Alejandría en Egipto construida en la isla Pharos alrededor de 1800 .a.c por los Minoicos fue construida para albergar cerca de 400 embarcaciones de 35mts de longitud.

Durante el periodo de Alejandro el Magno y sus sustitutos reconstruyeron este puerto durante (1300-100 a.c) a una escala monumental. La isla Pharos fue unida al continente por un dique de aproximadamente 1,5 km con dos aberturas que divide dos cuencas con una superficie de 368 hectáreas (910 acres) y 15 km de frente de muelle. Dentro de las maravillas antiguas del mundo se encuentra el faro de Alejandría que es una torre de 130 metros de altura para guiar los barcos en las costas de rasgos en el puerto de 50 km de mar, dentro de las estatus de los griegos se encuentran estructuras colosales una de las más conocidas es el coloso de 30mts de altura de Rodas que está situado en la cabeza del rompeolas. Tres

torres de molino de viento antiguos que aún sobreviven en el malecón de Rodas (Franco, 1996). (Ver Fig. 1.2 Coloso de rodas siglo IV A.C) Frost (1963) señala que los griegos habían utilizado el cemento hidráulico mucho antes de los romanos.



Fig. 1.2 Coloso de rodas siglo IV A.C. Fuente: Imágenes de Internet google

#### 1.1.2.1 El periodo de los romanos

Los romanos realizaron innovaciones en cuanto a la construcción de puertos, ya que aprendieron a construir muros sólidos y diques submarinos para la protección, a los romanos se les atribuye el descubrimiento de cemento hidráulico hecho de cenizas puzolánicas obtenidas de la región volcánica cerca de Nápoles que se endurece bajo el agua. Frost (1963) señala que los griegos habían utilizado el cemento hidráulico mucho antes de los romanos.

Los romanos cambiaron estructuras hechas por los griegos con muros de hormigón vertical y compuesto, este tipo de construcciones son más rápidas de hacer y requieren poco mantenimiento, su utilización era la protección contra el oleaje, evitar la sedimentación o la erosión, algunas herramientas que desarrollaron los romanos son las grúas y los martinetes, este equipo fue ampliamente utilizado en la construcción, una mejora tecnológica de esto son las dragas. Durante este periodo de los romanos y el desarrollo de la civilización se fue introduciendo el concepto de vacaciones en zonas costeras, era para una población de estándares de vida relativamente altos donde la gente era económicamente y socialmente establecida en una élite

Durante quinientos años, la ciudad sibarita de Bayas reinado como el mayor complejo de playa de moda del mundo antiguo.

#### 1.1.2.2 Época Moderna

Después de la caída del Imperio Romano de Occidente, el desarrollo estuvo presente en gran parte de Europa, durante la amenaza de guerra gran parte de los puertos y costas fueron abandonados, una de las pocas zonas costeras que prevaleció y siguió en desarrollo fue la laguna de Venecia aquí se realizaron obras de protección costera, que van desde la el uso de leña de mimbre para reforzar las dunas de pilotes de madera y piedras. En algunas partes del mundo como en Inglaterra las obras de protección costeras se enfocaron en el peligro de las inundaciones. Tomando como ejemplo a los romanos en Medway quienes

construyeron muros de contención como defensa contra el mar esta obra estuvo en uso hasta el siglo 18 (Palmer y Tritton 1996). En la Edad Media, la Iglesia se convirtió en fundamental en la recuperación y la protección de muchos pantanos. En 1225, Enrique III, constituido por la Carta de un grupo de personas para hacer frente a la cuestión de drenaje (Keay 1942).

Bizancio fue una ciudad griega, capital de Tracia, situada a la entrada del estrecho del Bósforo, sobre una parte de la actual ciudad de Estambul, y que ha ocupado un lugar destacado en la historia desde su fundación, fue refundada por el emperador Constantino I el Grande en 330, y renombrada Constantinopla, se había convertido en una potencia marítima. Los muelles de mármol alineado frente al mar, por el que pasaba las especias, pieles, madera, grano, y los tesoros de un imperio. Una gran cadena podía ser tirado a través de la boca del Cuerno de Oro para evitar la intrusión de las flotas enemigas. Una serie de torres de vigilancia extendida a lo largo del Mar de Mármara, Bósforo, y la costa sur del Mar Negro, y el enfoque de una flota enemiga podría ser una señal al emperador en cuestión de horas por un código ingenioso uso de espejos en el día y señales de fuego por la noche (Lamb 1930). Aproximadamente entre el siglo XV-XVI fue el renacimiento científico y tecnológico realizando estudios de ingeniería costera, la escuela italiana de Hidráulica fue el primero en formarse y el único que existe antes de mediados del siglo 17" (Rouse y Ince, 1963). Leonardo da Vinci (1465-1519), con su conocido método experimental, basado en la observación sistemática de los fenómenos naturales mediante un razonamiento intelectual y una intuición creativa, puede ser considerado el precursor de la hidrodinámica, ofreciendo ideas y soluciones a menudo más de tres siglos antes de su aceptación común, fue probablemente el primero en describir y poner a prueba varias técnicas experimentales empleadas actualmente en los laboratorios de hidráulica más moderna.

La variedad de problemas de cinemática hidráulica tratados en los cuadernos de Da Vinci es tan basta que no es posible enumerar a todos en esta introducción. En los 36 folios (hojas) del Códice Leicester (1510), describe la mayoría de los fenómenos relacionados con la hidráulica marítima. Richter (1970) ofrece una traducción al Inglés de los cuadernos de Leonardo da Vinci (Franco, 1996). Las ideas científicas del Renacimiento italiano pronto se trasladaron más allá de los confines de ese país, a los países europeos al norte de los Alpes.

### 1.1.2.3 El Desarrollo Tecnológico

Después del desarrollo y toda la aportación que surgió de la época romana, la construcción y las navegaciones en los puertos se hicieron más comunes en el mundo, por medio de esto se empezó a implementar el conocimiento científico, un ejemplo de esto es "G'enie" oficiales, que, junto con sus tareas militares, también fueron encargados de las obras públicas civiles, según se informa a los antepasados directos de los modernos ingenieros civiles. S'ebastien le Prestre de Vauban (1633-1707). Fue un constructor de numerosas fortalezas y perfeccionó el sistema de fortificaciones en forma poligonal y la estrella. Aparte de la construcción de varias fortalezas, hubo gran puerto y las construcciones costeras, incluyendo la excavación de canales y dársenas, la construcción de dos muelles de largo que flanquean la entrada del canal, y la construcción de almacenes y talleres. Un gran cerradura, una obra maestra de la ingeniería civil, construida a la entrada del puerto interior. Vauban diseñó y supervisó la construcción de las esclusas. Por desgracia, no más de 30 años después de su finalización, la fortaleza fue destruida como consecuencia de la Guerra de Sucesión española. Proyectos de Vauban son un buen ejemplo de los métodos de la ingeniería. Fue durante este tiempo que el término "Ingenieur" fue utilizado por primera vez en Francia, como un título

profesional de un técnico científicamente capacitado en el servicio público. En Inglaterra en la revolución industrial abrió paso al carro y la barcaza, estos senderos que con anterioridad habían sido sinuosos y polvorientos se transformaron en caminos duros, la energía de vapor permitió que la industria la exportación de productos manufacturados.

En la llegada del siglo XVIII y XIX los avances en la navegación, el estudio de las matemáticas, la expansión de nuevas rutas. Han llevado a las civilizaciones a la creación de mega estructuras como buques y obras marinas. Ahora en el siglo XX es momento de reflexionar y hacer una revisión de lo que se ha hecho, lo que ha servido en nuestra sociedad y lo que hemos afectado en nuestro entorno. En esta tesis se hablara de nuestras playas y como la erosión costera un fenómeno natural originado por la interacción de los procesos climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentación con la morfología costera y con la batimetría del fondo de la zona cercana a la costa, lo que ocasiona es un retroceso de la línea de costa. El cambio climático es un factor que cada día toma mayor importancia dada la sobe elevación del nivel del mar y el incremento en la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales, entre otros. La problemática de la erosión de playas que se está presentando en diferentes países del mundo y en particular en México obedece a la combinación de estos complejos fenómenos naturales, así como también a las acciones a veces irresponsables del hombre en su afán por explotar los recursos naturales sin considerar las sustentabilidad de los mismos. Dentro de este contexto surge la necesidad de revisar las diferentes obras de protección costera propuesta a la fecha, formular mejoras así como también nuevas alternativas que permitan la conservación y el usufructo de las playas.

## **1.2 Impacto del cambio climático sobre la estabilidad de las playas en el mundo y en México**

### 1.2.1 Introducción

Desde hace algunas décadas se ha estado hablado sobre el calentamiento de la atmosfera, la afectación de este impacto se ha utilizado en ámbitos científicos, socioeconómicos y políticos. La afectación tanto global como el enfoque a México será resentida en la agricultura de temporal, el agua disponible, la industria y las zonas costeras.

Podríamos definir el clima de un lugar como el conjunto de manifestaciones atmosféricas y meteorológicas que en el sucedes. El clima define nuestros elementos y factores condicionantes del medio ambiente, por lo que ambos están íntimamente ligados (Seoánez 2002). Los elementos utilizados para el estudio del clima se denominan elementos climatológicos: radiación solar e irradiación terrestre, la temperatura, la humedad del aire, el viento, las nubes, las precipitaciones, los fenómenos luminosos de la atmosfera, la electricidad del aire y las radiaciones cósmicas que llagan hasta la superficie del nuestro planeta (monografías). Los factores climatológicos son características fijas que determinan el clima de un lugar. Conviene recordar que la causa fundamental del tiempo atmosférico es la posición relativa de a tierra respecto al sol. Entonces la latitud es definitiva para determina el ángulo de incidencia de la radiación solar haciendo que el calentamiento de la superficie de la tierra sea mayor o menor.

La modificación de nuestros climas es sin duda la cultura que actualmente domina ya que la humanidad quiere alcanzar el mayor desarrollo en todos los sentidos. Como dice (Duarte 2006) el calentamiento

global es una realidad en la que ya estamos inmersos y su consideración como especulación o como un proceso a futuro aun por llegar solo puede retardar la adopción de medidas de adaptación y mitigación y, con ello, agrava los impactos de este importante problema.

1.2.2 Principales afectaciones

En los últimos 4600 mil millones de años se han presentado aproximadamente 20 indicios de cambio climático; estos han tenido lugar en escalas de tiempo de 4000 años, en la actualidad se ha dado en un periodo de 200 años. Cabe mencionar que los modelos climáticos(ver Grafica 1.1 MODELOS CLIMATOLÓGICOS, ANOMALÍAS DE LA TEMPERATURA, AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR Y EXTENSIÓN DE LA CUBIERTA DE HIELO) nos dan solo un parte de la visión y la rapidez con la cual en este lapso de tiempo se ha acelerado la transformación del medio en el planeta y la repercusión de este hacia nuestra vida diaria, un claro ejemplo es que 1983 el explorador noruego Fridtjof Nansen navego en un barco anclado al hielo y arrastrado por las corrientes de hielo, en el Ártico de Siberia hacia Groenlandia, durando este viaje 2 años. Hoy en día se puede navegar en verano hasta la latitud del polo norte por aguas sin hielo (Ruiz de Elvira 2007).Ver tabla 1.1 Factores del cambio climático.

FACTORES DEL CAMBIO CLIMÁTICO		
Factores naturales	Cambio en la radicación solar	La cantidad de energía emitida por el sol no es constante, la luminosidad del sol varia con una periodicidad aproximada de 11años, y en ciclos de 100 años
	Cambio en la órbita terrestre	Las variaciones en la geometría de la órbita de la tierra (variaciones de Millankovich), determina donde y cuando la tierra recibe la mayor cantidad de energía solar, además de tener periodicidades que van de los miles a los cientos de miles de años causantes de la era de hielo o eras glaciales
	Efecto de invernadero	Proceso donde parte de la energía de onda larga emitida por la superficie terrestre es retenida por las nubes y los gases de invernadero. Los gases de invernadero encargados de mantener la temperatura de la tierra en un rango habitable.
	Aerosoles	Son partículas y gotas pequeñas que se mantienen en suspensión en la atmosfera. Los aerosoles reflejan y/o absorben de la radiación solar que recibe la tierra
Factores humano	Incremento en la concentración de gases de invernadero	Muchas actividades humanas (ganadería, agricultura, industria y otros) liberan gases de invernadero, dióxido de carbono y metano principalmente. El aumento en la concentración de dichos gases provoca un balance energético positivo responsable del incremento de la temperatura. Este efecto se conoce como <i>forzamiento antropogenico</i> .
	Cambio en el uso de suelo	La transformación o la situación de cobertura vegetal para asfalto o concreto a alterado la manera en que la tierra refleja la luz solar e irradia el calor afectando patrones regionales como la evaporación, la lluvia e infiltración del agua al subsuelo, a si como la distribución de la energía en el planeta
	Aerosoles	La industria y agricultura agregan una cantidad de aerosoles a la atmosfera que afectan el balance energético negativamente, ya que con el incremento de la concentración de aerosoles aumenta la cantidad de energía solar que es reflejada en el espacio

Tabla 1.1 Factores del cambio climático. Fuente: tesis de efectos del cambio climático en el escurrimiento natural superficial de la cuenca el sistema hidroeléctrico del rio Grijalva 2011



Una de las principales afectaciones del cambio climático está presente en la vegetación marina, después de una larga vida de evolución, ahora está siendo modificada en una forma más rápida, como resultado de las variaciones en las costas y su modificación de estas con estructuras artificiales y el crecimiento no controlado de población humana genera un impacto abrumador en conjunto, y como resultado obtenemos daño en el ecosistema y un desequilibrio de la costa. El primer acercamiento de daño es hacia la vegetación marina que proporciona una aportación clave a la ecología un ejemplo es; la explotación de carbono orgánico que se conoce como materia orgánica del suelo (MOS) a un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y / o vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo (Rosell, 1999).

Además, incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos (Aguilera, 2000). Uno de sus principales usos está relacionado con la sustentabilidad en los sistemas agrícolas como los cultivos y su rendimiento sostenido. Estas alteraciones de la biosfera trastorna la biodiversidad tanto de regiones tropicales como templadas creando modificaciones físicas, enfermedades, especies invasoras, la práctica de pesca comercial, la acuicultura, el sobre pastoreo, la proliferación de algas. La pérdida de estos pastos marinos ha dado lugar a una mayor conciencia de la necesidad de su protección, supervisión, gestión, restauración y reestructuración. La modificación de las praderas marinas alteran el flujo de agua, reciclaje de nutrientes, y la estructura de la cadena alimentaria (Hemminga y Duarte, 2000), ya que son una fuente importante de alimento para mega herbívoros como las tortugas marinas verdes, los dugongos y manatíes, y proporcionan un hábitat crítico para muchos animales, incluyendo el comercio y recreativa especies pesqueras importantes (figura 1; Beck et al 2001). Las praderas submarinas se han desarrollado adaptaciones únicas ecológicas, fisiológicas y morfológicas de una existencia completamente sumergida, incluido el transporte del gas, los cloroplastos epidérmica, la polinización de submarinos, y la dispersión del mar (den Hartog 1970, Les et al. 1997). La biodiversidad en las praderas de pastos marinos es mayor que en las áreas adyacentes sin vegetación, la fauna y la densidad son varios órdenes de magnitud más alta dentro de los prados (Hemminga y Duarte, 2000). También sirven como zona de cría, a menudo en estadios juveniles de especies económicamente importantes de peces y mariscos, aunque la especie varían según la región y el clima (figura 4;.. Beck et al 2001, Heck et al 2003). La proximidad de las praderas marinas de otros hábitats críticos, tales como marismas (en las regiones templadas) o los manglares y los arrecifes de coral (en las regiones tropicales), facilita la transferencia trófica y la utilización cruzada de hábitat por especies de peces e invertebrados (Beck et al. 2001). Esto proporciona un subsidio de energía que pueden ser esenciales para mantener la abundancia de algunas especies de arrecifes de coral (Valentine y Heck, 2005).

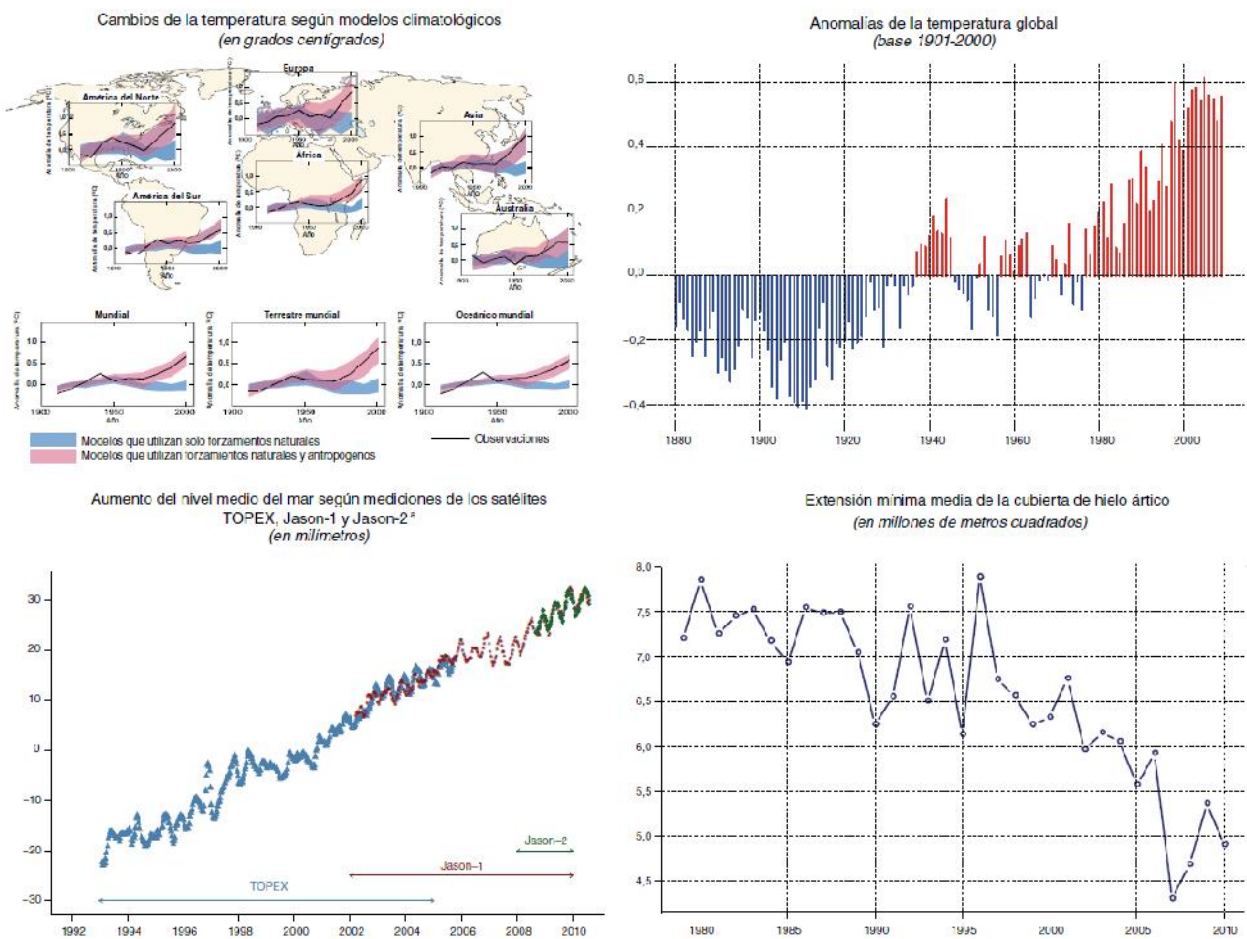
### 1.2.3 Evaluación económica y ambiental

Uno de los efectos permisibles es su afectación a sistemas hídricos y los ecosistemas acuáticos en las zonas costeras, se puede observar en la sobre elevación del nivel del mar. De acuerdo a estimaciones del IPCC (El panel intergubernamental del cambio climático), el mar incrementará su nivel entre 0.4 y 0.8 m sobre el valor de 1990, debido principalmente a la expansión.

A nivel de mar. Las instalaciones industriales o de generación eléctrica, localizadas en las costas, serán más vulnerables, al igual que las terminales de abastecimiento y la distribución de hidrocarburos y sus derivados, y la infraestructura de interconexiones con la misma ubicación sufrirá serios daños. Entre la diversidad ramas en la industria y su afectación por el clima puede clasificarse en los siguientes grupos.



- A) Industria que depende de recursos naturales sensibles al clima
- B) Industria cuyo proceso es directamente sensible al clima
  - a. Sector productor de energía
    - i. Central termo eléctrica
    - ii. Central hidroeléctrica
  - b. Sector productor de petróleo y gas
  - c. Industria de fundición y refinación metales
  - d. Industria alimentaria
  - e. Industria textil
- C) Industrias cuya localización es vulnerable ante cambio climático global
- D) Industrias cuyos mercados son sensibles al cambio climático global

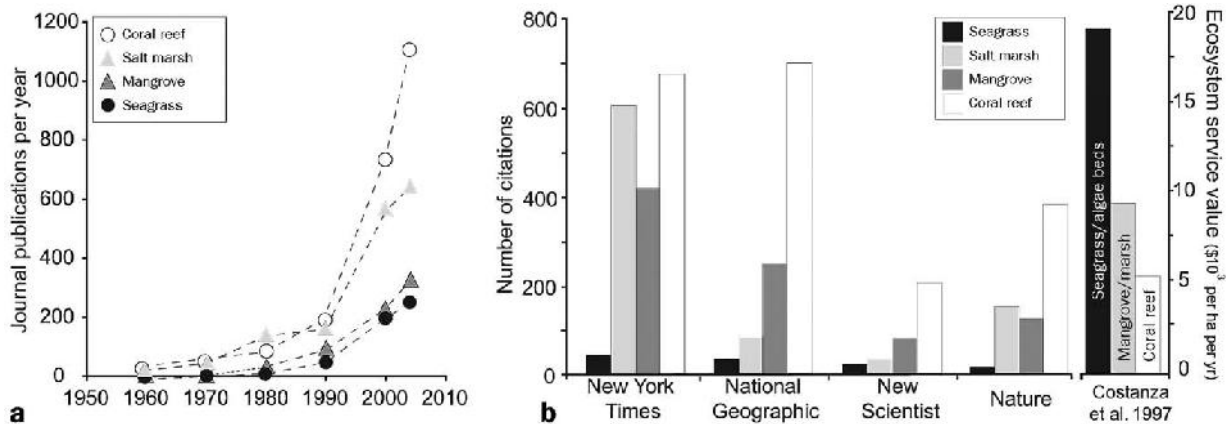


**Gráfica 1.1 MODELOS CLIMATOLÓGICOS, ANOMALÍAS DE LA TEMPERATURA, AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR Y EXTENSIÓN DE LA CUBIERTA DE HIELO.** Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), *Climate Change 2007 - The Physical Science*

1.2.4 Planteamiento de programas (Capacitación, educación y estrategias) para el soporte costero

Para poder hacer proyecciones cuantitativas del cambio climático futuro, es necesario utilizar modelos que realicen una simulación de los procesos importantes, que hagan una nueva dirección en la evolución futura del clima, el conjuntar los diferentes procesos es difícil, ya que con los estudios que se realizan se van anexando cada vez mas componentes, un ejemplo de esto es el azufre que representa emisiones de sustancias y la forma en que estas se oxidan para formar partículas de aerosoles.

Hay una necesidad que es crítica para esfuerzo de conservación dirigidos globales que incluye una reducción de nutrientes, controlar las aportaciones de sedimentos a los hábitats de pastos marinos y un programa específico educativo destinado a informar los reguladores al público y hacer conciencia del valor de las praderas. En respuesta a la perdida de pastos marinos se han implementado programas de conservación y protección que incluyen proyectos de restauración. Los retos actuales para las áreas administrativas es conservar los modelos de seguridad y el manejo de los planes, estos esfuerzo están siendo integrados en programas de gestión de calidad de agua y estudio de impacto ambiental en algunas zonas. La aplicación de la gestión esta basada en el fundamento del conocimiento marino desarrollado en cada una de esas áreas y están dirigidos a establecer normas de calidad del agua para conservar y restaurar los pastos marinos (Dennison et al. 1993, Coles y Fortes 2001, Kenworthy et al. 2006). En todo el mundo, el éxito del trasplante de pastos marinos y la restauración es de alrededor de 30% (Fonseca et al. 1998), aunque en algunas regiones más altas tasas de éxito han sido reportados (Green y Short, 2003). En el ámbito de la educación se ha mejorados la difusión de información ecológica. En la actualidad, nuestro conocimiento de la dinámica poblacional de los pastos marinos sigue siendo pobre para la mayoría de las especies y regiones (Kenworthy 2000). Como resultado, los esfuerzos de investigación será necesaria para guiar la restauración eficaz y preservar la diversidad genética (Williams, 2001). Durante estos últimos años los científicos han respondido a la necesidad de generar más información y contribuyendo a la productividad de los sistemas costeros y de estuarios todo esto se ha traducido en 100 veces más el número anual de artículos publicados aumentando el nivel de conciencia sobre la conservación y los resultados se muestran en los informes de medio de comunicación. Ver (Gráfica 1.2 Comparison of seagrass, salt marsh, mangrove, and coral reef habitats in terms of (a) journal publications )



**Gráfica 1.2 Comparison of seagrass, salt marsh, mangrove, and coral reef habitats in terms of (a) journal publications (Web of Science 1950–2006) and (b) citations in more broadly accessed media (Google and Web of Science), and estimated monetary value of ecosystem services provided by these habitats (Costanza et al. 1997).**

A pesar de la crisis que se enfrenta en este caso los pastos marinos, debido a la presión de las actividades humanas en las zonas de costas, así como los huracanes que podrían ser una afectación indirecta de estas actividades (calentamiento global). Estos ecosistemas ha experimentado cambios considerables en el nivel del mar, el CO<sub>2</sub> y las temperaturas en los últimos 100 millones de años, el nivel con el cual se adaptan es desconocido. Por el momento los científicos se han centrado en predecir futuros cambios en los océanos y los ecosistemas costeros de los grupos emblemáticos, es necesario hacer un cambio en base a todas las propuestas y simulaciones de escenarios hay que desarrollar mejoras, que pueda convivir e interactuar de la forma menos agresiva posible con estos sistemas, reorientar la forma en que se siguen haciendo las cosas un ejemplo sería hacer nuevas propuestas de protecciones costeras y no seguir con las mismas formas rígidas hay que determinar la forma más rentable de estos recursos, tanto para el medio como para la necesidad humana.

Existen grupos que desarrollan estrategias en torno al calentamiento global como: (IPCC), que fue creado en 1988 por la organización meteorológica mundial (OMM) y el programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA). Se trata de un grupo abierto a todos los miembros de las naciones unidas y de la organización meteorológica mundial.

La función del IPCC consisten analizar, de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus repercusiones factibles y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo. El IPCC no realiza investigaciones ni controla datos relativos al clima u otros parámetros pertinentes, presenta informes que sirven como pautas a seguir. (Pagina del IPCC)

Las decisiones de sobre la planificación de los recursos hídricos, el diseño, la construcción de nuevas estructuras hidráulica, así como la operación de presas y el suministro de agua depende tanto de las condiciones climáticas como de un adecuado manejo por parte de los operadores y administradores de los sistemas.

### 1.2.5 Efectos del cambio climático en México

En México los recursos naturales están sometidos a elevadas tasas de pérdidas de la biodiversidad, deforestación, erosión de suelos, desertificación, contaminación del agua y de la atmosfera. Y todo esto por el desmesurado y mal controlado asentamientos humanos, y actividades económicas totalmente inadecuadas respecto a la distribución de espacio de los recursos. Uno de los pilares comerciales y que brinda un tesoro natural al país de México es toda la zona costera del golfo.

#### 1.2.5.1 Información general golfo de México

El Golfo de México es un mar parcialmente sin litoral que se encuentra en el cuadrante sudeste del continente de América del Norte. México y Estados Unidos conforman un litoral continuo alrededor de la mayoría de los del Golfo que se extiende a más de 2.500 kilómetros de distancia (Britton & Martin, 1989). Un límite arbitrario entre el noreste de Yucatán y el extremo sur de la Florida define el límite sur y separa el Golfo de México y Mar Caribe. (Wikipedia)

Ecológicamente, la región es un ambiente subtropical rica y productiva que soporta extensos humedales y los hábitats marinos (Beck et al, 2000). En 1997, el valor comercial estimado de la cosecha de peces y mariscos del Golfo fue \$ 823 millones (NOAA, 1997). Geológicamente, la región se compone de bajos bancos de arena o pantanos que caracterizan a las regiones templadas y subtropicales del norte costas del golfo, con amplias barrera de islas, marismas, manglares y presente (Britton & Martin, 1989).

Existe un grupo de recuperación de de hábitat (GMP) El golfo de México (Fig. 1.3 Golfo de México) del programa, es una red de ciudadanos que está dedicada a la administración y protección de los recursos del golfo con el bienestar económico de la región. Su directriz esta en estados unidos USEPA agencia de protección ambiental dentro del tema ecológico en el golfo están:

1. Las cuencas hidrográficas
2. Salud publica
3. El enriquecimiento de nutrientes del hábitat, la degradación y la perdida
4. La introducción de especies no indígenas

El GMP incluye representantes estatales y federales sin fines de lucro, organizaciones, comunidad científica, la industria dentro de los estudios realizados se ha reconocido que los estuarios y los humedales costeros son vitales para proporcionar alimento y refugio para ciertas plantas y animales, mejorando la calidad del agua, proporcionando la filtración de sedimentos y control de inundaciones y la erosión. En 1999, el Equipo de las BPF Hábitat estableció el objetivo de restaurar, mejorar o proteger 20.000 hectáreas de importantes hábitats costeros y marinos en las zonas del Golfo de EE.UU. para el año 2009. El Equipo GMP Hábitat también ha desarrollado varios objetivos para apoyar este objetivo, incluyendo la producción de un estado actualizado de pastos marinos y el Informe de Tendencias. Toda esta información se genera en informes ayudando a los científicos y administradores desarrollar una mayor conciencia de la importancia del golfo a nivel mundial



Fig. 1.3 Golfo de México. Fuente: SeaWiFS Project, NASA //Goddard Centro de vuelo espacial, y ORBIMAGE

El golfo ha sido un sistema que ha evolucionado durante largos periodos, sin embargo con la modificación reciente del clima se ha afectado la calidad de los estuarios locales, manglares, y zonas costeras. Todos estos cambios se han realizados en periodos cortos. Las alteraciones pueden ser causadas por huracanes tropicales que se mueven através del golfo, estos impactos pueden ser intermitentes ya que algunos habitas se recuperan de forma natural pero algunos otros son acumulativos estos puntos son los que requieren medidas de corrección.

*¿Por qué son importantes praderas submarinas en el golfo?*

Pueden ser considerados una base de los ecosistemas costeros y de estuario, en el norte de la región del Golfo. Estas comunidades marinas proporcionan un hábitat valioso en las aguas que habitan, estabilizan los sedimentos costeros, reducen la energía del oleaje, y dan cobijo a una gran variedad de especies acuáticas juveniles y adultos. Además son apoyo importante de la pesca recreativa y comercial esencial para el desarrollo económico y el bienestar social de la región. Sin embargo el abuso de estos recursos afecta de manera directa el ecosistema marino.

Existen especies de gran tamaño como el manatí (*manatus Trichecus*), las tortugas verdes (*Chelonia mydas*) y delfines nariz de botella (*Tursiops truncatus*), se encuentran en los lechos de pastos marinos en toda la Región Norte del Golfo y su afectación de la pérdida vegetal marina es directa, los peses ubicados en el golfo son los tambores (*Sciaenidae*), la lubina (*Serranidae*), espáridos (*Sparidae*), roncós (*Haemulidae*), pargos (*Lutjanidae*) y mojarras (*Gerreidae*), varios de los peces grandes se utilizan de forma recreativa y comercial importante para la región, dentro de los mariscos la falta de alimento de especies más pequeñas repercute en las langosta espinosa que viene de otras regiones para alimentarse por las noches. Para las aves del golfo, como serretas (*Mergus serreta*), colimbos (*Gavia immer*), cormoranes (*Phalacrocorax carbo*), pelícanos (*Pelecanus occidentalis*) y patos pelirrojo (*Aythya americana*), utilizan estas zonas como alimentación y otras habitan temporalmente, ya que realizan migraciones a lo largo de la costa. El total de los desembarques de peces comerciales de la Región Norte del Golfo ascendieron a más de 1,7 millones de libras en 2002, lo que representa cerca de US \$ 705 millones en ingresos (National Marine Fisheries Service, 2003).

#### 1.2.5.2 Economía del turismo

El turismo es un ingreso económico importante del hábitat. Los beneficios se observan cuando los residentes y no residentes, realizan excursiones de ecoturismo a las praderas marinas. Los no residentes gastan cientos de millones de dólares al año en hoteles, restaurantes y tiendas al aire libre equipamiento a lo largo de la costa (FDEP, 2001). Un ejemplo del valor económico de los pastos marinos es de los Parques y Vida Silvestre de Texas (TPWD, 1999). Esta agencia estima que sobre la base de la cuenta corriente de la distribución de algas marinas, valor recreativo, y la cosecha de la pesca comercial, que los hábitats húmedos contribuyen aproximadamente 12,6 millones de dólares anuales a las economías regionales. Es importante proteger este valioso recurso mediante la utilización de métodos eficaces de conservación.

#### 1.2.5.3 El desarrollo costero y estructuras de protección de la costa

El rápido desarrollo de las comunidades costeras para fines residenciales y comerciales puede causar cambios no muy favorables en el hábitat marina esto disminuye el hábitat de aguas poco profundas. Unos ejemplos de estas modificaciones incluyen la construcción de malecones, espigones, revestimientos, espigones y muelles. Cada una de estas estructuras, encaminadas a proteger la propiedad de la costa, refracta la energía lejos de la orilla, que puede causar la erosión y aumentar las corrientes que pueden dañar los pastos marinos. Para la rehabilitación una de las actividades realizadas en playas de México es el dragado que causa impactos a corto y largo plazo, incluyendo la eliminación física o el enterramiento de las camas. El aumento de la canalización de ríos y arroyos puede alterar el equilibrio entre el agua dulce y agua salada, y

esto resultaría en la salinidad desfavorable para las especies que habitan, las concentraciones de algas marinas, un impacto directo del dragado incluye aumento de la turbidez de sedimentos en suspensión.

Los efectos de la navegación comercial y deportiva es el uso de hélices, los sedimentos removidos reducen la luz del sol. . Por ejemplo, camarón, la mayor pesquería comercial en el Golfo, se lleva a cabo con la ayuda de redes de arrastre de fondo que raspar el fondo del mar para cosechar el camarón (Texas Parks y Departamento de Vida Silvestre, 1999).

La degradación de estos ecosistemas han tenido un fuerte impacto sobre los recursos naturales y la vitalidad socioeconómica, a pesar de esto, con el manejo correcto es posible intervenir en la perdida actual. Realizando estrategias de planificación integral que incluyan practica de manejo, conservación, actividades educativas, vigilancia y la restauración para mejora las probabilidades de éxito

Dentro de la gestión el punto primordial es la administración de planes integrales desarrollados por las organizaciones estatales y federales del medio ambiente. Estas políticas crean un marco de planificación que permite a los interesados a participar en la toma de decisiones. Donde se incluyan comités que se centren en; la investigación, vigilancia, conservación, restauración, protección y educación, facilitando el debate y la priorización de los temas principales.

En nuestra actualidad los medio de comunicación son fuertes herramientas para la comunicación haciendo que tanto a nivel estatal como federal pueda existir una comunicación sin fines de lucro con los ciudadanos locales para fomentar los esfuerzos de restauración y talleres educativos, que existan mecanismos de financiamiento para la participación del publico

El monitoreo es una clave del éxito donde se podría incluir establecimiento de parámetros geográficos, la creación conjuntos de datos coherentes y técnicas de interpretación, la inversión en la verificación de campo de las fotos aéreas, la identificación de especies de algas marinas, y la medición de la calidad del agua y los sedimentos. Los esfuerzos de monitoreo son los mejores que realicen las entidades locales que tienen una comprensión de su ecosistema dinámico y coordinado por las organizaciones más grandes, por ejemplo, GMP y USGS, que puede garantizar metodologías consistentes. Pero para esto se necesita primero realizar la restauración de todos los daños acumulativos que se han generando, cabe mencionar que hay que realizar modificaciones a nivel estructural o restauración completa de estas. El sustento tomado seria en base a los informes y estudios planificados, buscando las mejores propuestas de mejora para estos ecosistemas.

### **1.3 Impacto Medioambiental de la Erosión Costera**

#### **1.3.1 Inicio de erosión costera**

La erosión costera inicia cuando, comparando dos estados de una playa en dos momentos distintos, la línea de orilla está retranqueada hacia tierra. Habría que revisar si a ese estado es realmente erosivo, ya que pudiera suceder que el sedimento de la playa que antes estaba en su zona seca, se haya movido a la zona sumergida, o que exista un desequilibrio sedimentario a lo largo de todo el sistema litoral. Se puede afirmar que existe erosión cuando el sistema litoral en su conjunto ha perdido sedimento.



El *sistema litoral* es la región donde la interacción entre la actividad humana y el ecosistema marino es más estrecha. Constituye la zona de intercambio por excelencia entre continente y océano. (Ver Fig. 1.4 Constitución del sistema litoral Fuente)

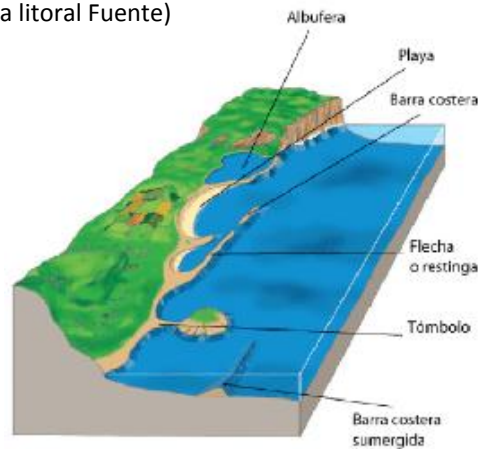


Fig. 1.4 Constitución del sistema litoral Fuente: imágenes de google

Las olas son los principales agentes erosivos del litoral. Su efecto es doble, interviene no sólo la potente fuerza de la masa de agua, sino también el continuo roce y golpeteo de los materiales arrastrados por las olas. De forma general las olas actúan:

- ✓ **Comprimiendo el aire contra las rocas.** Esta compresión, que puede llegar a alcanzar presiones superiores a  $30 \text{ Tm/m}^2$ , es mayor cuanto más fracturada esté la roca y menor en rocas masivas y poco fracturadas.
- ✓ **Produciendo corrosión.** Las olas pueden pulir o fragmentar los materiales, debido a su efecto metralla. Estos materiales pueden acumularse formando playas u otras formas de acumulación o ser arrastrados hacia otras zonas.
- ✓ **Produciendo un efecto químico sobre los materiales,** por ejemplo, disolviéndolos, hidratándolos, etc.

### 1.3.2 Variación de erosión costera

Hay muchas soluciones de gestión de la erosión costera que se han desarrollado, probado y evaluado con éxito en la literatura científica y de gestión.

La afectación de la costa varía dependiendo del tipo de erosión:

#### 1.- En el tiempo

- a.- Cíclica
- b.- Onda erosiva
- c.- Continua o constante

#### 2.- En el espacio

- a.- Generalizada (sistema litoral)

- Falta de sedimento
- Alteraciones del medio
- Cambio en los agentes

b.- Parcial

1.- Desequilibrio del sistema litoral

- Cambio en la morfología
  - a.- Barreras transporte longitudinal
  - b.- Barreras transporte transversal
- Cambio de los agentes
- Incidentes climáticos

2.- Inicio de erosión generalizada

- Falta de sedimento
- Alteraciones del medio
- Cambio en los agentes

### 1.3.3 La erosión costera frente al cambio climático

Al tratar de enfrentar la erosión, debe verse, desde tres perspectivas diferentes:

- Reducción de aportes de sedimentos a las playas
- Cambio del clima marítimo
- Cambio del nivel medio del nivel del mar

La costa se alimentan de sedimento que una gran parte proviene de los cauces fluviales; el aumento o disminución de su caudal es esencial para la capacidad que el cauce tenga de transportar sedimento. Una disminución de las precipitaciones reduciría el aporte, pero si éstas se realizan de forma brusca que provoquen avenidas, podría compensarse, en la actualidad las cuencas de los ríos en su gran mayoría se hayan regulado, debida a esas regulaciones que en la actualidad las costas sufren. El clima marítimo que afecta directamente a la costa depende del clima y la morfología de las costas. Si se producen variaciones importantes en el clima, éstas se verán reflejadas en el oleaje y corrientes que afectan directamente a la costa, alterando el transporte sólido litoral, pero la medida en que lo haga es difícil de determinar. Lo que sí está muy estudiado es las transformaciones que se pueden producir en las costas cuando varía el nivel del mar. En el año 1962 el ingeniero de costas danés Per Bruun introdujo el método "Similarity profiles" o más conocido como método de Bruun en su artículo titulado "Sea-level rise as a cause of shore erosion" (subida del nivel del mar como causa de erosión costera) El método asume que el perfil de la playa, cuando se va elevando el nivel del mar en un largo plazo, se mueve sin cambios en su forma, migrando hacia tierra. Su teoría se considera válida hoy en día. Fue aplicada y ampliada por Weggel (1979) para las costas de Florida.



## 1.4 Situación de las playas y su manejo en algunos países del mundo en México

### 1.4.1 Situación y consideraciones

Hoy en día, con asentamientos costeros múltiples y numerosos y dado el movimiento y lo vulnerable del equilibrio de las costas, las cuales pueden variar en horas o años dependiendo del tipo de costa y de las fuerzas desestabilizadoras que producen el cambio, la protección costera es un aspecto común de la vida cotidiana de estas comunidades.

Se han implementado un conjunto de obras y sistemas para la defensa o estabilización de playas contra las inclemencias. Las protecciones pueden estar diseñadas para el resguardo de asentamientos establecidos en o cerca de la costa, o para proteger la misma. Específicamente, el objeto de dichas defensas puede ser para:

- 1) prevenir la erosión de la línea de costa, sea esta natural o artificialmente ganada al mar
- 2) prevenir inundaciones en zonas costeras causadas por sobreelevaciones del nivel del mar
- 3) proteger contra el oleaje a las entradas y recintos de puertos o marinas, generando zonas de calma
- 4) estabilizar canales de navegación en bocas estuarinas o lagunares
- 5) proteger obras de toma (e.g. de plantas de generación eléctrica o de plantas desalinizadoras) o de descarga (e.g. emisores submarinos) contra el azolve (USACE, 2002).

Existen países que dependen de la protección costera para controlar o por lo menos minimizar la pérdida de este sistema litoral (e.g. Japón), y existen otros que dependen de ella para su misma supervivencia (e.g. Países Bajos). En otros países, como es el caso de México, la protección costera obedece generalmente a necesidades e intereses más localizados: por ejemplo, para la estabilidad de playas para fines turísticos o intereses de particulares por conservar estable su frente playero, o para la estabilidad de bocas lagunares o estuarinas para fines de navegación y/o circulación adecuada en lagunas y cuerpos de agua semi-cerrados.

Se ha visto a lo largo de los años que la protección costera, vista como un instrumento para solucionar problemas locales y puntuales, refleja una visión limitada del problema real. Desde el punto de vista técnico, la protección costera en México ha sido una actividad cuyo diseño se ha enfocado, en la solución inmediata de problemas costeros puntuales y específicos, sin considerar el manejo integral de toda zona donde se tengan en cuenta tanto los procesos propios de la zona costera que influyen en su dinámica y calidad ambiental. Dicha visión ha llevado a situaciones en las que la protección costera se ha vuelto una lucha de intereses entre particulares, comunidades y el gobierno, con el consecuente detrimento del medio ambiente, sin tomar en cuenta la afectación de la costa a nivel sistema.

La Agencia Central de Inteligencia (CIA, 2002) muestra la lista de los 20 países costeros más grandes, combinado con los 20 países con mayor longitud de línea de costa, ordenados decrecientemente por su litoral. Dicha tabla presenta, para cada país, la superficie (km<sup>2</sup>), la longitud de línea de costa (km), la longitud de línea de costa relativa a la superficie (m/km<sup>2</sup>), así como el índice de ordenamiento decreciente de cada una de esas cantidades.

Esto un problema en países con mayor extensión de costas haciendo de esto un trabajo bastante arduo y continuo. México ocupa el 15º lugar tanto en superficie como en longitud de línea de costa, y el 13º lugar en longitud relativa (México tiene 4.7 m de línea de costa por cada km<sup>2</sup> de superficie).

Sin embargo, el conocimiento, aprovechamiento y manejo adecuado de las costas y sus recursos en México ha sido bajo. Desde la época prehispánica, las civilizaciones mesoamericanas establecidas en lo que hoy es México tenían una interacción relativamente limitada con el mar, utilizando productos marinos en su alimentación y en sus ritos (INE, 1999).

Dada la posición geográfica de México con una latitud en zonas templada y tropical, así como vertientes en los dos océanos más importantes del planeta, el potencial de las costas de México es enorme toda la costa y el litoral son aprovechables y explotables para alguna o varias de las actividades realizadas por el hombre, en contraste con zonas costeras inhóspitas y relativamente olvidadas en otras latitudes (Canadá, Rusia, Groenlandia, Antártica, entre otras). México ocupa el 15vo lugar con una línea de costa de 9,330 km (Fuente: CIA 2002)

Por esa razón es que es necesario el usufructo y protección de estos sistemas litorales del mundo para los diferentes tipos de costas, que se puede clasificarse en tres tipos:

- **Costas rocosas.** Son casi inalterables, al menos en las escalas de tiempo que nos interesan aquí (años).
- **Costas de arena** (material granular no cohesivo). Se deforman fácilmente con la acción del oleaje y las corrientes. En estas costas la posición de la línea de costa está en constante movimiento.
- **Costas de material cohesivo.** Estas costas de sedimento cohesivo involucran interacciones eléctricas y químicas ya sea en partículas individuales o en grupo, lo cual hace que no sean fácilmente erosionables.

El manejo integral se puede definir como un proceso continuo y dinámico que reconoce el carácter único de la zona costera como un recurso natural insustituible y que en la práctica permite tomar decisiones para el uso, desarrollo y protección de los recursos litorales, asegurando que las propuestas sectoriales y decisiones gubernamentales sean consistentes y armónicas con las políticas nacionales, con el fin último de aumentar la calidad de vida actual y preservar para las generaciones futuras este medio ambiente en el mejor estado posible (Cicin-Sain y Knecht, 1998).

Los objetivos principales del manejo integral costero son: alcanzar el desarrollo sustentable, reducir la vulnerabilidad y el riesgo y mantener los procesos ecológicos y la diversidad biológica de la región (Cicin-Sain y Knecht, 1998).

Dentro del manejo integral se involucran ciertas etapas que son: la social, la económica, la política y la ambiental, y la definición de las fronteras naturales (escalas espaciales y temporales típicas de cada factor) de este sistema y los elementos constituyentes. Formando así un proceso más digerible para su aplicación en forma y tiempos

**Social:** Se usan referencias indicadoras como son las tablas de INEGI sobre la población total de los estados costeros que tiene cobertura nacional (todos los estados costeros) y permite revisar alteraciones que ocurran con una frecuencia mínima del orden de décadas (en algunos casos *e.g.* 1995 se tienen datos entre periodos censales de 10 años), con una cobertura espacial del orden de los cientos a unos cuantos miles de kilómetros ya que no se puede manejar información a una escala menor. Esta variable permite hacer un análisis al determinar la necesidad de cada estado para desarrollar un plan de manejo costero, considerando criterios tales como la tasa de crecimiento poblacional o la población absoluta en determinado año que el tamaño del más pequeño de los estados costeros ni a una escala mayor que el más grande de ellos.

**Ambiental:** Esta es una de las partes donde más atención se recibe a nivel internacional y en donde se revisan aspectos de ecología, geología, oceanografía, entre muchas otras disciplinas. Para diferentes aspectos y problemas específicos de la zona costera. Un ejemplo de esto es el análisis de mediciones de calidad del agua realizadas por (SEMARNAT, 2003), en algunas playas turísticas de México

**Económica:** Aquí es donde se maneja el análisis de inversiones, para atender y resolver los conflictos existentes en zonas costeras. La generación del conocimiento especializado que apoye acciones de conservación al igual que el mantenimiento o recuperación de procesos ecológicos, requieren también de un importante y constante flujo de capital. En México existe un fondo destinado a proyectos de manejo costero a nivel municipal, proveniente de la cobranza de las concesiones que la ZOFEMATAC otorga por el uso de la zona costera

**Política:** En cuanto a las políticas para la zona costera, se tienen diferencias en el enfoque. Por ejemplo las políticas destinadas a fomentar la producción o explotación de un recurso, y las políticas que plantean la protección del ecosistema en el que se haya ese recurso (*e.g.* petróleo y manglares).

## 1.5 El futuro del manejo costero en México

En México lamentablemente existe una situación de deterioro del medio marino y de la zona costera, en donde desafortunadamente hay pérdida de biodiversidad y de importantes recursos, así como de problemas de contaminación de diversos orígenes.

Algunas de las principales preocupaciones son:

- promover la conservación y ordenación de los océanos;
- facilitar el uso de los recursos y nuevas estructuras de protección enfocados a la preservación de ecosistemas y costas ;
- eliminar las prácticas de pesca destructivas;
- establecer zonas marinas protegidas;
- proteger los períodos y los lugares de cría y reproducción;
- ordenar el uso adecuado de la tierra en las zonas costeras;
- planificar las cuencas
- integran la ordenación de las zonas marinas y costeras en sectores clave (PNUD,1992).

Lo anterior requiere establecer los límites de uso de los recursos sustentables naturales y promover en particular el aprovechamiento marino y costero.

Donde la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) se concibe como el líder natural de dicha gestión ambiental en océanos y costas. Reconociendo que los múltiples problemas de la zona costera no sólo han aumentado en número sino también en el grado de complejidad entre los que destaca la contaminación, la deforestación, la erosión del suelo, la pérdida de biodiversidad, la sobreexplotación de los recursos pesqueros y el deterioro general de la zona costera.

El Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006, establece 6 pilares para la conducción de la política ambiental:

- a) Integralidad, a través de un enfoque que tome en cuenta las interrelaciones que existen entre agua, aire, suelo, recursos forestales, diversidad biológica y las actividades productivas que se desarrollan en la zona costera
- b) Compromiso de los sectores del Gobierno Federal, a través de la corresponsabilidad entre las instituciones federales que actúan en el ámbito de los océanos y costas para el desarrollo sustentable

- c) Nueva gestión ambiental, a través de un cambio de enfoque desde la prevención y control para detener y revertir la degradación ambiental, a partir de una aplicación efectiva de los instrumentos de gestión y la reestructuración del sector ambiental, esta última tarea de particular interés dentro del contexto territorial de océanos y costas
- d) Valoración de los recursos naturales, mediante la cabal comprensión y sensibilización por parte de la sociedad sobre los servicios y riquezas naturales que la zona costera brinda como base para el desarrollo y bienestar humano
- e) Apego a la legalidad y combate a la impunidad ambiental, lo cual implica la aplicación de la ley sin excepción y el combate a la impunidad en la comisión de los delitos ambientales;
- f) Participación social y rendición de cuentas, por medio del acceso a la información ambiental por parte de la sociedad, que le permita conocer con transparencia, el estado del ambiente costero y marino del que depende y cómo afecta su bienestar.

En México si existen instrumentos de política ambiental, enfocados a la planeación del desarrollo, la conservación y el aprovechamiento de los recursos naturales de forma regional. Sin embargo, se carece de un flujo de manejo costero integrado que sea capaz de garantizar el mantenimiento de la estructura y función de los ecosistemas costeros y que permita un mejor nivel de vida civil y aquellos sectores que estén asociados a este.

Para el nuevo desarrollo en cuanto a política ambiental se refiere debe contener un proceso flexible con la capacidad de aprender y modificarse con la participación de comunidades científicas cuya supervivencia dependa de los recursos costeros y marinos.

Un ejemplo de la puesta en marcha de estos nuevos proyectos lo constituye la Agenda del Mar que con el fin de fortalecer la coordinación entre las diversas dependencias del gobierno federal en torno al aprovechamiento sustentable de los recursos del mar y la zona costera es coordinada por la oficina de políticas públicas de la Presidencia de la República que junto a la Secretaría de Marina, Secretaría de Turismo, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Secretaría de Educación Pública, Petróleos Mexicanos, dichas dependencias de la administración pública federal atienden problemas comunes y han dado inicio a un proceso de discusión intensa respecto a los objetivos y prioridades sectoriales de uso y aprovechamiento de los recursos marinos y costeros.

## **1.6 Proyectos de recuperación de playas desarrollados en México**

### **1.6.1 Las costas como activos de la nación, usufructo de un medio ambiente frágil**

Dentro de los programas de recuperación de playas proyectados en México se toma como muestra una de grandes extensiones de territorio que se tiene en el país en la Fig. 1.5 se observan algunos ejemplos de las Partes sur de México, como son; la Península de Yucatán que se encuentra conformada por tres Estados: Campeche, Quintana Roo y Yucatán los que suman un área total de 13 989 km<sup>2</sup> equivalente al 7.2% del territorio Nacional, excluyendo a las islas de Cozumel y Mujeres. Se sitúa entre las coordenadas 17°58' y 21°10' latitud Norte y los 86°48' y 91°15' de longitud Oeste. La extensión territorial de la zona de estudio es delimitada por el Estado de Tabasco al suroeste, al norte por el Golfo de México, al este por el Mar Caribe y al sur por Belice y Guatemala

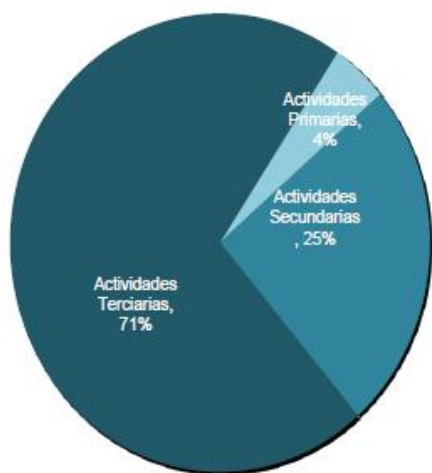


Fig. 1. 5 Partes sur de México. Fuente: [http://v6.yucatan.com.mx/reportaje.asp?rx=092\\$87\\$162](http://v6.yucatan.com.mx/reportaje.asp?rx=092$87$162)

Los sistemas arrénciales son un ejemplo de los múltiples organismos marinos que se pueden encontrar dentro de las reservas ecológicas de la península, puesto que estas aguas tropicales propician la interacción del coral, moluscos, crustáceos y otras especies marinas; es por ello que los arrecifes coralinos se consideran como los ambientes más bastos y complejos del medio acuático. Un ejemplo de este tipo de reservas ecológicas es el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos en el Estado de Quintana Roo, el cual forma parte del Gran Cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental considerado como la segunda barrera coralina más grande del mundo. En la localidad de Puerto Morelos, el arrecife es la principal fuente de economía de la población que en su mayoría se dedica a la pesca o al turismo y que dependen directamente de la conservación del ecosistema. El crecimiento de pastos marinos provoca la retención de sedimentos, evitando con ello la erosión de la playa y la disminución de daños provocados por las tormentas en las comunidades.

El Producto Interno Bruto (PIB) del estado ascendió a más de 161 mil millones de pesos en 2009, con lo que aportó 1.4% al PIB nacional. Las actividades terciarias, entre las que se encuentran el comercio y servicios inmobiliarios, aportaron 71% del PIB estatal en 2009. (Ver Grafica 1.3 . Estructura del PIB Yucatán y Tabla 1.2. PIB de Yucatán).

ESTRUCTURA DEL PIB DE YUCATÁN, 2009



Fuente: INEGI  
 Cifras: Millones de pesos

Grafica 1.3 .Estructura del PIB Yucatán  
 Fuente: INEGI 2009

PIB 2009	Yucatán	Nacional	% Part. A/B
	Total (A)	Total (B)	
<b>Total</b>	<b>161,758</b>	<b>11,383,381</b>	<b>1.4%</b>
<b>Actividades Primarias</b>	<b>7,084</b>	<b>415,550</b>	<b>1.7%</b>
Agricultura, ganadería, y pesca	7,084	415,550	1.7%
<b>Actividades Secundarias</b>	<b>40,096</b>	<b>3,858,300</b>	<b>1.0%</b>
Minería	724	905,336	0.1%
Electricidad, agua y gas	2,384	137,570	1.7%
Construcción	13,658	822,686	1.7%
Industrias manufactureras	23,330	1,992,708	1.2%
<b>Actividades Terciarias</b>	<b>114,578</b>	<b>7,109,531</b>	<b>1.6%</b>
Comercio	28,248	1,743,273	1.6%
Transportes, correos y almacenamiento	9,695	767,843	1.3%
Información en medios masivos	15,276	387,360	3.9%
Servicios financieros y de seguros	3,901	432,683	0.9%
Servicios inmobiliarios y de alquiler	20,973	1,228,802	1.7%
Servicios profesionales, científicos y técnicos	3,834	381,806	1.0%
Dirección de corporativos y empresas	263	48,215	0.5%
Serv. de apoyo a los negocios y manejo de desechos	2,365	288,884	0.8%
Servicios educativos	9,694	593,156	1.6%
Servicios de salud y de asistencia social	5,966	352,485	1.7%
Servicios de esparcimiento culturales y deportivos	428	42,959	1.0%
Hoteles y restaurantes	3,825	263,475	1.5%
Otros servicios excepto actividades del gobierno	4,884	289,207	1.7%
Actividades del gobierno	7,072	504,472	1.4%
Intermediación financiera indirecta	-1,846	-215,090	0.9%

Tabla 1.2. PIB de Yucatán. Fuente : INEGI 2009

1.6.2 Nuevos escenarios medioambientales, desarrollo sí, pero sostenible

Los primeros intentos para controlar la erosión de las playas fueron las acciones emprendidas para retener los sedimentos de la playa de estabilización sin tomar en cuenta otras consecuencias a lo largo de la costa. A finales de 2002 la situación era crítica, ya que muchas playas están casi totalmente erosionadas y que enfrentan el riesgo de destrucción permanente debido a las olas extremas inducida por un huracán con una ruta a través del Golfo de México.

En 2001, las autoridades federales de la Secretaría de Medio Ambiente en Yucatán, inició un programa de rehabilitación de la playa. Para una solución a largo plazo, era imprescindible que no todas las medidas de reparación afecta el proceso natural dinámico que relaciona el clima de onda, batimetría, sedimentos. El desarrollo detrás de la solución fue generar un proceso de acumulación de arena, sin interrumpir el transporte de sedimentos alongshore. Además, la solución tenía que ser lo más flexible posible, evitando las estructuras rígidas, por lo que fácilmente podría absorber cualquier modificación de



medios físicos sin la alteración de este. Una de las soluciones que se considero la mas óptima fue el uso de tubos de geotextil de polipropileno fueron diseñados para trabajar tan bajo de cresta estructuras sumergidas. Su función principal era reducir la energía de onda incidente en la playa, controlando el proceso de las olas rompiendo, al nivel requerido, que mantiene el equilibrio dinámico en la costa .Con base en estos criterios y con una base de datos de ámbito marítimo tratados por las autoridades federales y estatales, los tubos de geotextil se diseñaron de acuerdo a las teorías de la ingeniería costera en relación con la propagación de ondas, el proceso de rotura, y su relación para el transporte de sedimentos. El objetivo principal fue generar un perfil de la playa equilibrado integrado a los recursos naturales dinámica litoral. En septiembre de 2005, 4 km de tubos de geotextil se instalaron.

### 1.6.3 Soluciones mixtas

La combinación de clima, de olas, corrientes, mareas y mareas de tempestad es la principal causa de erosión de las playas. Basándose en la experiencia local en los últimos 20 años, toda acción de restauración playa tiene que respetar el medio ambiente, reduciendo en lo posible cualquier cambio en la dinámica litoral y también se debe tener en cuenta los posibles impactos negativos en las playas adyacentes. Bajo estos requisitos, el objetivo final del proyecto de restauración de playas fue para restablecer las condiciones naturales que rigen la deriva litoral.

Originalmente, la solución consistió en:

- (1) La eliminación de estructuras perpendiculares a la costa (espigones).
- (2) la regeneración de playas de bancos de material hacia el interior, por lo que las acciones en el fondo del mar se evitaron por completo.
- (3) la aplicación de las técnicas de derivación de sedimentos para los diferentes puertos a lo largo de la costa.

Con las acciones tomadas de recuperación con tubos geotextiles la playa se recupero parcialmente pero en las dimensiones originales. Una de las preocupaciones es que en los segmentos críticos, el movimiento de sedimentos libre no era suficiente. ¿Cuándo es demasiado alto, en relación con la deriva litoral, el proceso de erosión causas de regresión litoral. En estos casos, la energía incidente de onda se puede reducir a las condiciones que generan un perfil de la playa equilibrada por estructuras sumergidas, por lo que se acumula arena, sin interrumpir el transporte.

Los tubos de geotextil (Fig. 1.6.Tubos geotextiles ,reduccion de la energia de la ola) fueron elegidos entre las diversas alternativas por su viabilidad a causa de la disipación de las olas y por lo tanto reducir la energía, en una adaptación flexible a un medio tan dinámico como los medios de comunicación marítima. La posibilidad de una modificación rápida de las estructuras de acuerdo a la respuesta de las estructuras morfológicas, y los bajos costos de instalación inicial y de mantenimiento, también se consideraron.



**Fig. 1.6.Tubos geotextiles ,reduccion de la energía de la ola. Fuente: Goesynthetics volumen junio/julio 2006**

#### 1.6.4 Modelación antes de construcción, Instrumentación y monitoreo remoto

Dentro de los estudios realizados para el diseño se tomaron principalmente los siguientes:

- Un análisis preciso de las corrientes de oleaje y las mareas, y su interacción con las características de la batimetría y los sedimentos,
- Control de la deriva litoral.

Una vez evaluados estos la sección transversal del perfil de la playa balanceada y se realizan cálculos de tubos geotextiles. Uno de los requisitos principales para un eficiente tubo sumergido sección transversal de diseño es definir las altas cumbres, en relación con el nivel del agua sigue siendo (SWL) para todos los rangos de marea, ya que esta se regirá por el mecanismo de ruptura de la ola que controla la reducción de energía de las olas.

Una cuestión importante es evitar la reflexión de la onda en todo tipo de condiciones de la marea. Este fenómeno puede provocar cambios importantes en los modelos actuales que rigen el transporte. Las playas de Yucatán están conectados a la misma dinámica litoral, el cambio en los patrones actuales pueden causar efectos negativos a la deriva litoral en las playas adyacentes

Para septiembre de 2005, casi un año de seguimiento habían pasado desde que el tubo de geotextil se instaló la primera. El rendimiento de los tubos se evalúa básicamente desde dos perspectivas: la respuesta de los procesos marinos y el comportamiento de los geosintéticos materiales, los tubos de geotextil han estado llevando a cabo satisfactoriamente, trabajando en conjunto con espigones sumergidos. La disipación de la energía es generada por la onda de rotura debido a la presencia de los tubos. Turbulencia generada hacia la costa provoca la acumulación de arena, sin interrumpir la deriva litoral. Mientras tanto, no hay cambios de los patrones naturales de corriente hacia el mar de los tubos. (Ver Fig. 1.7. Restauración de la línea de playa después de ocho meses colocado el geotubo).



**Fig. 1.7. Restauración de la línea de playa después de ocho meses colocado el geotubo. Fuente: Goesynthetics volumen junio/julio 2006**



Los Tubos de geotextil se realizan en paralelo con otras estructuras, y han demostrado que son una alternativa eficaz y ecológica para la estabilización de la costa. Entre muchas variables, la transmisión de ondas en los tubos de geotextil es el parámetro principal que controla la respuesta de la costa. Los estudios existentes sobre este tema se refieren básicamente a los diques en talud, y sólo proporcionan información cualitativa cuando se aplica al diseño de los tubos de geotextil. El futuro las técnicas de diseño de los tubos de geotextil, como rompeolas sumergido, requerirá el desarrollo de modelos de predicción para la transmisión de energía de las olas, en función de los parámetros de la onda, la geometría de los tubos, y la sumersión relativa. Al igual que en todas las acciones humanas costeras, es muy importante para controlar los efectos negativos en las playas adyacentes, cuando un proyecto de protección de la costa se ejecuta. Los tubos ofrecen una alternativa efectiva para las modificaciones al rompeolas instalado, debido a la respuesta de los medios marinos, se requieren en el menor tiempo y al menor costo posible.

Existe un gran potencial de alternativas de protección de costa. El seguimiento y la investigación deben ser estimulados entre las organizaciones públicas y privadas para mejorar permanente en el diseño de técnicas.

## CAPÍTULO II. PROCESOS COSTEROS.

### 2.1 Introducción

Se tiene una idea muy general y fundamentada en creer que la tierra es estable y que los procesos geológicos son permanentes a la vista humana. Para muchos esto resulta razonable porque la tierra cambia lentamente, pero las costas no son estáticas, al igual que las comunidades que habitan en ella, varían en forma y posición como reacción de las fuerzas naturales y a las actividades humanas.

Los cambios en la fisonomía de una costa son producto de la incidencia de una serie de procesos, los cuales pueden ocurrir de manera individual, sin embargo en la gran mayoría de los casos ocurren simultáneamente o en secuencia.

El planeta está constituido la mayor parte por agua de mar y las distintas formas costeras que se observan en una determinada línea de costa son el resultado de los procesos que operan en el presente sobre ésta y de aquéllos que operaron o que han operado por largo tiempo. La composición de las distintas formas de una costa pueden ser de material rocoso o sedimentos, siendo el estudio del transporte de sedimentos uno de los principales puntos de interés de la morfodinámica costera.

Por consiguiente, los ambientes costeros resultan ser escenarios de trabajo complejos, por la gran cantidad de variables que condicionan el desarrollo de los mismos.

El término playa se emplea en medios continentales para designar depresiones cerradas desarrolladas en zonas áridas y semiáridas cuyo fondo plano y generalmente desprovisto de vegetación se inunda periódicamente, siendo frecuente la precipitación de sales por evaporación. Recientemente, Briere (2000) ha llevado a cabo una minuciosa recopilación de los diferentes términos utilizados para designar a estas depresiones. Este autor propone que el vocablo playa se emplee para depresiones intracontinentales con balance hídrico negativo que permanecen secas más del 75% del año, y que playa-lake se adopte como una transición entre playa y lago que designa a depresiones con agua entre el 25 y el 75% del año. Este tipo de definiciones, pueden resultar ambiguas ya que el régimen hídrico de las playas no está visualizado a un solo camino, pudiendo permanecer húmedas o secas durante años. En la Enciclopedia de los Desiertos, Tchakerian (1999a) define playa como una depresión frecuente en zonas áridas y semiáridas sometida a inundación por aguas superficiales efímeras y por fluctuaciones del nivel freático. La definición dada por Dregne (1999) para el término *pan* es prácticamente la misma que la anterior. Por otra parte, Shaw y Thomas (1997) consideran los términos de playa y *pan* como sinónimos. A diferencia de los anteriores, el término *sabkha* si presenta una diferenciación clara en su origen, quedando restringido a depresiones situadas en llanuras costeras (Tchakerian, 1999b; Briere, 2000). Existen ejemplos de playas en numerosas regiones del planeta. (Goudie y Wells, 1995). Su tamaño es muy variable, fluctuando entre 0.004 y 100 km<sup>2</sup> en el suroeste de Australia (Killigrew y Gilkes, 1974). A veces se agrupan alcanzando densidades elevadas, como en el Estado de Orange Free en Sudáfrica, donde se reconocen más de 100 playas en una extensión de 100 km<sup>2</sup> (Goudie y Thomas, 1985; Goudie, 1991). Existe una nomenclatura muy numerosa sobre depresiones cerradas situadas en medios áridos que obedece en parte a la utilización de denominaciones vernáculas (Tricart, 1969; Cooke y Warren, 1973; Neal, 1975; Cooke *et al.*, 1993; Currey, 1994; Rosen, 1994; Shaw y Thomas, 1997; Briere, 2000; Gutiérrez Elorza, 2001). El término playa es de origen español y fue introducido en el vocabulario anglosajón a raíz de la exploración española del suroeste de los Estados Unidos (Gutiérrez Elorza, 2001; Gutiérrez Elorza *et al.*, 2002a).

## 2.2 Origen de las Playas

Las islas pueden tener diversos orígenes (como la erosión y la sedimentación), en especial las que están ubicadas en mares y océanos. Pueden evolucionar y aumentar su tamaño por depósitos de sedimentos o por acumulación de material volcánico u orgánico. En ocasiones, pueden ser formadas por procesos erosivos en los cuales una porción de tierra queda separada de un continente. Una variación en el nivel del mar también puede provocar la aparición de islas, cuando se sumergen las tierras bajas y quedan aisladas las zonas más altas del relieve (aumento de nivel del mar), como ocurre con el monte Saint-Michel durante la marea alta, o al aflorar picos sumergidos en el fondo marino (disminución de nivel del mar), como ocurriría en el caso de una bajada del nivel con los bajíos del canal de la Mancha. ( Wikipedia).

Las playas se desarrollan preferentemente en zonas con relieve muy poco contrastado y con una red de drenaje difusa o inexistente (Tricart, 1954b; Goudie, 1999). En estos sistemas se refleja la interacción de las aguas superficiales y subterráneas, el transporte eólico y las reacciones químicas y biológicas (Torgerssen *et al.*, 1986). La evapotranspiración aumenta la concentración de las aguas lo que provoca la precipitación de diversas sales según su grado de saturación (Eugster y Hardie, 1978; Yechieli y Wood, 2002). En las épocas secas la deflación eólica agranda el tamaño de las playas y provoca la acumulación de partículas a sotavento dando lugar a dunas en forma de media luna (*lunettes*) (Goudie, 1991; Goudie y Wells, 1995). Por otra parte, en las playas se produce un drenaje centrípeto que tiende a transportar partículas de los márgenes de la depresión hacia el centro, para ser posteriormente evacuadas por el viento. De este modo, se produce la ampliación de las depresiones y cuando la distancia entre ellas es pequeña pueden llegar a enlazar (Goudie y Wells, 1995). Estas agrupaciones crecen con el tiempo y pueden sobrevivir a sucesivos ciclos de erosión (Marshall y Harmse, 1992). Cuando se produce la coalescencia, cada una de las antiguas playas tendrá una dinámica separada hasta que tras varios ciclos erosivos se unifique su funcionamiento como un sistema hidrológico único.

La arena de playa tiene diversos orígenes. En los continentes suele proceder, del desgaste de los materiales aportados por los ríos. En las islas volcánicas por ejemplo en Canarias vemos por ello preciosas playas de arena negra. Entre la arena podemos observar pequeños fragmentos de conchas que se van machacando por la agresiva acción de las olas, especialmente durante las tormentas. Pero existe una fuente de arena importante producida por algunos peces, como los peces Loro, que comen literalmente el coral para expulsar sus restos convertidos en finas arenas, esto les permite alimentarse de las algas que habitan en interior de la pared calcárea del coral. Un solo pez loro es capaz de producir una tonelada de arena al año.

Para que se forme una playa tiene que darse ciertas condiciones que lo permitan. Para empezar tiene que ser posible que se acumulen los sedimentos. Pero no sólo deben acumularse, debe ser mayor la acumulación que la erosión, porque si no fuera así la playa acabaría desapareciendo. Las playas están en permanente cambio debido a la acción del oleaje, los eventos climáticos (tropicales y extratropicales) y también por la acción del hombre

## 2.3 El clima marino

Dentro del entorno marino los parámetros que juega un papel muy importante en controlar la magnitud de todos los procesos costeros es el nivel del mar, el intervalo mareal, el tipo de rompiente, la velocidad de corrientes a lo largo de la costa, la velocidad de sedimentación, etc. por tanto al cambiar genera un reajuste de la nueva costa. Con cambios grandes, las formas costeras son abandonadas formando costas fósiles y comienza a formarse un nuevo conjunto de ellas. Con cambios pequeños, las formas costeras sufren cambios progresivos y son obligadas a migrar. Los cambios absolutos en el nivel del mar globales se conocen como: cambios eustáticos o glacio-eustáticos (relacionados con glaciaciones).

Dentro de la diversidad de climas marinos, existen factores de afectación o aportaciones directas como:

Los vientos que son causados por gradientes de presión atmosférica a través de un área. El viento tiene gran influencia sobre la línea de costa. Directamente es un agente de erosión y transporte de sedimentos costeros. Indirectamente es responsable de la formación de las olas y de mucha de la circulación marina.

El cambio climático con afectación del nivel del mar por cambios en la temperatura del agua, debidos a la variación climática estacional o anual, que es diferente para cada región. Los movimientos tectónicos de la corteza terrestre por actividad sísmica o volcánica en una porción inestable tectónicamente, generan cambios del nivel del mar hundiendo o levantando la costa. Hundimiento de la tierra por compactación de sedimentos o por la extracción de agua. Ajuste de la litósfera en respuesta a cambios en el peso por aumento o disminución de la cobertura de hielo.

Las tormentas que son ciclones que rotan alrededor de un centro de baja presión atmosférica. Cuando exceden la velocidad de 33 m/s se conocen como huracanes, tifones o ciclones (dependiendo de la localidad). Pueden causar erosión severa de las costas y daños a las propiedades.

Los procesos químicos que acorren en varios ambientes costeros. Pueden ser constructivos o destructivos.

- Constructivos: Ocurren por precipitación química, principalmente de minerales evaporíticos y carbonato de calcio. Los ejemplos más significativos son las rocas de playa y las eolianitas o rocas de dunas.
- Destructivos: Ocurren por meteorización química. Los factores que intervienen son la humedad y la susceptibilidad de los minerales presentes. La meteorización química aumenta la susceptibilidad a la erosión física.

Los procesos biológicos actúan tienen su grado de afectación y aportación al clima marino se pueden separar en dos tipos:

- Los que involucran el crecimiento y desarrollo de comunidades
- Los que tienen que ver con las actividades de organismos sobre las costas

Organismos constructores:

Los arrecifes de coral son el ejemplo más importante, ya que son responsables de la morfología primaria de las costas donde ocurren. Otros organismos que pueden construir arrecifes o costas son: hierbas, manglares, ostras, gusanos y algunos gasterópodos o moluscos.

Organismos que cambian la costa:

Las actividades de organismos pueden modificar las costas por los siguientes procesos:

- Producción de sedimentos: Gran variedad de organismos producen material esquelético que contribuye al sedimento costero.

- Rotura de sedimentos: Muchos organismos rompen conchas y restos esqueléticos en búsqueda de alimento.
- Erosión de sustratos rocosos: Erizos, chitones, algunos gasterópodos y esponjas debilitan la roca y la hacen más susceptible a la erosión
- Pelletización de sedimento fino: Los animales pueden ingerir considerable cantidad de sedimento fino que luego de la digestión se aglomera en pellets fecales.

Dentro de la calificación de estos procesos tenemos los antropogénicos y a continuación se menciona dos importantes:

- Directos: Construcción o dragado
- Indirectos: Cambios ambientales que influyen en aportes de sedimentos, escorrentía o clima como desarrollo urbano de las costas, construcción de represas, deforestación, desechos agrícolas, destrucción de dunas, relleno de playas, minería y desvío de corrientes o canales.

## **2.4. Procesos sedimentarios.**

Los procesos erosionales que ocurren en una determinada costa, son causa de la suspensión, transporte y depósito de los sedimentos. Cerca de la línea de costa los fragmentos de rocas y sedimentos son transportados dentro de un fluido que generalmente es agua, pero ocasionalmente este fluido también puede ser aire o hielo. La velocidad con que los procesos erosionales actúan, depende de las características del material donde inciden, (rocas y sedimentos) en especial las características individuales granulares tales como; porosidad, densidad, forma, tamaño, ángulo de reposo velocidad de caída y granulometría, también dependen de las características físicas y mecánicas del fluido.

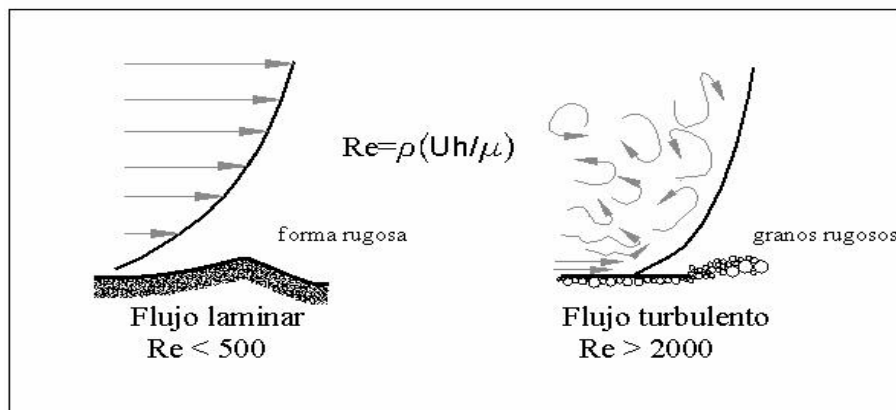
Un elevado grado de simplificaciones matemáticas se ve involucrado en la aplicación de los principios de la dinámica de fluidos al transporte de sedimentos costero, esto en relación a la forma en que los granos idealizados se mueven bajo un flujo constante dentro de un fluido incompresible llamado viscosidad, sin embargo en la práctica estas condiciones naturales rara vez se encuentran de acuerdo a estas suposiciones. Por ejemplo, los flujos generalmente no son ideales y las interacciones grano-fluido ó grano-grano, pueden ocurrir en diferentes escalas espaciales y temporales que influyen el inicio de movimiento de los granos debido a las corrientes, su comportamiento durante el transporte y finalmente su depósito, (Bagnold, 1966).

### **2.4.1. Sedimentos en suspensión.**

La puesta en suspensión de un material granular depende tanto de la velocidad de caída del mismo como de la densidad y viscosidad del fluido. La densidad es una medida del peso por unidad de volumen del fluido y ésta puede influenciar en la magnitud de las fuerzas, la efectividad con la cual ciertos disturbios como el oleaje viajan en el fluido. El agua dulce tiene una densidad de 1 Ton/m<sup>3</sup>, mientras que el agua de mar de 1.028 Ton/m<sup>3</sup>. La viscosidad es una medida de la resistencia del fluido a la deformación o al flujo, esta es medida como una relación entre el esfuerzo cortante, (la fuerza de corte aplicada a una unidad de área), y la proporción de deformación y la temperatura dependiente.

Por otro lado la velocidad es la tasa en la que un fluido fluye, es un vector que tiene magnitud y dirección. La geomorfología costera está relacionada a una amplia variedad de movimientos del agua y estos incluyen los movimientos del oleaje y la influencia del flujo de los ríos en las desembocaduras.

Los flujos generalmente son complejos en la capa límite, sobre la superficie del lecho, por lo que es de importancia determinar si el flujo es laminar o turbulento (Ver Fig. 2.1. Número de Reynolds). El flujo laminar es en cual las líneas de corriente son paralelas y éste ocurre cuando la velocidad es baja y la viscosidad alta, en cambio en un flujo turbulento se forman varios remolinos dispuestos al azar y ocurre cuando el flujo es rápido y la viscosidad baja. En la mayoría de los casos se presenta un flujo turbulento, y la velocidad de dichos flujos es variable en el tiempo, por lo que esta puede ser expresada como un promedio temporal denominada velocidad media. La forma de determinar los límites entre ambos estados es con el número de Reynolds. Este es un número adimensional y es obtenido mediante una relación de las fuerzas inerciales (velocidad media bajo una profundidad o distancia definida) y las fuerzas de viscosidad.



**Fig. 2.1. Número de Reynolds. Fuente: Tesis de evolución morfodinámica de playas UNAM 2006**

El flujo laminar ocurre cuando  $Re < 500$ , el flujo turbulento cuando  $Re > 2000$  y el flujo en transición ocurre en el intervalo  $500 > Re < 2000$ . Aún en los flujos turbulentos existe una subcapa viscosa laminar en la capa límite directamente encima de la superficie del estrato y debajo del flujo turbulento.

La rugosidad del lecho es expresada también con la rugosidad de los granos o como las formas de fondo, esto es importante para determinar si un flujo es o no turbulento, (Hardisty, 1994).

El flujo se puede comportar de diferentes maneras, fundamentalmente por la relación de las fuerzas inerciales, (caracterizada por la velocidad del flujo) respecto a las de gravedad, (caracterizadas por la raíz cuadrada del producto de la profundidad del fluido y la aceleración de la gravedad) esto es expresado por el número de Froude.

Cuando el número de Froude (ver Fig. 2.2. Número de Froude) es  $< 1$  existe un régimen subcrítico, siendo más importantes las fuerzas de gravedad que las de inercia, ya que el flujo ocurre con poca velocidad y es tranquilo.

Cuando el número de Froude es  $> 1$  el flujo está en un régimen supercrítico, donde las fuerzas inerciales predominan sobre las gravitacionales, el flujo es rápido o torrencial.

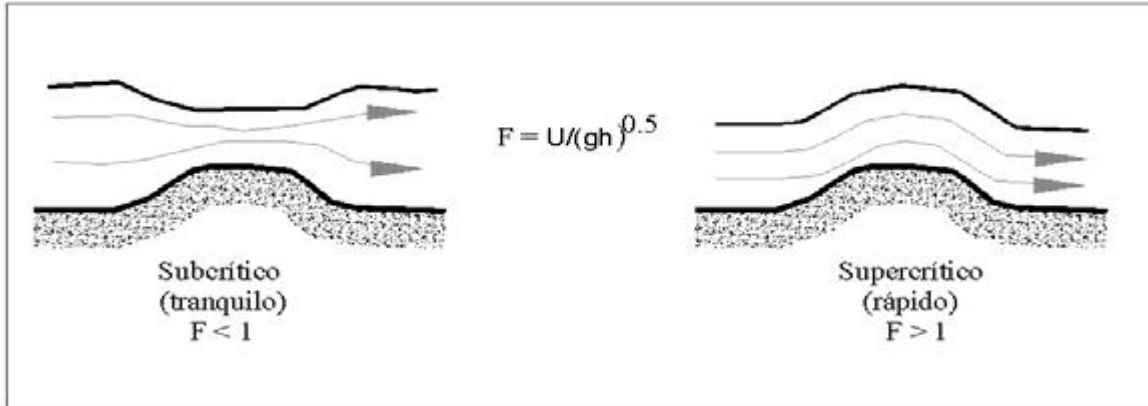


Fig. 2.2. Número de Froude. Fuente: Tesis de evolución morfodinámica de playas UNAM 2006

Cuando existe un cambio abrupto de un régimen a otro se manifiesta un salto o remanso hidráulico.

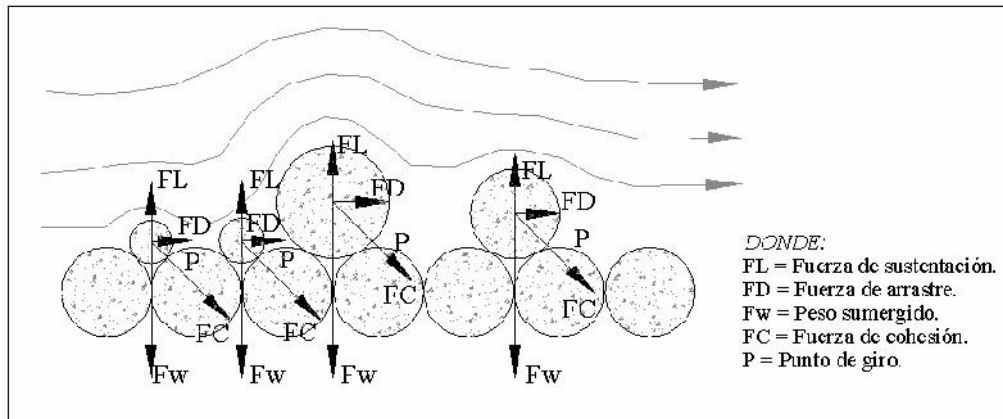
Un fluido en reposo ejerce una fuerza estática debido a su masa (llamada hidrostática en el caso del agua), esta energía potencial está en función de su masa y de la gravedad, en cambio un fluido en movimiento posee energía cinética, que es una medida del trabajo hecho o ganado dentro de ese estado de movimiento. Este pierde energía por fricción, y la suma de las energías cinética y potencial es una constante.

La solidez del material es generalmente definida como la habilidad de éste para resistir las principales acciones erosivas, las fuerzas de tensión ocasionan estiramientos en el material, mientras que las de compresión ocasionan la trituración del mismo y las fuerzas cortantes ocasionan deformaciones por deslizamiento.

Mientras que las fuerzas compresibles pueden ser las dominantes cuando se presenta el impacto del oleaje sobre las superficies rocosas. Son las acciones provocadas por las fuerzas de corte las que se encargan del movimiento de los fluidos sobre el fondo marino y estas son las principales fuerzas con principal significado geomorfológico en la zona costera.

Los sedimentos pueden ser clasificados en material cohesivo y no cohesivo. El material cohesivo son los limos y arcillas, en los cuales sus partículas se mantienen juntas debido a la acción de las fuerzas electrostáticas que predominan sobre las fuerzas gravitacionales que intentan separar dichas partículas. Los materiales no cohesivos son las arenas y gravas.

En la Fig. 2.3. Fuerzas en las partículas se observan las distintas fuerzas ejercidas en los granos de un lecho de sedimentos, los esfuerzos cortantes en este lecho están relacionados con la velocidad del flujo, la cual se define como la fuerza por unidad de área paralela al lecho y ejerce el arrastre del fluido a través del área proyectada del grano. Es imposible medir el esfuerzo de corte directamente, pero es muy probable que éste varíe en espacio y tiempo.



**Fig. 2.3. Fuerzas en las partículas. Fuente: Tesis de evolución morfodinámica de playas UNAM 2006**

En la práctica, se realizan promedios temporales de mediciones de velocidad en dos o más profundidades, que usualmente son representados gráficamente con la altura a escala logarítmica sobre el lecho, y lo cual es un indicador de la pendiente del perfil de velocidades que proporciona una estimación del esfuerzo de corte.

El inicio de movimiento del sedimento ocurre en la velocidad crítica de corte y depende principalmente del tamaño de grano. Para flujos turbulentos sobre fondo plano existe una aproximación adimensional del esfuerzo crítico llamada parámetro de Shields, que relaciona el diámetro del grano con la velocidad del flujo, pero la naturaleza de esta relación es compleja cuando el sustrato es irregular y los tamaños de grano son no uniformes.

Si el flujo está comprimido sobre las protuberancias granulares del lecho, las líneas de corriente se acelerarán y ejercerán una fuerza de levantamiento vertical llamada sustentación. El determinar el grado de levantamiento en flujos turbulentos es difícil debido a que normalmente existen varios remolinos.

La resistencia al movimiento proviene de las fuerzas gravitacionales y depende tanto del peso sumergido del grano como de la cohesión entre los granos. El movimiento ocurre donde las fuerzas actuantes provocan que un grano individual gire sobre los granos adyacentes.

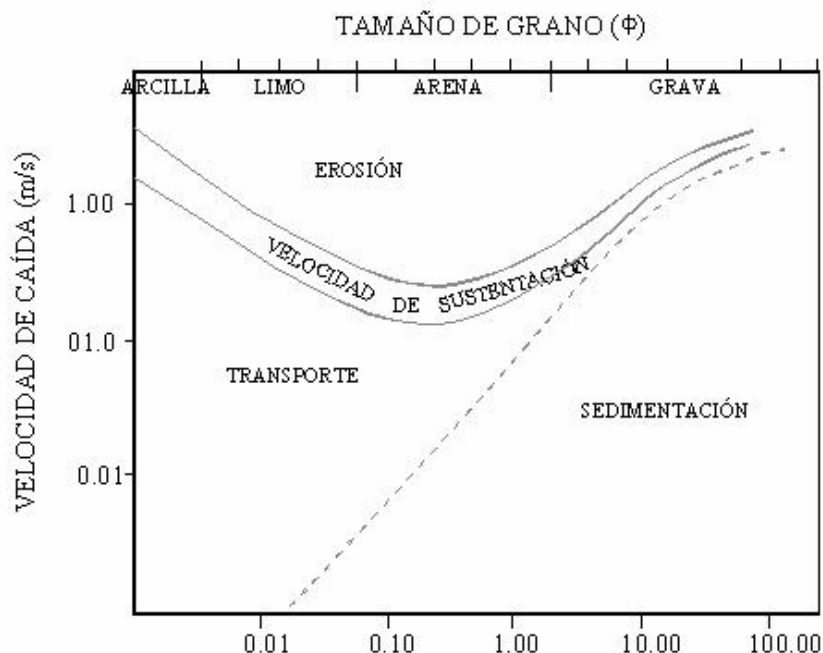
Una comparación de tamaño entre los granos sujetos al arrastre, y el fondo en el cual éstos reposan es posible siempre y cuando se realice para granos rugosos que están en un lecho de granos más finos, donde se observa menor resistencia alrededor del punto de giro que la que se presenta para granos más finos, (Komar, 1987).

Para el inicio de movimiento es importante determinar la forma del grano tal como su esfericidad y redondez, la textura de la superficie, y ciertas propiedades del sedimento como densidad, tamaño de grano y contenido de humedad.

Las variaciones en el inicio del movimiento para diferentes tamaños de grano son indicadas en la curva empírica original obtenida por Hjulstrom, (1935), (Fig. 2.4. Relaciones de sedimentos basada de Hjulstrom 1935).

:





**Fig. 2.4. Relaciones de sedimentos basada de Hjulstrom 1935**

Si bien se puede observar una mayor variabilidad para sedimentos de grano más fino que la mostrada en la curva indica una mayor cohesión en limos. Alrededor de tamaños de grano del orden de 0.060 mm, está proporcionada una relación más regular entre el tamaño de grano y la velocidad o el esfuerzo crítico de corte necesario para poner en suspensión el sedimento. Esto frecuentemente se expresa con una relación adimensional llamada la función de suspensión de Shields, (*Van Rijn 1993*). Hay varias razones del porque estas relaciones teóricas no describen adecuadamente las condiciones en la mayoría de las costas. Las generalizaciones son obtenidas para sedimentos ideales, en los cuales el tamaño de grano es uniforme, esférico y de densidad constante. La mayoría de las formas costeras están compuestas por distribuciones bimodales o irregulares del tamaño de los sedimentos, ya que los granos son de varias formas y densidades, adicionalmente para el inicio de movimiento del sedimento por arrastre del fluido, el movimiento puede ocurrir con bajas velocidades, donde el impacto de los granos ya puestos en transporte incrementa la suspensión.

En sedimentos mezclados las relaciones de los tipos de esfuerzo – deformación son frecuentemente no lineales y las formas de fondo como los ripples propician el límite de la movilidad del sedimento. Bajo el efecto del oleaje esto es común, pues se observa una ráfaga de sedimentos granulares moviéndose hacia delante bajo una ola y después se mueven hacia atrás nuevamente antes de la siguiente ola. Los ripples influyen las velocidades de corte y puede resultar en suspensión y transporte. En velocidades más elevadas los movimientos de las ráfagas de sedimentos pueden convertirse en láminas de flujo con las cuales se borran las formas de fondo.

#### 2.4.2. Transporte de sedimentos.

Una vez que el sedimento es puesto en suspensión, su transporte depende de varios factores. Los granos sedimentarios pueden ser movidos en el agua por deslizamiento o rodamiento, a mayores

velocidades la afectación o el impacto sobre los granos estables puede provocar un brote de nuevos granos a ser suspendidos en la columna de agua, a este proceso se le conoce como saltación.

Las diferentes formas de transporte están en función del tamaño del grano y es posible reconocer secciones separadas en la distribución del tamaño de sedimentos que están relacionadas con la suspensión, saltación y rodamiento o por el arrastre en superficie (*Visher, 1969*). La viscosidad y el grado de turbulencia de un fluido son factores muy importantes en el transporte de sedimentos, pero la concentración de sedimentos en el fluido y la viscosidad del mismo por sí mismas alteran la forma en que el sedimento es puesto en suspensión.

Las estimaciones de la cantidad de sedimento transportado por un fluido, están limitadas; teóricamente debido a la falta de apropiadas ecuaciones y empíricamente debido a las mediciones en campo de la tasa de transporte (*Van Rijn 1993*). Existen varias formulaciones predicativas, todas ellas con la misma estructura general que permite estimar la carga de fondo, la mayoría de estas están basadas en los trabajos de *Bagnold, (1966)*. Pero estas no toman en cuenta muchas de las complejidades del flujo en estimación, (*Allen 1994*).

Existen ciertos problemas metodológicos:

Primero se asume que la tasa instantánea de transporte de sedimentos, está en función de la velocidad experimentada en un punto en el tiempo, aunque esto requiere un tiempo determinado para que el sedimento sea puesto en suspensión o depositado. Es muy poco probable mantener un registro lo suficientemente continuo de mediciones de velocidad y en suficientes lugares para así calcular el transporte de sedimentos. Generalmente es preferible el uso de formulaciones que integran el flujo en la vertical para predecir el transporte neto de sedimentos, sobre el paso de una ola solitaria, de un ciclo mareal o eventos más largos en vez de estimaciones instantáneas de la tasa de transporte en velocidades máximas del flujo, (*Hardisty, 1994*).

Las estimaciones también están basadas en el supuesto de que hay una ilimitada cantidad de sedimentos para ponerse en suspensión lo cual es algo raro. Existen varias aproximaciones que pueden ser empleadas para la medición del transporte de sedimentos en suspensión. Es posible medir las concentraciones del sedimento suspendido utilizando dispositivos de medición ópticos o acústicos y así obtener un registro continuo y largo. Esto es una ventaja en comparación al transporte por fondo donde las trampas de sedimento proporcionan solo un conjunto de mediciones del movimiento de los sedimentos.

De cualquier modo tratar de utilizar las concentraciones en suspensión y la velocidad media para calcular el transporte de masa generalmente proporciona resultados pobres, debido a que el perfil vertical de concentraciones es muy variable, (*Black y Rosenberg 1991*). Es común realizar mediciones instantáneas del transporte de sedimentos, pero estas nos revelan poca información sobre la dinámica de la forma costera a escalas de largo tiempo.

Frecuentemente la velocidad de actuación de los procesos es muy variable, y el transporte neto no es una función lineal de velocidades instantáneas. Por ejemplo bajo condiciones de baja energía los procesos del oleaje incidente dominan en el transporte de sedimentos a través de la costa, mientras que bajo condiciones de tormenta, los movimientos de infragravedad dominarán el acarreo de sedimentos tanto dentro como fuera de la costa, (*Hardisty 1994*). Los promedios temporales del comportamiento del transporte de sedimentos pueden ser calculados por métodos más tradicionales. Es factible el uso de trazadores o colorantes fluorescentes para marcar el rastro del sedimento. Es apropiado para determinar la velocidad del transporte de sedimentos mediante un cálculo en el cambio del volumen de sedimentos en el

tiempo, por ejemplo haciendo una comparación de una serie de perfiles playeros, lo cual proporciona un indicador del transporte neto en un plazo largo.

### 2.4.3. Depósito del sedimento.

El establecimiento de una velocidad de caída es la forma como los granos se estabilizan a través del fluido y puede ser medida experimentalmente. Después de ser introducidos en un fluido, los granos están acelerados hasta que se establece una velocidad constante llamada Velocidad Terminal de Caída.

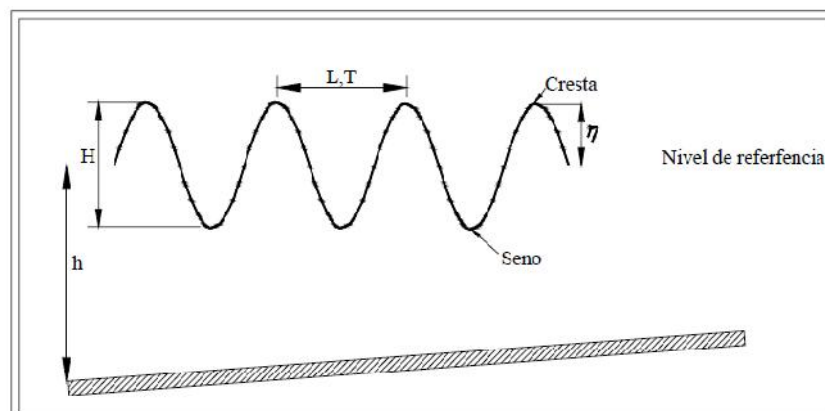
La velocidad a la cual el sedimento queda fuera de suspensión en un fluido de cualquier viscosidad está determinada por la ley de Stokes, que depende de la relación de la densidad de la partícula y la del fluido pero varía con el cuadrado de diámetro del sedimento. Esto también está en función de la forma del grano, y es generalmente determinado como un sedimento con grano ideal, (*esfera de cuarzo*). Los sedimentos reales difieren en muchas formas. Por ejemplo los fragmentos de conchas difieren en forma y densidad y estos muy probablemente se estabilicen mucho más lentamente que las esferas de cuarzo.

La estabilización de un sedimento depende de la viscosidad del fluido y que está parcialmente en función de las concentraciones del sedimento en suspensión, cuando esta concentración es elevada existe mayor contacto entre los granos que alteran las características de estabilización.

## 2.5. Procesos del oleaje

El oleaje es considerado como una respuesta a los forzamientos que se llevan a cabo en la interfase agua – atmósfera a causa de la actuación de los portadores de energía, entre ellos cabe destacar al viento.

Esta respuesta se traduce en una gama de ondas que difieren entre sí por su periodo, longitud y dirección a tal grado que pueden encontrarse ondas capilares con periodos inferiores a 1s, hasta oscilaciones inducidas por mareas con periodos de hasta días, sin embargo para los problemas de interés en ingeniería, las ondas con periodos de 3 a 30s conocidas como ondas gravitatorias son de especial interés para estudio. Para su estudio se puede considerar a las ondas como oscilaciones uniformes y periódicas de la superficie libre del agua, distinguiendo entre dos tipos de oscilaciones; progresivas y estacionarias. Ver Fig. 2.5. Parámetros asociados a la onda.



**Fig. 2.5. Parámetros asociados a la onda. Fuente: Tesis de evolución morfodinámica de playas UNAM 2006**

h	Desplazamiento vertical de la sup. Libre con respecto a un nivel de referencia
T	Periodo de tiempo que transcurre en observarse un punto igual en la sup. libre.
L	Distancia horizontal entre dos puntos iguales de la superficie libre.
Cresta	Punto donde la sup. Libre alcanza un máximo.
Seno	Punto donde la sup. Libre alcanza un mínimo.
H	Distancia vertical total entre la cresta y el seno
h	Distancia desde el fondo hasta el nivel de referencia

**Tabla 2.1. Características de una onda. Fuente: Wikipedia**

2.5.1. Teoría de ondas.

El objetivo fundamental de cualquier teoría de ondas es determinar la celeridad “C”, cuando las magnitudes H,L,h ó H,T,h son conocidas. El movimiento de las ondas se puede caracterizar mediante tres parámetros adimensionales y son, ver Tabla 2.2. Parámetros y descripción adimensionales de onda:

No	Parámetro	Relación	Descripción
1	Peralte de la onda	$\epsilon = H/L$ ó $kH$	Variación vertical de la onda en una longitud de onda.
2	Altura relativa de la onda	$\delta = H/h$ ó $Ah$	Oscilación vertical de la onda respecto a la profundidad.
3	Profundidad relativa	$\mu = h/L$ ó $kh$	Penetración del móv. de la onda respecto a la prof.

**Tabla 2.2. Parámetros y descripción adimensionales de onda. Fuente: Wikipedia**

Los movimientos de pequeña amplitud, pueden ser considerados como lineales siempre que se respete las siguientes condiciones:  $\epsilon \ll 1$  ó  $\delta \ll 1$ , sin embargo si estas relaciones son grandes se considerará un movimiento de amplitud finita o no lineal. De acuerdo con el parámetro de profundidad relativa las ondas se clasifican en, Tabla 2.3. Parámetros adimensionales de onda:

$h/L > 0.50$	Profundidades indefinidas
$0.05 < h/L < 0.50$	Profundidades intermedias
$h/L > 0.50$	Profundidades reducidas

**Tabla 2.3. Parámetros adimensionales de onda. Fuente: Wikipedia**

Existe otro parámetro adimensional que considera 3 características de la onda, (L, h, H) y el cual sirve para definir el régimen que le corresponde a una onda, para así poder seleccionar la teoría de onda más adecuada, es el parámetro de Ursell y se representa por:

$$Ur = \frac{\delta}{\mu^2}$$

Ur = parámetro de Ursell.

δ = altura relativa de la onda.

μ = profundidad relativa de la onda.

De acuerdo a estos parámetros las ondas se pueden estudiar de acuerdo a dos regímenes;

Stokes y ondas largas, la valides de cada teoría está en función de la profundidad relativa como se muestra en la Fig. 2.6. Regiones de validez para diferentes teorías de oleaje:

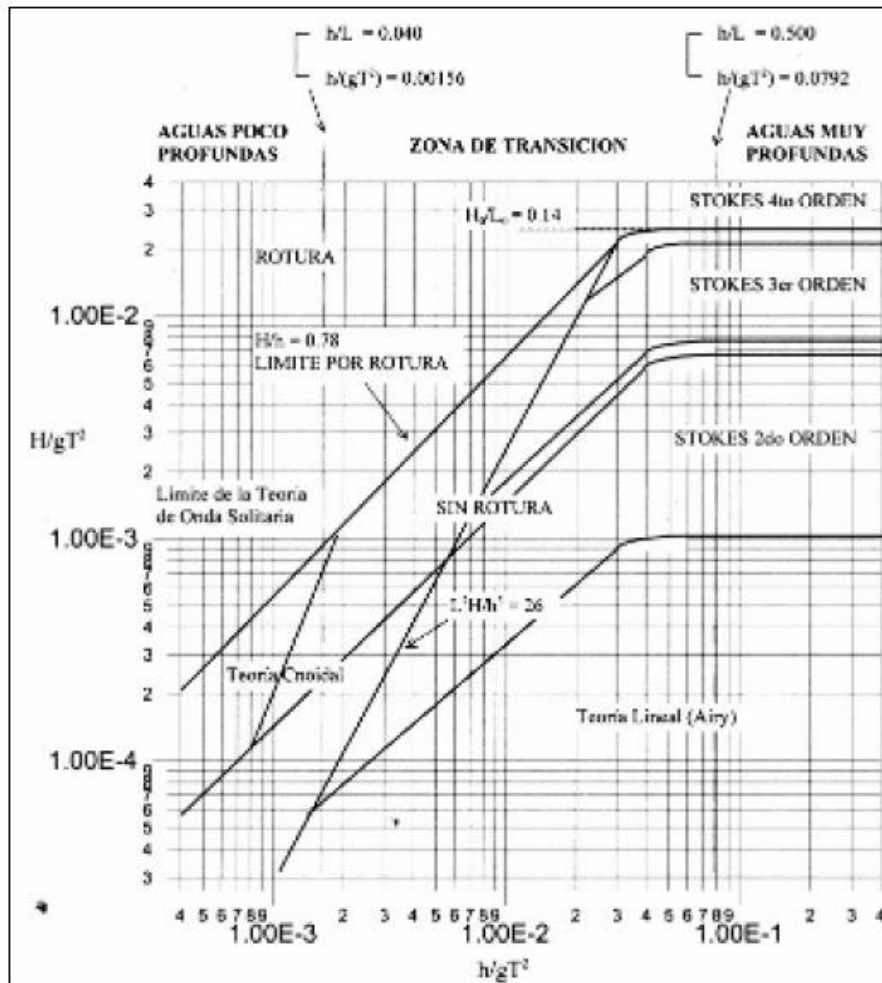


Fig. 2.6. Regiones de validez para diferentes teorías de oleaje. Fuente: Tesis de evolucion morfodinamica de playas UNAM 2006

Cabe observar que los parámetros  $h/gT^2$  y  $H/gT^2$  son parámetros que suelen utilizarse para describir la profundidad relativa y el peralte de la onda.

### 2.5.2. Clasificación del oleaje.

El oleaje puede ser clasificado atendiendo a diferentes características del mismo.

- Según su distancia de generación.

*De fondo o swell.* Se manifiesta cuando el oleaje no está bajo la influencia directa del viento a causa del cese de este, y pueden desplazarse decenas o hasta cientos de kilómetros desde su zona de generación y según la dirección del viento sin ser mantenidas por éste. Son ondulaciones sinusoidales con gran simetría y circularidad: crestas y senos redondeados, altura y espaciado uniformes. Suele ser un oleaje en proceso de decaimiento o dispersión.

*Local o Sea.* Se produce en la zona de generación en alta mar, donde raramente se aprecian crestas de cierta longitud y es difícil observar un período bien definido, presentan gran irregularidad respecto a la periodicidad, la altura de la superficie libre es muy impredecible, también se observa una desigualdad entre la forma del valle y la cresta de las olas, las cuales presentan una altura relativamente grande a su longitud de onda.

- Según el tipo de rotura.

Cuando el oleaje se propaga en profundidades decrecientes, su longitud de onda disminuye, por lo que el peralte aumenta. Cuando se alcanza una determinada relación entre el peralte, profundidad,  $h$  y pendiente del fondo, definida por un criterio de rotura, la ola se vuelve inestable y rompe. El tipo de rotura del oleaje depende del peralte del mismo y de la pendiente del fondo.

El Número de Iribarren, ( $Ir$ ) ó parámetro de similaridad, es un parámetro ampliamente aceptado como controlador del tipo de rotura.

$$Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_o}{L_o}}}$$

Donde:

$Ir$  = Número de Iribarren en rotura.

$\tan \beta$  = Pendiente del fondo.

$H_o$  = Altura de ola en zona de rotura.

$L_o$  = Longitud de ola en aguas profundas.

Dado que en las playas se utiliza con frecuencia la altura de ola en rotura,  $H_b$ , para definición de este parámetro se suele utilizar el número de Iribarren en ruptura,  $Irb$ , definido por:

$$Irb = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_b}{L_o}}}$$

Donde:

$I_{rb}$  = Número de Iribarren en rotura.

$\tan \beta$  = Pendiente del fondo.

$H_o$  = Altura de ola en zona de rotura.

$L_o$  = Longitud de ola en aguas profundas.

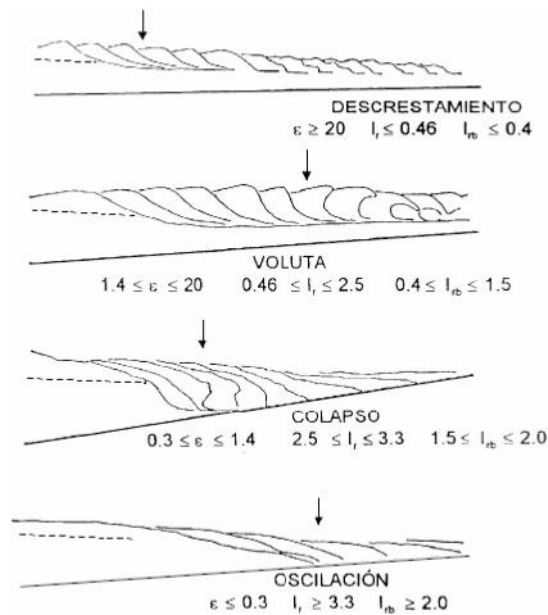
**Oscilación, (*Surging*)**: Cuando  $I_r > 3.3$  ó  $I_{rb} > 2$ , ocurre en playas con pendientes altas, se aprecia la formación de una cresta que no llega al vuelco y se diluye cuando las olas ascienden y descienden por el talud con un mínimo de aire atrapado, se observa reflexión elevada.

**Colapso, (*Colapsing*)**: Cuando  $2.5 < I_r < 3.3$  ó  $1.5 < I_{rb} < 2$  la ola comienza a desmoronarse por su base y colapsa, el aire queda parcialmente atrapado, formado espuma. El período de ascenso - descenso coincide con el período del oleaje y el flujo sobre el talud alcanza valores máximos. La reflexión comienza a disminuir debido a la pérdida de energía por turbulencia.

**Voluta, (*Plunging*)**: Cuando  $0.46 < I_r < 2.5$  ó  $0.40 < I_{rb} < 1.5$ . Se observa un adelanto en cada cresta respecto a su base, encerrando una considerable cantidad de aire. El chorro que alcanza el agua penetra violentamente la superficie, levantando otra onda por delante de la original e inyectando turbulencia hasta el fondo. El giro generado por el volteo introduce una fuerte rotación en el flujo y el aire atrapado escapa a la superficie de forma explosiva. Se disipa gran cantidad de energía en los primeros momentos de la rotura, posteriormente, la ola continúa rota formando un bore<sup>6</sup>, hasta llegar a la zona de ascenso y descenso, el coeficiente de reflexión es menor que en el caso de colapso.

**Descrestamiento, (*Spilling*)**: Cuando  $I_r < 0.46$  ó  $I_{rb} < 0.4$ . El chorro de la voluta se hace progresivamente más débil, por lo que se afecta sólo a la parte superior de la onda permaneciendo el resto prácticamente inalterado.

La disipación de energía es muy gradual, pero dado la gran longitud del área de rompientes, (*más de 3 ondas simultáneamente en la zona de rompientes*), este tipo de rotura (Fig. 2.7. Tipos de rotura) transforma eficientemente la energía del movimiento oscilatorio. La zona de ascenso-descenso por el talud de playa es mínima, pero las variaciones transversales del nivel medio, (*set-up*) son máximas, pues una buena parte de la cantidad de movimiento asociada al movimiento oscilatorio se emplea en modificar el nivel medio, en el caso de incidencia oblicua se emplea para crear corrientes longitudinales. El coeficiente de reflexión es mínimo.



**Fig. 2.7. Tipos de rotura. Fuente: Tesis de evolucion morfodinamica de playas UNAM 2006**

2.5.3. Medición del oleaje.

El oleaje puede ser medido en series de olas, (Horikawa 1988, Komar 1998). La frecuencia del oleaje puede ser estimada mediante la medición del paso del tiempo de una ola en un punto estacionario; La longitud de onda en campo es difícil de medir, pero esta puede ser determinada mediante fotografías aéreas. La altura de ola frecuentemente es medida mediante la instalación de sondas estacionadas en playas donde la energía del oleaje no fuese lo suficientemente grande para dañar el equipo.

Los equipos de medición instalados sobre boyas ancladas en mar abierto son utilizados frecuentemente para obtener registros continuos y de largo plazo. Los análisis a corto plazo se basan en registros de oleaje de 10 a 20 minutos de duración, esto se realiza en donde se pueden hacer generalizaciones de un régimen de oleaje en particular en donde las características son estacionarias, y no experimentan cambios graduales en el tiempo.

Los transductores de presión, proporcionan una forma muy efectiva para medir las variaciones en el nivel del agua, pero no se realizan los suficientes registros de frecuencias para detectar las variaciones del nivel del agua acorto plazo asociadas al paso de una ola, en especial cuando se mide en aguas someras.

Estos dispositivos generalmente son usados para medir mareas, y frecuentemente son fijados en el fondo del mar, dentro de una estructura que los protege y fuera de las variaciones de la superficie asociadas al oleaje.

Las distintas mediciones de registros del oleaje incluyen; mediciones no direccionales mediante sensores acústicos, sensores de velocidades orbitales, sensores de presión, correntímetros y acelerómetros. Actualmente son utilizados los métodos de percepción remota proporcionan información sobre el oleaje ubicado lejos de las costas.



En la Fig. 2.8. Registro análogo de oleaje, distribución de altura de ola y espectro, se observa el análisis de un registro análogo de las variaciones del nivel del agua. Utilizando el método de pasos ascendentes por cero, (*registrando una ola en el instante de tiempo en que el nivel del agua se eleva y cruza la línea cero*). Las olas individuales pueden ser detectadas desde un registro de series de tiempo continuo de las variaciones del nivel del agua.

Estos pueden ser expresados en un histograma de alturas de ola, como aproximaciones estadísticas o por un análisis espectral, el cual es utilizado para generar un gráfico de la energía contra la frecuencia desde una serie de tiempo.

Los parámetros estadísticos como la altura de ola media y máxima son las primeras en ser identificadas, también es posible identificar la altura de ola significativa tomando el promedio del tercio mayor del conjunto de alturas de olas obtenidas. La altura de ola media tiende a ser el 0.63% de la altura de ola significativa, (*Horikawa 1988*). Los parámetros estadísticos más importantes para definir un estado de mar a partir de una serie de tiempo son y están determinados por:

- Variación del nivel medio del mar.

$$\bar{\eta}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i$$

Donde:

$\eta_i$ = elevación de la superficie libre del mar.

N = numero de eventos o muestras.

- La variación de la media cuadrática, (*varianza*) de la superficie del agua.

$$\eta^2_{rms} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2$$

Donde:

$\eta^2_{rms}$ =La varianza

$\eta_i$ = elevación de la superficie libre del mar.

N = numero de eventos o muestras.

- La altura y el periodo medio.

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i$$

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i$$

Donde:

No =Numero de olas individuales del registro

$H_i$ = Altura de ola

$T_i$ = Periodo de la ola

- La altura cuadrática media.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2}$$

Donde:

No =Numero de olas individuales del registro

$H_i$ = Altura de ola

- La altura de ola máxima, significativa y un décimo.

$$H_{MAX} = H_1 = H_{1:N_0} \quad H_S = H_{1/3} = \frac{2}{N_0} \left[ \sum_{i=1}^{(N_0/3)} H_i + \frac{1}{2} H_{(N_0/3)+1} \right]$$

$$H_{1/10} = \frac{10}{N_0} \left[ \sum_{i=1}^{(N_0/10)} H_i + 0.4 H_{(N_0/10)+1} \right]$$

Donde:

No =Numero de olas individuales del registro

$H_i$  = Altura de ola

$H_{MAX}$  = Altura de la ola máxima

$H_S$  = Altura de la ola significativa

$H_{1/10}$ = Altura de la ola un decimo

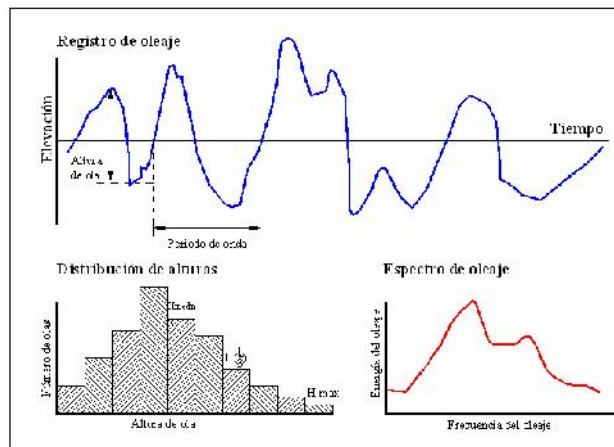


Fig. 2.8. Registro análogo de oleaje, distribución de altura de ola y espectro.

#### 2.5.4. Clima de oleaje.

Existen diferentes patrones de relevancia con respecto al clima del oleaje. Las olas más largas están asociadas a la acción del viento proveniente de latitudes templadas, caracterizadas por la presencia de los vientos del oeste y actividad frontal. En el hemisferio sur, esto ocurre especialmente en latitudes cercanas a los 60oS y en el hemisferio norte entre los 40 a 60° N.

Los vientos fuertes son raros en las calmas ecuatoriales de estas latitudes, las tormentas tropicales intensas conocidas como huracanes en el atlántico, tifones en Asia y como ciclones en las regiones al oeste del pacífico, influyen de manera significativa en muchas costas tropicales, pero estas no se inciden entre +5° y -5° del ecuador.

## 2.6. Mareas y su influencia

En la mayoría de las costas se observa elevación y descenso rítmicos del nivel del agua. Las mareas son ondas largas generalmente con periodos de alrededor de 43,000 s, (*semidiurna*) El oleaje que constituye las mareas es conducido por la atracción gravitacional de la luna y en una menor extensión por el sol. Fue Newton quien demostró que las fuerzas gravitacionales son originadas por el producto de las masas de dos objetos dividido por el cuadrado de la distancia entre ellos.

De esto se sabe que a pesar de que el sol tiene una masa mucho mayor que la de la luna, este está más alejado por lo que la influencia gravitacional que ejerce este astro es solo 0.46 veces de la que ejerce la luna.

El cambio de nivel del mar debido a la acción de las mareas, tiene importantes consecuencias en la morfología de las playas, debido a que puede modificar sustancialmente la propagación del oleaje, (*someramiento, refracción, rotura*), al variar continuamente la batimetría de la misma.

Marea meteorológica. Es el ascenso o descenso del nivel del mar a causa de los efectos del clima, este fenómeno se puede observar cuando existe una variación en la presión, provocando un aumento en su nivel cuando la presión baja como puede ser por la incidencia de un flujo ciclónico, un frente de calor, análogamente la disminución del nivel del mar puede ser causada por un aumento en la presión.

## 2.7. Otros procesos Oceanográficos

Un gran número de procesos oceanográficos son de gran relevancia en la morfología costera. Las corrientes oceánicas tienen un efecto global sobre la distribución de organismos y climas de oleaje. El hielo marino es un factor importante para algunas costas de latitudes altas, los patrones de circulación global como las circulaciones en aguas profundas, los fenómenos del niño y de la niña en el océano pacífico, pueden provocar cambios a largo plazo en la morfología de las costas que son afectadas por estas variaciones, a su vez la incidencia de eventos extremos tales como tormentas y tsunamis pueden ser traducidos en términos de cambios de las formas en planta de las costas.

#### 2.7.1. Corrientes oceánicas.

Las diferencias de densidad suelen ocasionar diferentes procesos químicos, físicos y biológicos que incluyen a las corrientes provocadas por las mareas y las corrientes residuales. Por otro lado las corrientes oceánicas son el resultado de la acción que ejerce el viento sobre la superficie del océano abierto y conducidas por gradientes horizontales de presión y diferencias de densidad que dan como resultado diferencias de temperatura y salinidad. La distribución de las masas terrestres es un factor que influye en el patrón de corrientes a lo cual debe sumársele la acción de las fuerzas de Coriolis.

El calentamiento de las aguas ecuatoriales junto con el exceso de calor en los trópicos, da como resultado una expansión del aire que se levanta, mientras que en los polos hay un déficit y el aire cae. Los patrones oceánicos de circulación están relacionados con grandes escalas de tiempo, algunos aspectos de la circulación oceánica han cambiado al mismo tiempo de que el nivel del mar ha fluctuado. En el atlántico norte se pierde calor de la atmósfera y el agua densa cae y esto propicia la circulación en aguas profundas. La circulación en sentido horario en el hemisferio norte y en sentido anti-horario en el hemisferio sur es a causa de las corrientes calientes provenientes del extremo oeste de los océanos las cuales intercambian su calor proporcionando ricos nutrientes a las aguas a lo largo de la margen este de los océanos.

Los patrones circulatorios de las corrientes afectan de manera indirecta a los procesos costeros, en especial sobre la influencia climática. Por ejemplo la aridez que se presenta en gran número de costas del este de la mayoría de las masas continentales por otro lado la distribución de algunos organismos como los corales o cualquier otra comunidad de animales de aguas poco profundas están influenciados por la circulación oceánica no solo en cuestiones de temperatura de la superficie del mar, ni de proporcionar microorganismos y nutrientes que alimenten estos ecosistemas. Los patrones circulatorios están también fuertemente influenciados por las interacciones atmósfera océano que se asocian a cambios como el fenómeno del niño.

2.7.2. Circulación atmosférica.

Los movimientos atmosféricos que ocurren en nuestro planeta, se presentan en diferentes escalas temporales y espaciales por lo que la intensidad de los efectos que causan es muy diversa. Ver Tabla 2.4. Escala de los movimientos atmosféricos

Escala	Dimensión Espacial	Dimensión Temporal	Algunos eventos
Planetaria	Miles de kilómetros a todo el globo.	Semanas a meses	Alisios, vientos del oeste, ondas
Sinóptica	Cientos a miles de kilómetros.	Días a semanas	Ciclones, anticiclones, frentes, huracanes.
Meso-escala	uno a cientos de kilómetros	1 hora a 2 días	Brisas de mar, montaña, tormentas, tornados
Micro-escala	centímetros a metros	Minutos	Turbulencia, remolinos, ráfagas de polvo

**Tabla 2.4. Escala de los movimientos atmosféricos. Fuente: Wikipedia**

- Celdas de viento:

Se le denomina celda de viento a aquellas circulaciones de aire mediante las cuales hay un intercambio de calor de una a otra región, las principales celdas que se distinguen son la celda de Hadley, Polar y la de Ferrel. La zona en estudio se ve influenciada por la acción de la celda de Hadley.

La celda de Hadley (Fig. 2.9. Celda de Hadley) está localizada entre el ecuador y los 30° de latitud norte y sur. En el ecuador el aire más cálido se eleva y se condensa, liberando calor latente y formando grandes cúmulos que producen abundante precipitación, el aire a niveles superiores en esta celda, se mueve hacia los polos y entre 25-35° de latitud sur y norte se produce subsidencia.

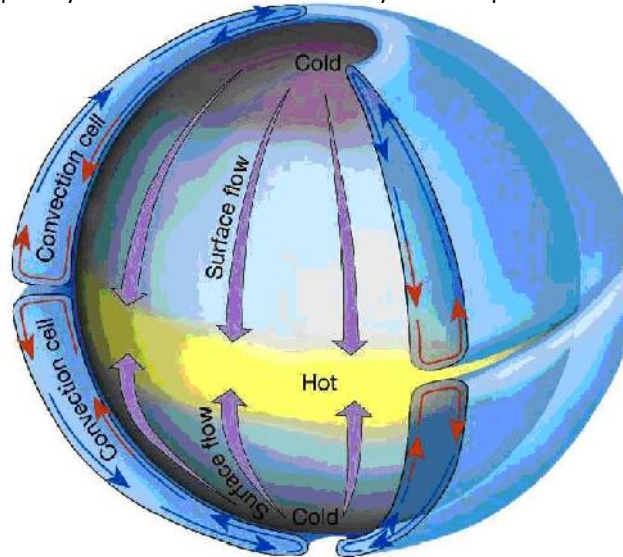


Fig. 2.9. Celda de Hadley, <http://meteobasica.blogspot.com/2010/12/circulacion-general-de-la-atmosfera.html>.

Debido al efecto de Coriolis los vientos en altura que inicialmente se movían hacia los polos, son desviados en dirección oeste a este cuando alcanzan la latitud de 25°, por lo que el flujo de aire hacia los polos se restringe. Por otra parte, el flujo de aire en superficie hacia el ecuador es desviado por la fuerza de Coriolis, generándose los *vientos alisios*.<sup>7</sup> Los vientos alisios soplan del noreste en el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur, convergiendo en el ecuador en una región con un gradiente de presión muy débil, llamada zona de calmas ecuatoriales.

### 2.7.3. Presión atmosférica.

La presión es el principal efecto generador de los vientos, que a su vez producen variaciones de la temperatura, humedad relativa, precipitación y del oleaje. La presión atmosférica es la presión que ejerce el peso de toda la masa de una columna de aire sobre un nivel dado. La atmósfera posee una masa del orden de  $5.3 \times 10^{18}$  Kg y a nivel del mar su valor es aproximadamente 101325 Pa que corresponde también a una altura de 760 milímetros que se eleva una columna de mercurio por efecto de la presión atmosférica.

La presión atmosférica es proporcional a la temperatura, por lo que si se eleva la temperatura del aire manteniendo la densidad constante, la rapidez de sus moléculas aumenta, y por lo tanto su fuerza, generando aumento de presión. También la presión atmosférica es proporcional a la densidad, tal que si la

densidad aumenta, la presión aumenta. A medida que se sube en la vertical se experimenta una reducción de la presión, porque la densidad del aire disminuye, debido a la disminución de la masa de aire en niveles más altos, se estima que la presión disminuye cerca de 1.2 hPa cada 10 metros de elevación en la vertical en las capas más bajas de tal manera que hasta 5 km de altura la presión disminuye aproximadamente 100 hPa cada kilómetro.

Las variaciones de presión producen una fuerza, llamada fuerza del gradiente de presión, que contribuye a la formación del viento. Cuando una masa de aire es sometida a una mayor presión de un lado que el otro, el desbalance produce una fuerza dirigida desde la zona de alta presión a la de baja presión en forma perpendicular a las *isobaras*<sup>8</sup>, cruzándolas en ángulo recto.

#### 2.7.4. Viento.

El calentamiento diferencial en la superficie de la tierra causado por la desigual distribución de la radiación solar, junto con las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y océanos, generan diferencias de presión, lo cual es causa de la formación del viento. 7 Vientos del sector este que soplan todo el año, con velocidades y dirección constante entre las latitudes 30oN y 30oS de los océanos pacífico, atlántico e índico.

<sup>8</sup> Son las líneas que unen puntos de igual presión, la separación entre las isobaras indica el gradiente de presión.

El aire fluye desde las áreas de altas presiones a las de baja presión, por lo que el viento no es más que un intento natural por balancear las diferencias de presión de gran escala. Existen factores que afectan al viento como son; el efecto de la rotación terrestre y la fricción del aire con la superficie.

- Efecto de la rotación terrestre o de Coriolis.

El efecto de Coriolis describe como todo objeto que se mueve libremente sobre la superficie de la tierra, es desviado a causa de la rotación terrestre hacia la derecha de su movimiento en el hemisferio norte. La dirección de esta fuerza, tiene una gran componente apuntando en sentido opuesto a la fuerza de presión. Esto produce que la dirección del movimiento del aire no cruce las isobaras, sino que aproximadamente pase paralelo a ellas.

La magnitud de la desviación producida por la fuerza de Coriolis depende de la latitud, siendo máxima en los polos mientras que en Ecuador se anula.

- Efecto de la fricción.

La fricción consiste en disminuir la rapidez del viento y desviar el movimiento del aire a través de las isobaras, hacia el área de bajas presiones. El grado de irregularidad del terreno determina el ángulo que se desvía el viento respecto a las isobaras, como también la magnitud de su disminución.

Sobre los océanos la fricción es pequeña y el aire se desvía entre 10º a 20º respecto a las isobaras y su rapidez disminuye aproximadamente 2/3 respecto de su valor si no hubiese roce.

### 2.7.5. Tormentas y eventos extremos.

La importancia geomorfológica de un evento extremo está regida por la cantidad de energía que este emplea sobre un determinado lugar, y estos cambios son relativos a la resistencia que dicho lugar presenta al cambio. En un lapso de tiempo, pueden ocurrir generalmente un número relativamente largo de eventos moderados, y un pequeño número de eventos fuertes.

Si el periodo de observación es lo suficientemente largo, entonces los registros pueden ser más o menos representativos de todos los eventos, pero esto es un caso raro. La relación entre magnitud-frecuencia generalmente es dibujada en una gráfica de probabilidades de la cual las repeticiones pueden ser determinadas y extrapoladas más allá del conjunto de datos observados para estimar la magnitud de eventos aún más largos que no han sido experimentados.

Los datos de oleaje pueden ser descritos en función de una excedencia anual de probabilidades. Ha existido un largo debate de cómo se deben de realizar los trabajos geomorfológicos ya sea por eventos recurrentes de intensidad moderada o por eventos de altas magnitudes y frecuencia baja. Por ejemplo una tormenta que incide una vez en cada 100 años probablemente sea de mayor impacto que alguna tormenta con un periodo de ocurrencia de 10 años, pero es poco claro si esta pudiese tener un impacto mayor que los diversos eventos que inciden cada 10 años, ya que estas ocurren en un largo tiempo.

Los intervalos repetitivos son probabilísticos, ya que estos no nos indican cuando el evento puede ocurrir y solamente indican la probabilidad asociada de un evento con un tamaño en particular. Los eventos de magnitudes altas presentan pocas probabilidades de ocurrencia, su repetición es en promedio larga.

Los intervalos de repetición son determinados suponiendo que el clima es estacionario, es decir, constante en un largo periodo de tiempo. Si ocurriesen cambios en el clima también pueden observarse cambios en la frecuencia esperada de los eventos, y esto puede afectar la capacidad de extender los registros de datos para extrapolar la magnitud de los eventos poco frecuentes.

Se considera como una tormenta, cuando se presenta una velocidad del viento de aproximadamente 8 en la escala de Beaufort, pero esta escala es más usada generalmente para hacer comparaciones de eventos frecuentes de alta energía. (Tabla 2.5. Escala de Beaufort)

Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Nudos (millas náuticas/h)	Denominación	Aspecto del mar	Efectos en tierra
0	0 a 1	< 1	Calma	Despejado	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	1 a 3	Ventolina	Pequeñas olas, pero sin espuma	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	4 a 6	Flojito (Brisa muy débil)	Crestas de apariencia vítrea, sin romper	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos
3	12 a 19	7 a 10	Flojo (Brisa débil)	Pequeñas olas, crestas rompientes.	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	11 a 16	Bonancible (Brisa moderada)	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	17 a 21	Fresquito (Brisa fresca)	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	22 a 27	Fresco (Brisa fuerte)	Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas.
7	50 a 61	28 a 33	Frescachón (Viento fuerte)	Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento
8	62 a 74	34 a 40	Temporal (Viento duro)	Grandes olas rompientes, franjas de espuma	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas dificultosa
9	75 a 88	41 a 47	Temporal fuerte (Muy duro)	Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	89 a 102	48 a 55	Temporal duro (Temporal)	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca.	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones
11	103 a 117	56 a 63	Temporal muy duro (Borrasca)	Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles
12	118 y más		Temporal huracanado (Huracán)	El aire está lleno de espuma y rociones. Enorme oleaje. Visibilidad casi nula	Destrucción total

Tabla 2.5. Escala de Beaufort. Fuente: <http://esrenovable.blogspot.com/2007/10/la-escala-de-beaufort.html>



El movimiento del agua durante una tormenta, depende de los cambios en el nivel de esta provocados por variaciones laterales en la presión barométrica, por las corrientes superficiales transportadas por el viento, por el alcance máximo del agua en la zona cercana a la costa, por el transporte de masa y por el alcance máximo del oleaje.

El oleaje de una tormenta es generado cuando la presión atmosférica es baja lo que ocasiona que la superficie del mar responda con un aumento en su elevación, (*Flather 2001*). Si un oleaje en el cual se encuentra una sola cresta y coincide con las mareas altas en perigeo, (*cuando la luna está más cercana a la tierra*) la superficie del mar puede incrementarse en varios metros, (*Gubert y McInnes 1999*).

Las tormentas de latitudes altas son el producto de sistemas de baja presión llamados huracanes los cuales se tardan en formarse alrededor de 3 a 4 días. Los huracanes se mueven lentamente y las condiciones de tormenta ocasionadas pueden influir sobre la costa aumentando el nivel del agua por varios días.

Los huracanes se forman en los mares tropicales durante la estación cálida, cuando el aire es muy húmedo y se halla a temperaturas de más de 26o C. La llegada de masas de aire frío provoca la condensación de una parte de la humedad del aire tropical y libera su calor latente de condensación, por lo que la inestabilidad vertical el aire es la energía que da nacimiento a un huracán. La puesta en rotación de dicho evento extremo es a causa de la acción de la fuerza de Coriolis, siendo esta excesivamente débil en las cercanías del ecuador por lo que los huracanes no pueden formarse en las latitudes inferiores a los 5o siendo la latitud óptima de formación los 10o. La perturbación naciente empieza a desplazarse hacia el oeste pero esta no tarda en describir una trayectoria parabólica y tomar rumbo hacia el NO hasta incidir hacia la costa y penetrar hacia tierra donde se disipan rápidamente o al situarse sobre aguas más frías.

En un huracán la presión disminuye a razón de 0.1 a 1 milibar por kilómetro desde la periferia hasta el centro, donde puede ser inferior a 900 milibares, por lo que esta disminución tan rápida de presión provoca vientos con velocidades de 100 hasta 200 km/h. Visto desde un avión o fotografiado por un satélite artificial, un huracán tiene un aspecto de un torbellino formado por espirales de cúmulo nimbos.

En el centro presenta una zona circular llamada el ojo y carente de nubes y dentro de la cual no soplan vientos. Se experimentan tres etapas durante el paso de un huracán, presenciado desde tierra o sobre el mar, primero se manifiesta un fuerte viento cuya intensidad aumenta constantemente, cesa bruscamente debido al paso del ojo para después entrar en la transición entre el ojo y la parte interna del huracán con la que el viento sopla con mayor fuerza.

Cuando un huracán llega a la costa, la dirección y velocidad el viento cambia y la presión provoca que el oleaje se agite. Estas tormentas generalmente están acompañadas de grandes precipitaciones pluviales las cuales también afectan de manera importante.

Otros eventos extremos y más raros son los Tsunamis, que son ondas de gran longitud, escasa amplitud y de extraordinaria velocidad de propagación, su origen es en los océanos a causa de algún disturbio como puede ser un terremoto ó un deslizamiento submarino que modifica bruscamente el perfil del fondo oceánico. Un tsunami se manifiesta en la costa con una retirada del mar, (*onda negativa o seno*) a la que le sigue el flujo de la primera ola sísmica, (*onda positiva*).

La deformación del fondo provoca la propagación de varias ondas progresivas que se propagan con gran rapidez, (*500 a 900 km/h*) y por lo general la onda mas devastadora es la tercera o la cuarta, presentan una gran longitud de onda de entre 150 a 200 km entre dos ondas mientras que la amplitud es muy pequeña aproximadamente 0.50m.

Estas ondas poseen una gran energía potencial donde su escasa amplitud es compensada por su gran longitud y esta energía se disipa principalmente al incidir en la costa. Una estimación de su velocidad de propagación es considerar su proporcionalidad con la raíz cuadrada de la profundidad. Por ejemplo una onda que se propaga a 800 km/h sobre fondos de 5000m, lo hará a 57 km/h a 25 metros de profundidad.

Así pues cuando la onda se acerca a la costa es frenada cada vez en mayor grado. Los efectos destructores de estas ondas difieren según la pendiente del fondo y de la configuración de las costas. Por ejemplo un estuario puede recibir por su boca un caudal determinado que al ir estrechándose se experimenta un aumento en la altura del agua, por otro lado las costas abiertas con fondos arenosos atenúan las ondas.

## CAPÍTULO III OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA

### 3.1 Revisión de los criterios de diseño

En este punto se realiza un breve resumen de las obras de protección más importantes y de las alternativas más relevantes de "Identificación de obras para la regeneración de playas". Sin embargo, los criterios de las obras propuestas para la realimentación, protección y estabilización de la playa

#### 3.1.1 Revestimientos

Para el diseño de estas obras, debe considerarse varios aspectos: Características de sitio.- los desistimientos para que sean estables de deben ser construidos son pendientes suaves máximo 2:1 Disponer un sistema de filtrado que evite la pérdida del material sobre el que se asienta la obra. La estructura debe de presentar la altura suficiente para evitar el rebase del oleaje

Se deben colocar unidades de concreto a los lados de la estructura y perpendiculares, para mitigar la erosión en estos puntos. Se deben considerar accesos en los casos en que se ubique alguna playa en la que se realicen actividades recreacionales, o generar accesos o muelles, en los casos que existan embarcaciones.

Cuando una costa sufre erosión significativa, el proceso de revestimiento debe ser posterior a la regeneración de la playa, ya que de lo contrario, la estructura será vulnerable a los efectos de erosión, sin dar efectividad a su función.

#### 3.1.2 Diques

Para la construcción de un dique, primeramente se debe identificar las zonas de inundación, y la mecánica de suelos sobre la que se desplantará la estructura, posteriormente se deberán realizar las consideraciones que se mencionan a continuación. El dique deberá presentar estabilidad con respecto a los efectos de asentamiento, filtración, y la erosión;

Identificar los materiales disponibles para la construcción de la estructura y la disponibilidad de maquinaria de construcción La altura del Dique se determina dependiendo de la vulnerabilidad de la zona a las inundaciones y a los materiales de construcción.

En general, la pendiente que se sugiere para la estabilidad de un dique, es 3:1 ya que una pendiente más pronunciada, puede resultar inestable, dependiendo de los tipos de materiales de construcción empleados. En muchos casos, se requiere un desagüe al pie de la estructura para controlar las presiones por filtración, las cuales pueden controlarse también por pozos perforados.

#### 3.1.3 Muros

En los muros permeables hay que tener en cuenta el drenaje de los terrenos que contiene el muro y en los impermeables conviene disponer un filtro que evite el paso de los materiales más finos a través del muro.

#### 3.1.4 Tablestaca

El tablestacado de acero se construye con una aleación para resistir la corrosión marina, sin embargo, debe tenerse especial cuidado durante los procesos constructivos de que si estos elementos son golpeados, pueden perder sus propiedades anticorrosivas, generando problemas a futuro.

#### 3.1.5 Dren de playas

Esta alternativa, permite drenar la zona de playa, con lo que modifica sus características de saturación, y genera un fuerza de succión que auxilia como sistema de control de playa, impidiendo el desplazamiento de sedimentos, Son localizados en una elevación estacional más baja del perfil de la playa, se pueden emplear cuando las características de la playa son de materiales finos, y su ubicación es preferentemente ubicada al pie de las estructuras.

#### 3.1.6 Estructuras perpendiculares a la playa

La forma de los rompeolas está determinada por la forma y tamaño del área que debe ser protegida así como también de las direcciones principales del oleaje de tormenta, de la dirección de las corrientes y del transporte litoral.

#### 3.1.7 Espigones

Para la construcción de espigones, la playa debe tener una pendiente suave. Es importante considerara la cantidad de arena que se mueve sobre la playa para determinar la mitigación de la erosión. El término de escollera, hace referencia al procedimiento estructural, este procedimiento es el más empleado debido a su sencillo y barato proceso de construcción para obras como rompeolas, espigones, escolleras, etc. Este procedimiento consta de un núcleo de material graduado de pequeños diámetros, el cual forma una estructura impermeable, y es protegida por un manto de cantera exterior con peso de sus elementos adecuado a las exigencias del oleaje. Algunas veces es necesaria una capa intermedia de escollera de tamaño inferior al manto que sirva de filtro para el material del núcleo.

La coraza, puede constituirse de bloques o elementos de hormigón. Aunque su utilización frecuente es en diques, en ocasiones se recurre al empleo de bloques o módulos de hormigón para la construcción de espigones, por su economía o por su imposibilidad de disponer de otros materiales. Los elementos prefabricados comúnmente utilizados son los cubos, tetrápodos, dolos, tribars, cuadripodos y stabits. Células metálicas o de hormigón. Consiste en cubos u otras formas de paredes metálicas o de hormigón, rellenas con rocas y arena, que unidos uno al otro se extienden a una longitud variable, su costo es relativamente alto.

### 3.1.8 Estructuras separadas de la playa

La efectividad de la estructura depende de su altura, la cantidad de agua y arena que se le permite pasar a través de él distancia de playa, longitud espació y tipo de suelo de bajo de estructura y tipo de base. El más importante de estos es la altura por que controla cuanto del oleaje alcanza la costa.

### 3.1.9 Rompeolas sumergidos

Estas se pueden aplicar en pendientes suaves que permiten uso de dunas en aguas poco profundas o distancia considerable de la playa. Rompeolas

### 3.1.10 Geotextiles

Se instalan en playas que se están erosionando sin intensiones de rellenar la playa con arena

### 3.1.11 Dunas

Este método es apropiado donde existe una pendiente de la costa suave y también es apropiado donde la velocidad de erosión es baja. También puede ser usada en combinación con otros métodos de combinación de erosión.

La velocidad de erosión de la playa es probablemente el elemento más importante para el diseño de un proyecto de rehabilitación de playa. Si la velocidad de erosión es alta entonces la rehabilitación de playa no puede ser apropiada. La dirección y velocidad e movimiento de arena a lo largo de la línea de playa debe ser determinado. La arena debe ser depositada directamente a lo largo de la línea de costa o un punto corriente arriba, permitiendo corrientes naturales que acomoden la arena. La línea de costa resultante protege la arena detrás de ella sacrificando la arena recientemente depositada. Si los materiales que se erosionan son diseñados su destino final debe ser considerado para evitar el llenado de playas adyacentes y canales de navegación.

### 3.1.12 Mediante empalizadas

Las recomendaciones generales en este tipo de defensa sugieren la disposición de empalizadas rectilíneas, paralelas a la costa, suficientemente alejadas del ataque directo del oleaje extremo y con un índice de huecos del orden del 50%.

### 3.1.13 Sedimentaciones en zonas costeras.

Los proyectos de creación de marismas son particularmente sensibles y el tráfico humano tiene factor adverso. Selección cuidadosa de las variedades de plantas con respecto a suelo local la salida de

viento son necesarias para lograr control de vida exitosa. Plantas nativas es más probable que se desarrollen mejor que vegetación importada.

### **3.2 Propuesta de estructuras de protección costera**

Una vez realizado el análisis de las diferentes características regionales, que rigen en cada una de las celdas costeras analizadas, se presentan en este apartado las alternativas generales para generación, protección y estabilización de playas. Se proponen aquellas obras más prometedoras en cuanto a efectividad-costo para la recuperación y estabilización de playas, las cuales se recomiendan sean evaluadas en un estudio de factibilidad técnica con el empleo de modelos numéricos o físicos en una segunda etapa. Para ello, se realizará un análisis de las alternativas mediante un Proceso Analítico Jerárquico, que involucra de cada uno de los aspectos de diseño para la solución del problema.

Las obras propuestas son:

- Colocación de rompeolas sumergidos, segmentados y paralelos a la línea de costa.
- Regeneración de playas.
- Construcción y restauración de dunas.

#### **3.2.1. Colocación de rompeolas sumergidos, segmentados y paralelos a la línea de costa**

Las principales causas de los problemas más fuertes de erosión costera son generadas por el oleaje de tormenta en combinación con corrientes, y la marea de tormenta; en condiciones normales los efectos existen de igual forma, sin embargo, para resolver o mitigar estos efectos, existen diversas alternativas, entre ellas, la aplicación de obras costeras, estas puede proporcionar protección directa (rompeolas, diques, malecones) o protección indirecta (rompe olas separados de la costa de varios diseños).

La propuesta de estructuras sumergida se integra a la propuesta de estructuras separadas de la costa, de las cuales se han realizado estudios más amplios de estructuras de cresta baja, las cuales permiten el efecto de rebase solo en condiciones extraordinarias, que pueden resultar ser muy comunes como medidas de protección costera, usados, solos o en combinación con rellenos de playas, el principal propósito de estas estructuras es reducir la carga hidráulica que se requiere para que exista un nivel de equilibrio dinámico en la línea de costa.

Para alcanzar el objetivo, estas estructuras son diseñadas para permitir la transmisión de cierta cantidad de energía del oleaje sobre la estructura por rebase y también algunas transmisiones por los poros de la estructura (rompe olas expuestos) o la disipación del oleaje rompiente sobre una cresta somera en el caso de estructuras sumergidas. Debidos a los requerimientos estéticos son usualmente preferidos los elementos sumergidos, ya que no se afecta visualmente el paisaje, la variabilidad de elementos de construcción es muy grande, además de que este tipo de obras son más económicas que las estructuras de cresta alta. Ver Fig. 3.2. Ejemplo del cambio morfológico en la costa por efecto de una estructura de cresta baja y una estructura sumergida.

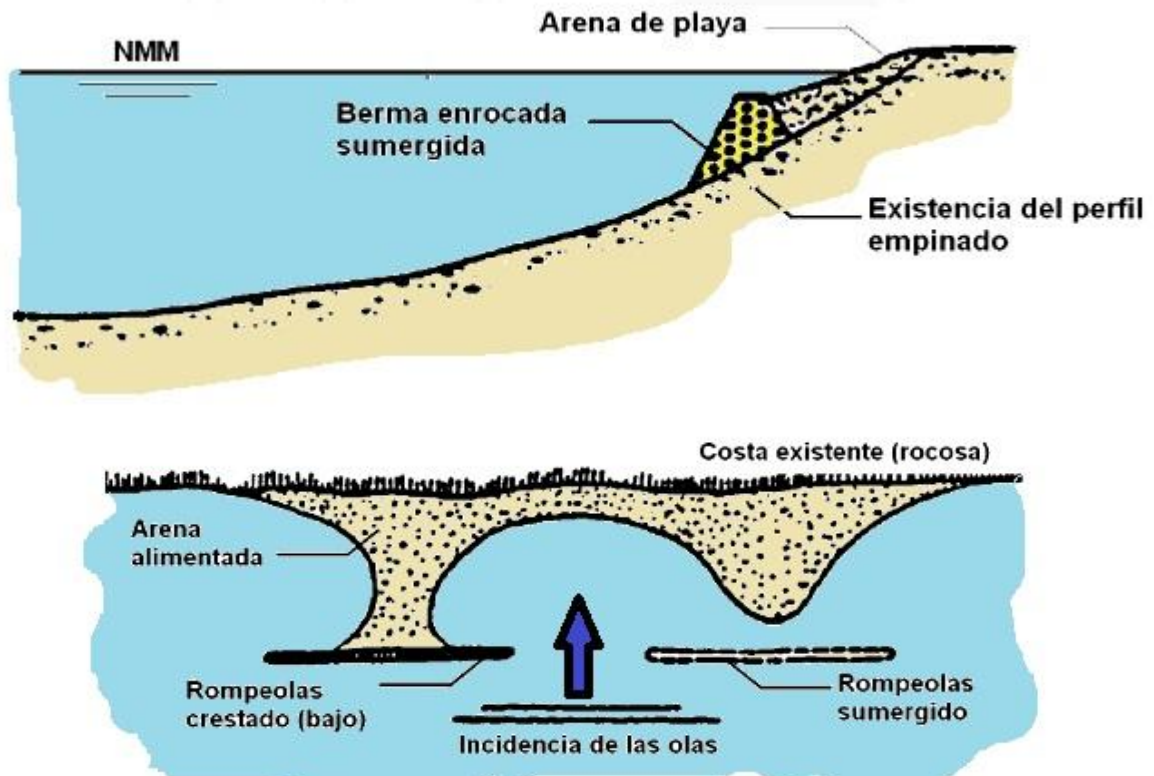


Fig. 3.2. Ejemplo del cambio morfológico en la costa por efecto de una estructura de cresta baja y una estructura sumergida

### 3.2.1.1 Criterios de diseño

Los principales puntos que deben ser analizados para el diseño de estas estructuras sumergidas y segmentadas son:

- Características de transmisión
- Diseño funcional
- Estabilidad de rocas y geosistemas.

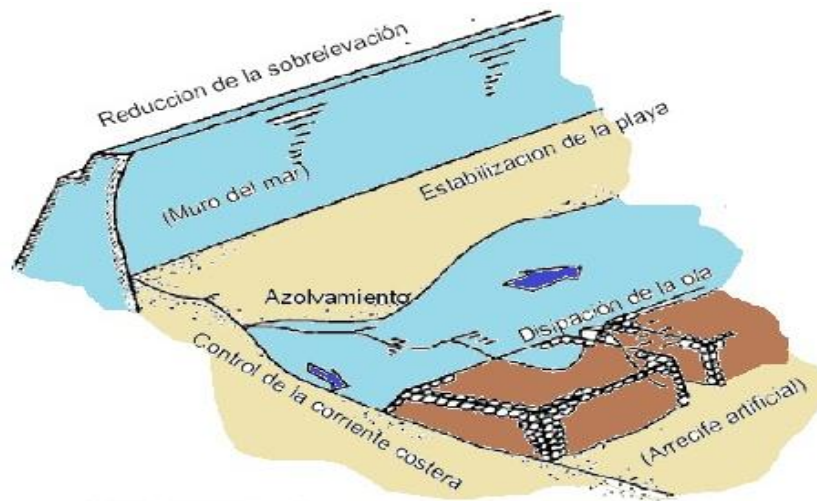
Usualmente los rompeolas separados de la costa y especialmente las estructuras de crestas bajas y sumergidas proporcionan una solución costera amigable al medio ambiente, sin embargo, el principal problema que surge es la dificultad de predecir la respuesta de la playa.

Para el control de la línea de costa, la respuesta final morfológica será el resultado del tiempo promedio de transmisión de energía, estos efectos se pueden conocer para un proceso de diseño mediante simulaciones numéricas, para lo cual es necesario conocer la variación del coeficiente de transmisión para varias profundidades de la cresta sumergida. Usualmente, es necesario conocer las propiedades del oleaje reducido durante condiciones extremas, por tal razón, la efectividad de las obras dependen de la capacidad de reducción del oleaje.

Transmisión del oleaje.

La respuesta de línea de costa a un rompe olas separado de la costa es controlada por diversas variables (Hanson and Krause 1989, 1990 y 1991 identificaron mínimo 14) de los cuales 8 son consideradas primarias:

1. Distanciamiento a partir de la costa
2. Longitud de la estructura.
3. Característicos de transmisión de la estructura.
4. Pendiente de la playa y/o profundidad de la estructura (controlada en parte por el tamaño del grano de la arena)
5. Altura significativa del oleaje.
6. Periodo significativo del oleaje.
7. Angulo de orientación de la estructura.
8. Dirección predominante del oleaje.
9. Para segmentos de rompeolas separados y arrecifes artificiales (ver Fig.3.3.Esquema tridimensional de los arrecifes artificiales), el espaciamiento entre segmentos se convierte en otra variable primaria.



**Fig. 3.3. Esquema tridimensional de los arrecifes artificiales**

La eficiencia de las estructuras sumergidas y los resultados de la respuesta de la línea de costa dependen como ya se mencionó, de las características de transmisión y el diseño de la estructura, para estimar la transmisión del oleaje se dispone de diversos procedimientos, sin embargo, aún se cuestiona la precisión de éstos (Tanaka 1996, Ahrens 1987, Uda, 1988, Van der Meer, 1990, d'Angremond- V d Meer- de Jong, 1996 Seabrook et al.,1988, etc)

De manera natural, comúnmente una obstrucción costa afuera es producida por un arrecife o isla, la cual puede causar cambios a la línea de costa formando una saliente o un tómbolo, esto ocurre porque los arrecifes reducen la altura de ola y por consecuencia la capacidad de transportación de la arena; esto produce que los sedimentos se desplacen por las corrientes a lo largo de la costa y el oleaje que pasa por encima de la estructura (Black, 2001). El nivel de protección es gobernado por el tamaño y posición costa afuera del arrecife, por lo que el tamaño de la saliente o tómbola varía de acuerdo con las dimensiones la estructura, estos cambios morfológicos, se pueden esperar solo si el sedimento está disponible (por fuentes naturales o por alimentación de arena).



El ejemplo de una simple geometría por un criterio empírico para el diseño y respuesta de la línea de costa de los rompe olas expuestos y separados es el siguiente (i.e. jarrys y Hervís, 1986, Dally y Pope, 1986 etc.)

Para formación de tómbolo  $\frac{L_s}{X} > (1.0 \text{ a } 1.5)$

Para formación de saliente  $\frac{L_s}{X} = (0.5 \text{ a } 1.0)$

Para saliente con presencia de rompe olas múltiples  $G \frac{X}{L_s^2} > 0.5$

Donde  $L_s$  es la longitud del rompe olas y  $X$  es la distancia con respecto a la costa,  $G$  es el ancho de espaciamento entre estructuras, y el coeficiente de transmisión  $K$  es definido para condiciones de oleaje anual. Observar en la Fig. 3.4. Esquema estandar de estructuras sumergidas.

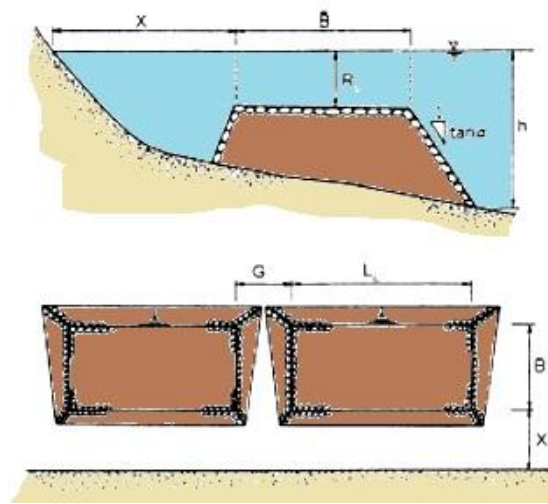


Fig. 3.4. Esquema estandar de estructuras sumergidas

Tómbolo

$$\frac{L_s}{X} > \frac{(1.0 \text{ a } 1.5)}{(1 - K_r)} (1.0 \text{ a } 1.5) \quad \text{ó}$$

$$\frac{X}{L_s} < \left(\frac{2}{3} \text{ a } 1\right) (1 - K_r) \quad \text{ó}$$

$$\frac{X}{(1 - K_r)} < \left(\frac{2}{3} \text{ a } 1\right) L_s$$

Saliente

$$\frac{L_s}{X} < \frac{1}{(1 - K_r)} \quad \text{ó}$$

$$\frac{X}{L_s} > (1 - K_T) \quad \delta$$

$$\frac{X}{(1 - K_T)} < L_s$$

Para salientes cuando hay rompe olas múltiples.  $G \frac{X}{L_s^2} > 0.5(1 - K_T)$

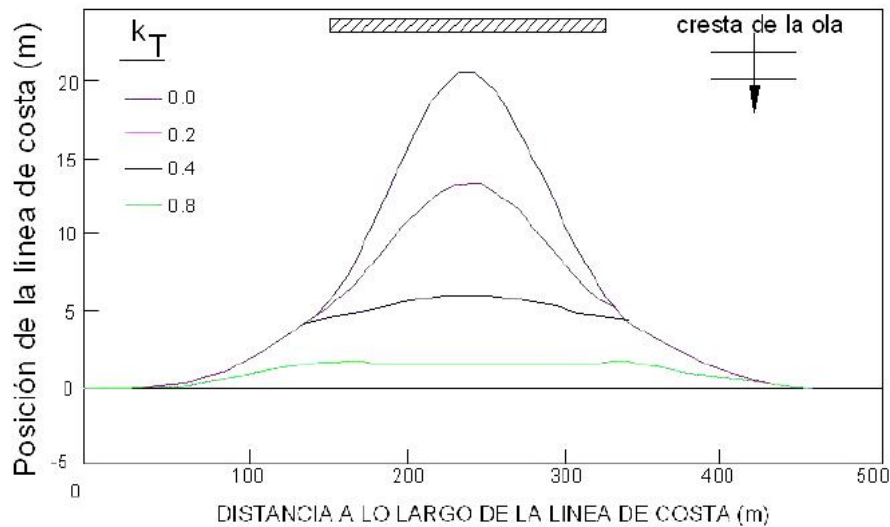
El ancho de espacimientos es usualmente  $L < G < 0.8 s L$ , donde  $L$  es la longitud de la ola en la estructura definida como  $L = T(gh)^{0.5}$ , donde  $T$  es el periodo de la ola y  $h$  es la profundidad de la ola rompiente.

Uno de los primeros documentos para obtener los criterios para rompeolas segmentados incluyendo transmisibilidad fue hecho por Hanson and Kruse (ver figura 3.5) basados en y simulaciones numéricas y con la verificación de algunos datos y prototipos existentes, ellos desarrollaron el siguiente criterio para un rompeolas separado individual.

Para una Saliente  $\frac{L_s}{L} \leq 48(1 - K_T) \frac{H_0}{h}$

Para un Tómbolo  $\frac{L_s}{L} \leq 11(1 - K_T) \frac{H_0}{h}$

Donde  $L_s$  es la longitud del segmento de la estructura,  $X = nh =$  distancia a la línea de costa original ( $n$  es el gradiente en el fondo),  $h$  es la profundidad de la ola rompiente  $H_0$  es la altura de ola en aguas profundas,  $L$  es la longitud de la ola rompiente. Ver Fig. 3.5 Ejemplo numérico de la respuesta de la línea de costa como una función de transmisión y verificación de los criterios propuestos.



**Fig.3.5. Ejemplo numérico de la respuesta de la línea de costa como una función de transmisión y verificación de los criterios propuestos, según Hanson y Kruse 1990**

Estos criterios pueden ser usados de forma preliminar en el diseño para distinguir la respuesta de transmisibilidad de la línea de costa para un simple rompe olas segmentado. Sin embargo, la validación

de estas ecuaciones aun no se considera del todo confiable, por lo que para conocer mejor la respuesta de la línea de costa, se recomienda emplear algún modelo numérico de largo periodo con el cual se pueda predecir de manera más significativa los resultados morfológicos.

### 3.2.2 Regeneración de playas.

Durante los años 80's y 90's, la principal vía de actuación para el mantenimiento y la gestión del litoral era la construcción de estructuras fijas (rompeolas, diques, espigones). El objetivo principal de estas obras era alterar la dinámica marina, reduciendo de este modo la tasa de erosión. Estas estructuras, junto con un pequeño aporte de sedimento, permitían la restauración de espacios litorales deteriorados. Sin embargo, este tipo de obras interrumpe también el transporte de sedimento en la costa, llegando a generar erosión en zonas aledañas. Actualmente, la tendencia hacia las llamadas soluciones blandas es clara, la regeneración del litoral se realiza, fundamentalmente, a través del aporte de un volumen de arena capaz de compensar la erosión, de este modo se extiende la playa y la zona de surf aguas adentro, favoreciendo la función protectora de la playa frente a los temporales y a la vez, aumentando la superficie de playa seca para su aprovechamiento turístico. La función principal de un proyecto de alimentación de playa es proporcionar la protección a estructuras arriba de la costa e infraestructura de los efectos de las tormentas. La berma y duna actúan como una barrera protectora de las estructuras costeras ante el agua y las olas. Los sitios con poca o ninguna barrera de arena son candidatos para proyectos de protección de costa.

#### 3.2.2.1 Criterios de diseño.

La existencia de áreas de préstamo adecuadas es determinante en el costo final del proyecto y, por tanto, en su viabilidad. Los requisitos principales que debe cumplir son: proximidad a la zona de actuación, características sedimentarias adecuadas y volumen de arena suficiente.

La forma de transporte de la arena, así como la distancia desde la zona de préstamo hasta la playa encarecen el coste final del proyecto. Así, para las fuentes terrestres (depósitos fluviales o marinos antiguos) el transporte se lleva a cabo en camiones, siendo una de las formas más costosas, y generando un deterioro añadido en las carreteras. Sin embargo, se acepta como una opción efectiva en la fase de mantenimiento de una regeneración, donde se requieren aportes continuos de un volumen bajo de arena. Una opción más económica es la explotación de depósitos sedimentarios en zonas de marismas, puesto que los sedimentos se encuentran cercanos a la playa y pueden ser trasladados mediante una tubería. Sin embargo, estos sedimentos suelen tener un tamaño de grano demasiado fino, no siendo estables en un relleno. Los sedimentos dragados en los canales de navegación pueden ser también una opción módica, puesto que el material dragado debe eliminarse del canal de navegación, su transporte a otras zonas se contempla en el propio proyecto de dragado tratando de combinarse, en la medida de lo posible, con un proyecto de regeneración del litoral; por último, los sedimentos situados costa fuera son utilizados habitualmente en la realimentación de playas, puesto que las fuentes terrestres son escasas, la tendencia se ha desplazado hacia estas zonas donde son frecuentes grandes depósitos arenosos a profundidades entre 15 y 25 m, es fundamental que el material extraído esté localizado a una distancia costa fuera suficiente, tal

que la arena aportada a la regeneración no retorne al área de préstamo; en la mayoría de los casos, las zonas de préstamo se sitúan a unos 2 km de la costa, aguas adentro de la profundidad de cierre de la playa.

Existen tres posibles arenas de préstamo para un proyecto de regeneración: arenas artificiales, arenas seminaturales y arenas naturales. La primera de éstas es arena de machaqueo, más gruesa y angulosa, por lo que disminuye la calidad de la playa, su precio es elevado, dependiendo del tamaño de grano del material cuanto más gruesa es la arena, más barata; esta opción se utiliza únicamente cuando no existe otra solución posible. Las arenas seminaturales proceden de la descomposición del granito, donde los feldespatos se caolinizan y los granos de cuarzo quedan sueltos. La presencia de un elevado porcentaje de arcillas o la no descomposición total de los feldespatos puede ser un inconveniente importante para su utilización en la regeneración de playas.

Por último, las arenas naturales son la fuente más apreciada en una alimentación, tanto por su forma redondeada como por su bajo precio. En la selección del sedimento idóneo para un proyecto de regeneración, la relación entre el diámetro medio del sedimento de relleno y el de la arena nativa se convierte en un parámetro crítico de diseño, esta relación determinará el volumen total de arena necesario, cuanto más grueso es el sedimento, el perfil de playa adquiere mayor pendiente, siendo necesario menor volumen de arena para establecer un ancho determinado de playa, en un caso extremo, si el sedimento es demasiado fino, puede que no se produzca un aumento en la playa seca después de que el relleno ha alcanzado su posición de equilibrio. Un tamaño de grano de préstamo igual al de la arena nativa se considera sinónimo de calidad. La realimentación con arena sólo ligeramente más pequeña que la arena nativa puede resultar en anchuras de playa seca significativamente menores comparadas con arenas del mismo tamaño o mayores que la arena nativa.

Por tanto, las características del sedimento nativo y de préstamo determinarán el volumen de arena total necesario en la regeneración en un tramo del litoral, así, el área de préstamo seleccionada debe cubrir las necesidades de arena planteadas en el proyecto.

En cualquier regeneración se debe llevar a cabo un estudio previo para identificar zonas de préstamo potenciales ya que esto determina, en parte, el diseño del proyecto y los aspectos económicos del mismo, la exploración debe determinar los límites del depósito, el espesor del sedimento útil y las características sedimentarias.

### 3.2.2.2 Funcionamiento dinámico

La acción del rompimiento de olas, erosionan la berma y transportan la arena fuera de la costa y a lo largo de la playa, la arena desplazada fuera de la costa durante la tormenta puede ahora ayudar a disipar la energía de la ola; esto frecuentemente forma un sistema de barra paralela a la costa

Un proyecto de alimentación de playa típicamente involucra construir una playa más ancha y/o una duna más substancial para reducir los daños por tormenta relativo al nivel del daño. El nivel de la protección de tormenta proporcionada por un proyecto de alimentación no es una medida absoluta debido a las incertidumbres en la frecuencia de tormentas y sus intensidades. Siempre existe el riesgo, de que una tormenta cause daños en propiedades aún con el proyecto, el nivel de protección se ve reducido continuamente si no se ejecutan las actividades de mantenimiento después de las tormentas, o si este no es el adecuado.

Periódicamente, se deben de ejecutar actividades de realimentación de acuerdo a un programa específico. La playa más ancha creada a través de la construcción de un proyecto de alimentación también proporciona beneficios recreativos.

### 3.2.2.3 Características de proyecto.

Los proyectos de alimentación de playa típicamente suponen la construcción de una o varias de las características siguientes: berma, duna, alimentación de playa, berma cerca de la costa, estabilización de duna (por ejemplo cercas de arena o vegetación), o la estabilización estructural (espigones). Existen también varios aspectos de un proyecto de alimentación de playa que dirigen la duna/berma. Éstos incluyen: realimentación periódica, alimentación adelantada, y mantenimiento de emergencia.

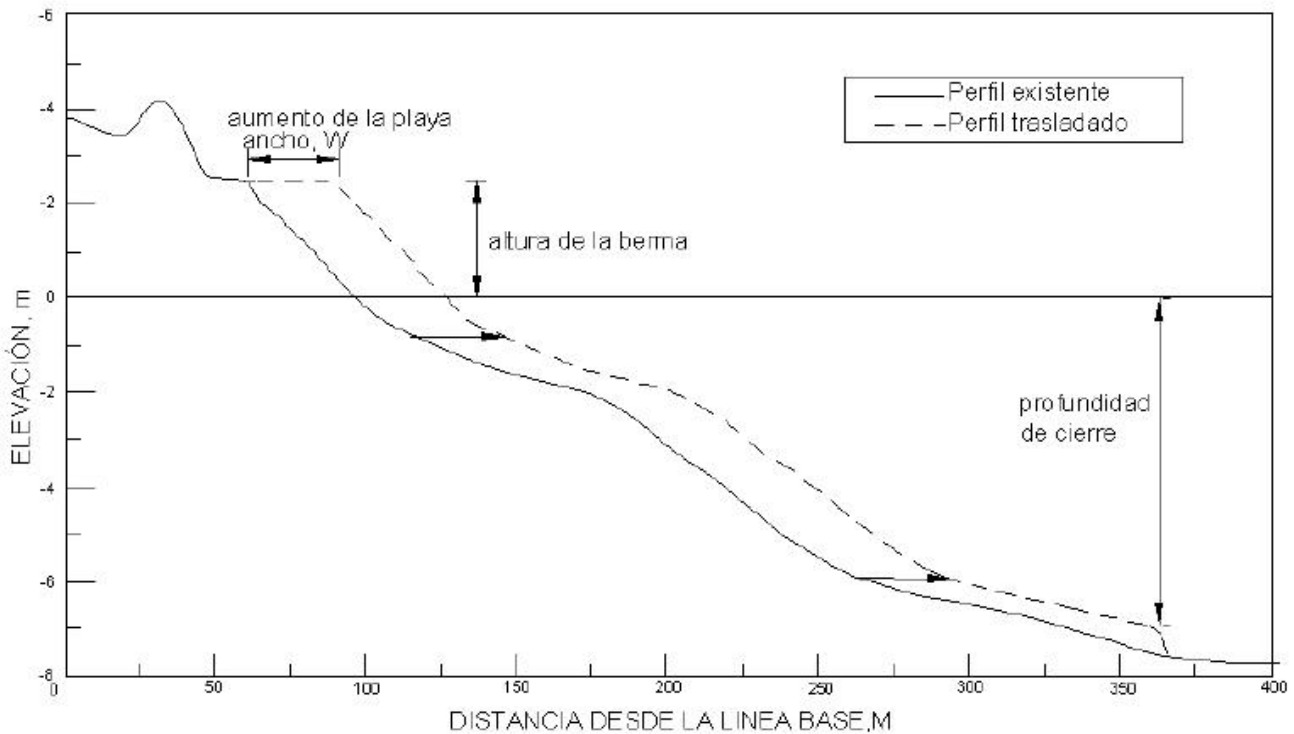
El proyecto de alimentación sugiere ensanchar la playa para crear una barrera de arena más ancha para disipar la energía del oleaje de tormenta. La magnitud del ancho deseado es determinada en base al nivel de protección requerido durante la presencia de una tormenta, la persistencia de erosión y el intervalo de realimentación. El diseño del ancho de la berma es determinado a través de un proceso iterativo que evalúa los beneficios económicos como una función de la anchura. La elevación de la berma construida es normalmente establecida a la misma elevación de la berma natural, o ligeramente más alta. Si la berma es construida a una elevación inferior que la de la cresta de la berma natural, se puede crear una cordillera a lo largo de la costa, que durante la presencia de tormentas puedes ser rebasada por el oleaje causando un estancamiento temporal no deseado sobre la playa.

Para razones prácticas, durante la construcción de la berma de playa, el volumen total de relleno requerido para avanzar la berma al ancho deseado está situado en un punto de la playa.

Este método de construcción, a veces hace referencia al método "over-building", que permite el uso de equipo estándar para el movimiento de tierra, para la distribución del relleno y minimizar el traslado del punto de descarga. El método también permite la verificación efectiva de volumen en secciones de relleno que ha sido puestas en la playa por el contratante usando las técnicas estándar de movimientos de tierra. El resultado de esta técnica de construcción en una berma de playa que es inicialmente más ancha considerablemente que la anchura de diseño de objetivo (del orden de 3 veces más grande), ya que el material depositado no se ajusta inmediatamente después de la construcción, especialmente durante las primeras temporadas de tormenta; la figura 3.7 proporciona una ilustración esquemática del perfil de playa preproyectada, la berma de la playa después de la construcción y el diseño esperado de la berma después del equilibrio de la costa.

### 3.2.2.4 Diseño de la forma del perfil.

El diseño de la forma del perfil como se muestra en la Fig. 3.6, se requiere determinar para estimar el volumen requerido de relleno para la sección transversal y como condición para modelar la erosión por tormenta inducida. Para obtener el diseño de la duna y la plantilla de la berma sobre la playa, se debe considerar contar con la arena suficiente para alimentar el perfil completo fuera de la profundidad de cierre.



**Fig.3.6 Ejemplo de un perfil de diseño para un relleno de playa**

Mientras que las dimensiones de la berma y la duna son determinadas a través de la optimización, la forma del perfil de diseño de la playa bajo la berma es una función de la morfología local y del tamaño del grano de relleno. La morfología local de la playa es frecuentemente un sistema de barra cerca de la costa, el cual puede ser escaso o nulo en erosiones estresantes de las playas, en tales casos, una berma también puede ser ausente desde el perfil, o puede estar a una elevación debajo de la natural; un aspecto clave importante de definir el perfil de diseño es reconocer si el proyecto de playa refleja una condición natural requerir por el sedimento. En estas situaciones, la forma del perfil de diseño puede ser definido por playas cercanas examinadas que son saludables en términos del suministro de sedimento disponible, los datos de perfil de las playas adyacentes dentro del dominio del proyecto, o datos desde el sitio cerca que está expuesto a una ola y condiciones de marea similares, así como características del tamaño del grano.

### 3.2.3 Construcción y restauración de dunas

Las dunas costeras no solo son características del paisaje de la costa, estas existen en conjunción con la playa y son parte del sistema de distribución de arena que activamente generan intercambios material arenoso entre las dunas, la playa y el mar; en zonas donde el abastecimiento de arena es adecuado, las dunas costeras alcanzan su forma más optima, sin embargo en las regiones donde el abastecimiento es limitado o no nulo, con frecuencia se sufre del rebase de las aguas oceánicas ante la presencia de eventos meteorológicos extraordinarios.

Dunas costeras ocupan un nicho ecológico que es la transición entre un severo entorno salino y de mar abierto y otro menos severo protegido primariamente por la cresta que conforman las dunas. Las dunas naturales están colmadas de huecos, cordilleras, irregularidades, erupciones y laderas con vegetación. La ubicación y las dimensiones de las dunas en el perfil se relacionan con la historia del desarrollo de la costa. Es decir, bajo condiciones de azolvamiento, más grandes son las dunas tierra adentro y se logra un avance de las dunas, generándose su extensión en el borde superior de la playa; en procesos de erosión, las dunas activan el retiro de material, generando cambios al interior de la playa en la medida en que se presente suficiente arena. Sin embargo, si la erosión es muy grave, o no hay espacio para el paso a las dunas de la costa hacia tierra adentro, las dunas no persisten.

Las dunas costeras continúan desempeñando su función natural no solo como el almacenamiento de arena, sino que también proporcionan una barrera natural para el embate de las marejadas y las inundaciones. Así pues, ofrecen una estética natural, y el componente de protección costera.

Debe definirse con principal interés un programa de gestión para la creación y restauración de dunas costeras para proporcionar protección a las comunidades y sus pobladores de las regiones de Cancún, zona turística de la Riviera Maya y Cozumel.

#### 3.2.3.1 El sistema dunar de la playa: Funciones, valores y limitaciones

La formación de dunas es el resultado de la acumulación de material arenoso que es retenido en su desplazamiento generado principalmente por el viento, esta obstaculización de la arena es producida por vegetación adaptada al medio climático, reduce la velocidad de los vientos e impide la continuidad del desplazamiento de los sedimentos, generando una acumulación local de arena, la cual, se va acrecentando con el paso del tiempo funcionando como depósito de arena de playa y con alineamiento paralelo a la línea de costa. La conformación de una duna funciona como una barrera flexible con la capacidad para proteger del oleaje y de la marea de tormenta generada en condiciones meteorológicas extraordinarias a las zonas continentales costeras.

La carencia de vegetación en las dunas, permite que el viento que sopla en diferentes direcciones, desplace el material de playa sin restricciones, lo cual, en mediano plazo produce la extinción de esta barrera natural, desprotegiendo la plataforma continental adyacente a la costa.

Durante la presencia de tormentas, las playas se ven erosionadas debido principalmente a las fuertes corrientes que son generadas por el oleaje de magnitudes extraordinarias, la arena desplazada de la playa es depositada mar adentro, en donde la hidrodinámica del oleaje carece de influencia sobre la arena, mientras tanto, de forma natural la playa sustituye el material retirado con un volumen equivalente de los depósitos de material de arena (dunas) siempre que las dimensiones de la duna lo permitan. Así, las dunas, la playa y las Dunas, actúan como una unidad dinámica integral.

Las dunas son estructuras de naturaleza frágil, por lo que se requiere brindar particular cuidado en su protección, restauración y construcción, ya que el descuido de estos trabajos perturba el equilibrio natural, ocasionando daños y deterioro en el sistema.

La región de Cancún, Zona Turística de la Riviera Maya y Cozumel, se ubica en una zona ciclógena de alta frecuencia y de magnitudes severas para la vulnerabilidad de las playas, por lo que resulta

muy importante que estas regiones cuenten con esta barrera natural que proporcionan las dunas, para ello, es indispensable identificar los perfiles costeros que se presentan en cada región mencionada y en base a este análisis, determinar el grado de deterioro de la Duna; para atender los diferentes grados de deterioro, se recomiendan y describen las siguientes actividades.

- Restauración de dunas ligeramente dañado
- Construcción de las Dunas
- Protección de dunas.

**Restauración de dunas ligeramente dañado:** Las dunas de arena son fácilmente desplazadas por la acción del viento y del oleaje, y como consecuencia sus condiciones de estabilidad son rápidamente alteradas.

Las dunas ligeramente dañadas, pueden ser reparadas con la plantación de vegetación en las áreas más erosionadas o en donde no exista esta flora compuesta primordialmente por pastos, acompañada por fertilizantes que auxilien en el buen crecimiento y mantenimiento de la vegetación plantada y mantener en resguardo las zonas restauradas del tránsito de cualquier tipo de actividad que dañen o impidan la correcta restauración.

El elemento fundamental es la colocación de vegetación, ya que la estabilización de las dunas depende principalmente de la cantidad de arena que es acumulada en esta región, y de no existir un elemento que limite el desplazamiento, la arena desplazada continuara su deterioro.

Es de primordial importancia la selección de especies vegetales que serán empleadas para restablecer las áreas dañadas de las dunas, estas especies deben ser capaces de sobrevivir al paso erosivo de la arena, al casual entierro, a la brisa e inundaciones de agua salada, el calor, la sequía y un limitado suministro de nutrientes; por lo que son pocas las especies de plantas que soportar este tipo de intemperismo.

**Construcción de las Dunas:** Cuando no existe una duna de barrera, esta puede ser construida empleando material de dragado reacomodado por maquinaria pesada o por procesos naturales con la construcción de trampas de arenas que puede ser compuesto por vallas o vegetación. La construcción de dunas con vegetación es un proceso más económico que el uso de equipo pesado, además de que naturalmente se redirecciona en caso de ser construida muy cerca del océano o en otro lugar inadecuado.

**Equipo pesado y dragado.:** Empleando material de dragado de características adecuadas, se puede construir una duna costera bajo un proceso de construcción meramente sencillo. El material arenoso es colocado en la playa y distribuido por maquinaria pesada proporcionando la forma de la duna diseñada. Este procedimiento es muy rápido en relación con el tiempo en que se forma una duna por procesos naturales, sin embargo, el equipo pesado y las actividades de dragado en conjunto son muy costosos y perjudiciales para el medio ambiente costero, usualmente estas actividades se recomiendan solo cuando se requiere obtener beneficios en el corto plazo, sin embargo, se debe de considerar que las actividades deberán continuar hasta generar la estabilidad de la duna por medios naturales.

**Vallas de arena y vegetación:** La mejor ubicación de las Dunas es donde se permita un libre funcionamiento de las variaciones de marea ordinarias, debido a que la duna es una barrera de acumulación de arena, esta se extiende hacia el mar, por esta razón es requerido el suficiente espacio entre la barrera y la parte oceánica, algunas playas fuertemente erosionadas no tienen suficiente espacio para emplear pastizales con éxito en la construcción. Cuando existe una distancia adecuada entre el océano y los bienes a ser protegidos, las dunas con vegetación proporcionan una valiosa protección ante las incidencias



extraordinarias del oleaje producido por las tormentas. El primer paso para el establecimiento de las dunas es proporcionar una trampa de arena en la ubicación en donde se desea construir la duna, una estructura de eficiencia comprobable son las vallas, las cuales generan zonas de baja velocidad del viento, lo que incita al depósito de arena en sus zonas adyacentes. La cantidad de arena retenida, depende de la altura de la valla, el espaciamiento entre las barras y la velocidad del viento.

La valla es una cerca preferentemente de madera aun que existen de textiles que se componen de una serie de barras equidistantes o mallas. Ejemplo de vallas se muestra en la Fig. 3.7.y 3.8 respectivamente.

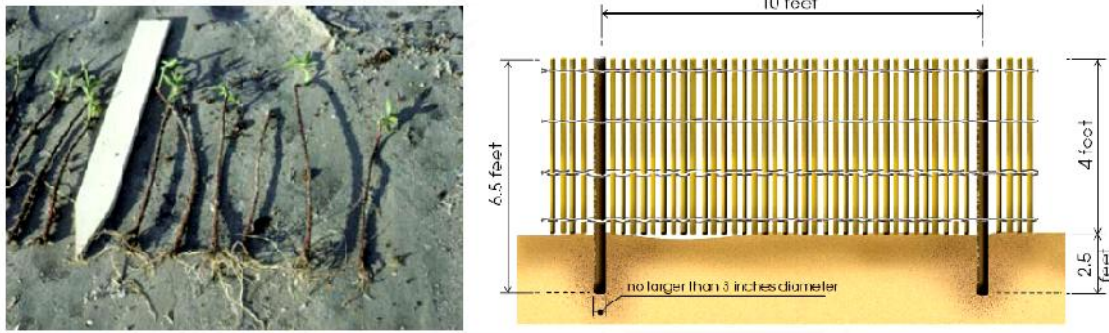


**Fig. 3.7. Ejemplo de vallas de madera y textiles para la construcción de dunas**



**Fig.3.8 Colocación y posicionamiento de vallas para la formación de dunas costeras**

La ubicación inicial de la cresta de la duna se posiciona varios metros tierra adentro, paralelo a la línea de marea alta, en donde se coloca la valla con altura recomendable de 1 ft (0.3048mts) con la finalidad de generar la acumulación de la arena. Este procedimiento se realiza varios meses antes de la trasplatación de vegetación, con el objetivo de formar la acumulación de arena sin que la vegetación sea enterrada. Las vallas deben ser evitadas en zonas donde especies como las tortugas marinas puedan anidar. (Ver Fig.3.9. Detalles de los elementos que conforman una valla de madera, comparación con vegetación empleada también en estos procesos.)



**Fig.3.9. Detalles de los elementos que conforman una valla de madera, comparación con vegetación empleada también en estos procesos**

Las vallas mitigan la velocidad (ver, Fig. 3.10. Formación de dunas costeras, y sembrado de pastizales para ofrecer estabilidad) de los vientos permitiendo las formaciones de arena a lo largo de la valla, como se observa en las figuras siguientes; cuando el montículo alcanza la altura de la valla, se coloca la vegetación adecuada para continuar con el proceso hasta que alcance la altura de diseño.



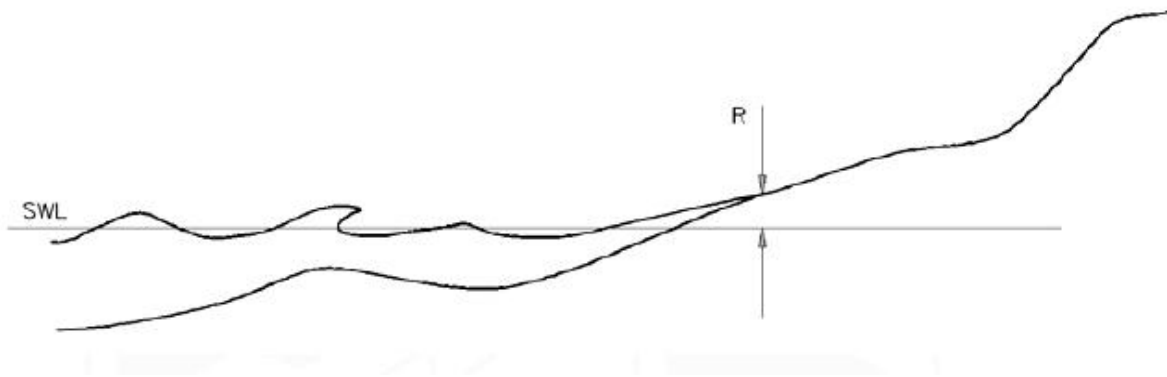
**Fig. 3.10. Formación de dunas costeras, y sembrado de pastizales para ofrecer estabilidad**

**Protección de dunas.:** Aun que la vegetación empleada en la construcción y restauración de dunas puede soportar duras condiciones de intemperismo, su estructura es muy frágil al tráfico de vehículos y de peatones, ya que estas actividades provocan que se aplasten los brotes de plantas y raíces, el rodamiento de neumáticos, a menudo conduce a una eliminación de arena mayor a la que produce el viento, esto aunado a que la compactación de arena inhibe la infiltración de agua, conlleva a una erosión más acelerada en época de lluvia y un incremento de daños en época de sequía. Por tal motivo es requerido que se restrinja o prohíba el acceso a la zona de dunas, medidas con las cuales se puede prescindir de otras acciones para el control de arena; sin embargo, algunas zonas tendrán que soportar el trafico, para proteger las dunas de estas acciones, se deben designar zonas de acceso a la playa o cruces. (Ver Fig. 3.11 Resultados finales en la construcción de dunas por procesos naturales).



**Fig. 3.11 Resultados finales en la construcción de dunas por procesos naturales.**

**Altura:** La altura de la duna, es un componente que determina la vulnerabilidad de las zonas interiores a ser inundadas en condiciones de tormenta por el agua del océano, este efecto se produce, cuando el oleaje en forma conjunta con la marea de tormenta, rebasan a la duna, pasando por encima de ella (overtopping); otro valor que se requiere considerar para el diseño de la altura de la duna es el runup (Ver Fig. 3.12 Esquema de runup sobre la playa), este fenómeno es descrito como el avance de la ola posterior a la rompiente sobre el perfil de playa, este valor es descrito también como el lamido de la ola, el cual, se debe estimar, ya que la fuerza de arrastre que posee este efecto, puede modificar las condiciones de la duna.

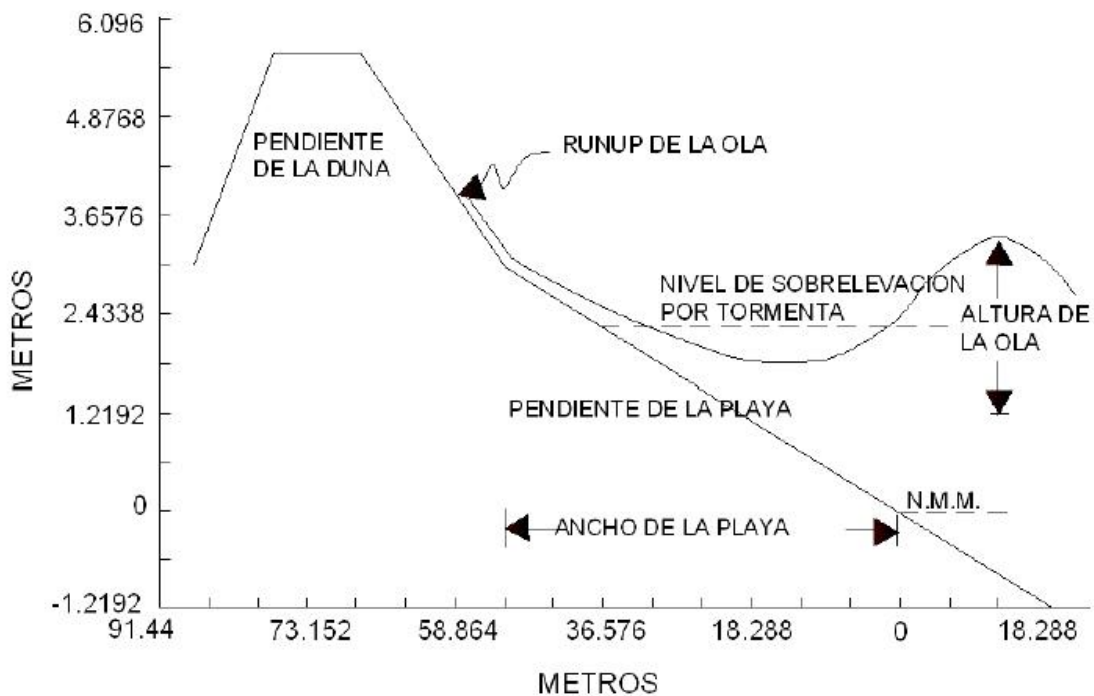


**Fig. 3.12 Esquema de runup sobre la playa**



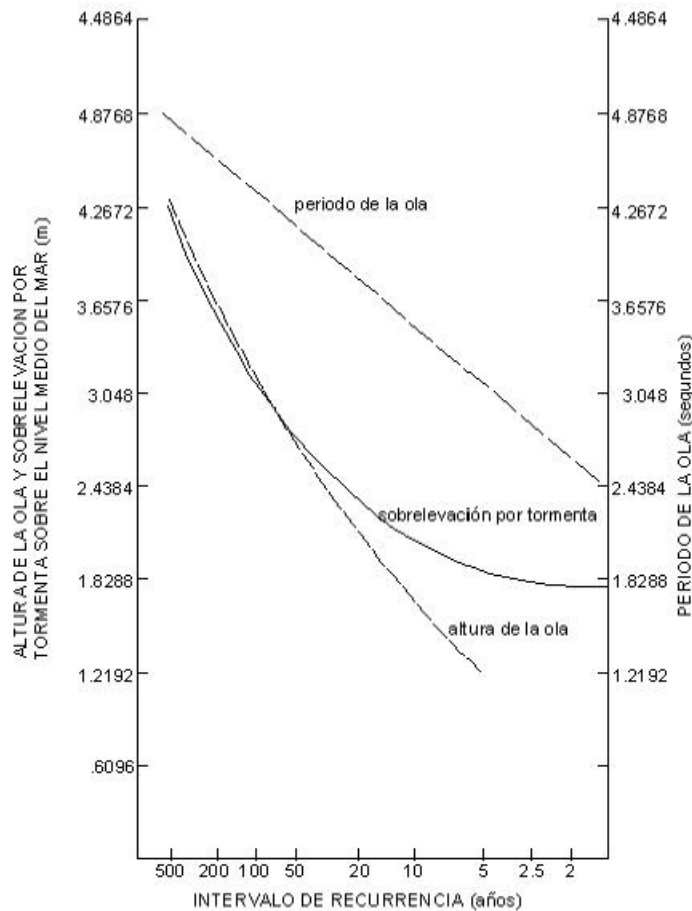
**Fig.3.13 Factores considerados en la delineación de la administración distrital de la duna**

En la Fig.3.13 Factores considerados en la delineación de la administración distrital de la duna, se observa que la altura de la Duna no es igual a la elevación del runup; la Altura de la duna es la diferencia entre el punto más alto en el perfil y la máxima elevación de la playa. A fin de determinar la altura mínima de las dunas necesaria para prevenir el rebase (overtopping) en una tormenta de una determinada frecuencia de ocurrencia, el diseño de la altura de una nueva playa, se resta de valor del runup previsto. Ver Fig.3.14 Componentes del procedimiento para el cálculo de Runup



**Fig.3.14 Componentes del procedimiento para el cálculo de Runup**

Los procedimientos para estimar el runup son referidos en diferentes bibliografías, particularmente se recomienda emplear los métodos descritos en el Shore Protection Manual, los principales componentes para estimar este valor son: el perfil costero (ancho, pendiente, etc.), altura y periodo de la ola en aguas profundas, y sobre-elevación por tormenta y la frecuencia de ocurrencia de estas características en condiciones extraordinarias, en la Figura 3.15, se muestra un grafico con el cual se puede estimar el intervalo de ocurrencia de altura, periodo de ola, y sobre-elevación por tormenta, esto significa que el diseño de la altura de la duna corresponderá a un nivel mínimo sobre el nivel del mar requerido para evitar el rebase (overtopping) en una tormenta con determinada frecuencia de ocurrencia.



**Fig.3.15 Información de la ola y sobre-elevación por tormenta usada en el cálculo del Runup (Source; U.S. Army Corps of Engineers, 1976 and Thompson, 1977)**

**Ancho:** Con la predicción los índices de erosión para cada tormenta individual, en función del análisis de frecuencia, es posible determinar los requerimientos de anchura de una duna, que satisfaga los



índices de erosión que se presenten en la costa, por lo que, la variación espacial del runup que existe a lo largo de la línea de costa, requiere ser considerado para el diseño de dunas. Con estos criterios, se puede relacionar la altura de la duna con los datos de anchura obtenidos para los valores de un runup de la tormenta de diseño. Sin embargo, un análisis de los modelos disponibles, (Edelman, 1969; Vallianos 1974) para predecir los índices de erosión, asociados con tormentas individuales, concluye que estos modelos son aún muy sencillos para considerar los resultados como confiables, por lo que es requerido de otras metodologías. Emplear el concepto de equilibrio dinámico, es una consideración aceptable toda vez que sean considerada las condiciones de equilibrio de la pendiente de reposo del material que conforma la duna. Estos criterios deben ser suficientes para determinar el ancho ideal de la duna, sin embargo, condiciones reales de trabajos de campo muestran que el equilibrio es muy difícil de obtener, ya que el reacomodo natural muestra que para una misma altura de duna en una playa tiene diferentes anchos, Investigaciones en la construcción de dunas artificiales, indican que estas pueden ser construidas casi con cualquier altura o anchura.

A continuación se muestra un estudio en donde se relaciona la altura y ancho de dunas, con un análisis de 99 casos, en donde se incluyen costas en bahías y oceánicas,(Fig.3.16 Duna altura/ancho por regresión lineal)

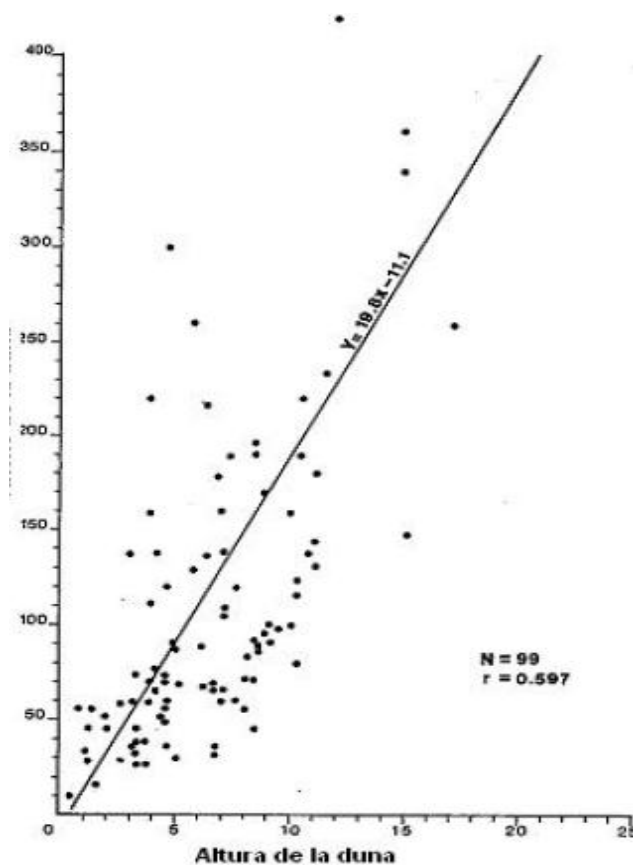


Fig.3.16 Duna altura/ancho por regresión lineal

## **CAPÍTULO IV ESTUDIO DE CASO PLAYA CANCÚN Y LA RIVIERA MAYA**

### **4.1. Introducción**

Las playas de la Riviera Maya, zona turística de Cancún y Cozumel, se localizan al norte del estado de Quintana Roo, en la Península de Yucatán. Es en esta zona donde se sitúa uno de los desarrollos turísticos más modernos e importantes de México, cuya expansión se viene produciendo desde la década de los 70's. Dada la gran afluencia de visitantes y los numerosos empleos directos que se generan, la actividad turística en esta zona es considerada actualmente como parte de una prioridad de la economía nacional. Desafortunadamente el estado de Quintana Roo se ubica dentro de la franja con mayor incidencia de eventos meteorológicos extremos, ocasionado numerosos daños a la infraestructura hotelera y principalmente han contribuido negativamente en la estabilidad de las playas.

Además las modificaciones al paisaje que han sido producidas por la construcción masiva de hoteles, estos eventos han sido de particular importancia por los daños ocasionados a las playas en la Riviera Maya: el huracán Gilberto en 1988 y el Willma en el 2005. Al paso de estos huracanes, se interrumpieron servicios básicos en zonas urbanas como el suministro de electricidad, edificaciones hoteleras y viviendas sufrieron severos daños, las zonas de selva y manglar existentes en la zona padecieron una grave defoliación; de igual forma la barrera de arrecifes se vio afectada. Pero el principal efecto negativo y el que ha causado mayores problemas, es el ocasionado directamente a las playas arenosas, que al haber sido atacadas por olas de gran magnitud, y reflejadas por muchos de los muros verticales construidos en los hoteles, provocaron que los sedimentos se movieran a lo largo de la costa, quedando al descubierto en muchas zonas los estratos calizos rocosos que subyacen a la arena, rompiéndose el equilibrio del transporte de sedimentos.

Desde el paso del huracán Gilberto y a petición del gobierno de Quintana Roo, diversas entidades especializadas como lo son el Departamento de Oceanografía de la Comisión Federal de Electricidad, el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Centro de Información Geográfica, han realizado diferentes estudios con el fin de entender la compleja dinámica costera, los esfuerzos realizados en este sentido no han sido suficientes y aún no se tiene claridad sobre la problemática de la erosión y pérdida de playas en la Riviera Maya. Por lo tanto, es necesario realizar un mayor número de estudios que permitan aclarar la dinámica costera y posteriormente poder proponer las estructuras de protección más prometedoras en cuanto a efectividad – costo.

### **4.2. Antecedentes**

La historia de Cancún es relativamente reciente. Este destino surgió en el escenario turístico a principios de la década de los 70's, luego de que el presidente Díaz Ordaz encargara al Banco de México un Plan Nacional de Turismo. En pocos años, tuvo una notable transformación, ya que de ser una isla de pescadores rodeada de selva virgen y playas poco conocidas, pasó a ser el centro turístico mexicano más reconocido en el mundo. Su paisaje, su creciente infraestructura hotelera y la promoción que ha recibido, lo han convertido en uno de los sitios turísticos más famosos a nivel internacional. Anualmente es visitado por más de 7 millones de turistas de todo el mundo, existen más de 70,000 cuartos de hotel y la industria turística genera más de 40,000 empleos directos con una derrama económica superior a los cinco millones

de dólares anuales. En el caso de Playa del Carmen, hasta mediados de los años ochenta era un pequeño pueblo de paso con menos de 1,500 habitantes, pero en las últimas dos décadas se ha transformado vertiginosamente al ritmo del crecimiento del turismo y en la actualidad ofrece una serie de atracciones en sus alrededores como son: Xcaret (parque ecológico acuático), Cozumel (isla ubicada al frente de Playa del Carmen) y Tulum (zona arqueológica maya ubicada en la costa). Dentro de Playa del Carmen se ha desarrollado el complejo turístico hotelero Playacar, donde cadenas hoteleras internacionales han construido resorts.

La destrucción ocasionada por los huracanes ocurridos en los últimos años, especialmente en las zonas del Caribe Mexicano y en América Central, se ha caracterizado por cambiar constantemente las configuraciones costeras. En el caso particular de Cancún y la Riviera Maya. A continuación se presentan de manera cronológica algunos eventos sobresalientes en la historia de Cancún y la Riviera Maya y los que han incidido en la problemática de pérdida de playas:

- En 1968 el presidente Días Ordaz encarga al Banco de México un plan Nacional de Turismo.
- En 1969 el banco de México crea Infratur para estudiar las zonas con el mayor potencial para el turismo, quedando como áreas seleccionadas Quintana Roo e Ixtapa Zihuatanejo.
- 1970: Como parte del Plan Maestro que dio origen a Cancún, se tuvo que engrosar la isla barrera hasta un mínimo de 250 a 300 metros, para que cupieran los grandes hoteles y se pudiera instalar lo que hoy se conoce como el campo de golf Pok Ta Pok.
- 1972: Se coloca la primera piedra del primer hotel, el Cancún Caribe, de 208 cuartos y 23 cabañas.
- 1973: Se autoriza la construcción de un canal que conectara el mar con las lagunas y de esta forma mejorar la calidad ambiental de las mismas que empezaban a contaminarse. Hoy día se conoce como canal Sigfrido y se localiza a un costado del Puente Calinda.
- 1974: Se inauguran los hoteles Cancún Caribe y el Playa Blanca. Inicialmente no contaban con agua potable ni sistemas de drenajes, por lo cual se construyeron fosas sépticas. Se continúa con la construcción masiva de hoteles, invadiendo la duna y hasta las mismas playas. La red de drenaje en el subsuelo se ve afectada por las cimentaciones de las nuevas y numerosas estructuras. Se cierran bocas naturales impidiendo la interacción entre el mar y las lagunas costeras.
- 1988: El paso del huracán Gilberto de categoría 5 en la escala Saffir-Simpson el 13 y 14 de septiembre afecta drásticamente el norte de la Península de Yucatán, en particular a Cancún. Se presentaron vientos de más de 320 km/h la madrugada y mañana del 14 de septiembre, el ojo pasó a poco más de cuarenta kilómetros del centro de Cancún, provocando marejadas que arrasaron casas, hundieron barcos y estrellaron enormes buques cargueros. Las actividades turísticas se detuvieron al 100% por una semana, mientras empezaba el proceso de recuperación y limpieza de los hoteles y la ciudad. Gilberto ocasionó una pérdida sustancial de playa al tiempo que destruyó un millón de hectáreas de bosque tropical y manglar sólo en el estado de Quintana Roo, y cobró 40 víctimas mortales.
- 2005: El 21 de octubre, Wilma tocó tierra en la Península de Yucatán categoría 4, con vientos por encima de las 280 km/h. El ojo del huracán pasó primero sobre la isla de Cozumel, antes de alcanzar la península cerca de Playa del Carmen. Luego se movió lentamente hacia el norte, pasando justo al oeste de Cancún. Cancún resintió sus efectos por más de 60 horas, esto se resumió en la pérdida de las playas de la Zona Hotelera, 100 % del tendido eléctrico en la ciudad dañado, y como consecuencia de esto, inhabilitación del servicio de agua potable. El 19 de mayo de 2006, gobierno federal, estatal y la Secretaría de Turismo entregaron oficialmente las obras de recuperación de 11.5 km de playas erosionadas en Zona Hotelera, con una reposición de 25 m de ancho en arenales. La empresa belga Jan de Nul estuvo a cargo de dicha recuperación. El gobierno mexicano invirtió 235 millones de pesos en los trabajos de dragado y bombeo de arena hacia la zona de playas.



- 2007: El Huracán Dean fue la cuarta tormenta en recibir nombre, tercer ciclón tropical y primer huracán de la Temporada de huracanes en el Atlántico, 2007, así mismo, fue el huracán más intenso registrado en la cuenca del Océano Atlántico desde el Huracán Wilma en 2005. Fue un huracán del tipo denominado “Cabo Verde” y se movió en sentido este - oeste a través del Mar Caribe, después de haber pasado sobre las Antillas Menores donde dejó un saldo de tres muertos, uno en la República Dominicana; y devastaciones en la Península de Yucatán, Hidalgo, Puebla y Veracruz, donde dejó 14 muertos. ( ver Fig. 4.1 Trayectoria de los huracanes a) Gilberto, b) Wilma y c) Dean)

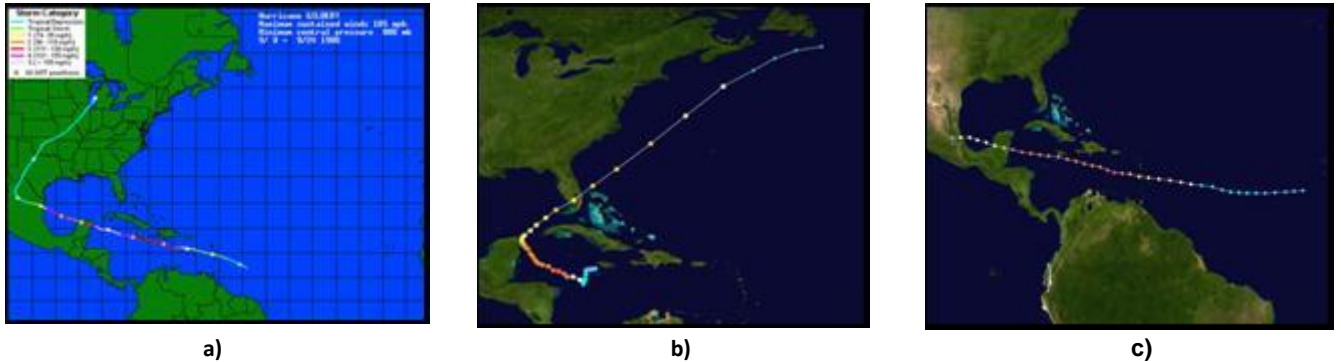


Fig. 4.1 Trayectoria de los huracanes a) Gilberto, b) Wilma y c) Dean. Fuente: internet

Se puede afirmar que el huracán Gilberto fue el evento que alertó sobre la vulnerabilidad de la zona turística, mientras que el huracán Wilma obligó a las autoridades locales y federales a la toma de acciones inmediatas, como lo fue el bombeo de 2.7 millones de m<sup>3</sup> de arena (2006) y la instalación de 1.5 km de geotubos (2007) para regenerar las playas. El huracán Dean (2007) puso a prueba las obras de protección y regeneración que se implementaron en las playas de la isla barrera de Cancún. ( Ver Fig. 4.2 Isla barrera de Cancún y elementos morfológicos del sistema litoral Tulúm – Cancún – Isla Mujeres)

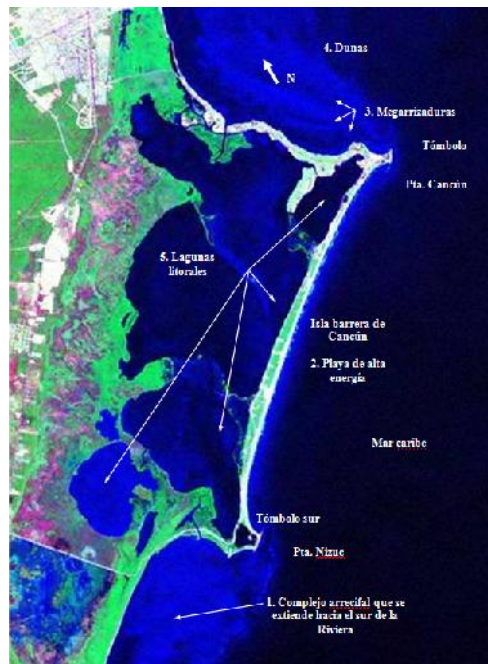


Fig. 4.2 Isla barrera de Cancún y elementos morfológicos del sistema litoral Tulúm – Cancún – Isla Mujeres. Fuente:

### 4.3 Problemática

La problemática que se presenta en las playas de la isla barrera de Cancún y de la Riviera Maya involucra diversos aspectos entre los cuales se deben resaltar los siguientes:

- Hay una alteración de la dinámica y la estabilidad costera, lo que ha ocasionado procesos erosivos y con ello el riesgo de que nuevos eventos deterioren aún más la zona y se afecte la actividad turística.
- Los eventos meteorológicos extremos han dañado tramos de la barrera arrecifal de la Riviera Maya. Esta defensa natural sirve como disipador de la energía del fuerte oleaje que tales sucesos producen y evita también el transporte de la arena mar adentro.
- La zona turística de Cancún y la Riviera Maya se ubica sobre una zona frágil desde un punto de vista medioambiental. Al no considerarse este aspecto, el desarrollo hotelero y turístico ha contribuido en aumentar la problemática.
- Particulares han colocado obras de protección en forma indiscriminada las cuales no obedecen a ningún estudio o diseño previos y que en la mayoría de los casos empeoran la situación.

Dentro de este escenario, la consecuencia ha sido la pérdida progresiva de playa, cuyos anchos se han visto drásticamente reducidos, y el riesgo de que la actividad turística se vea disminuida.

La estabilidad de las playas tiene que ver con el balance de sedimentos. Si en una zona en particular la cantidad de sedimento que entra es igual a la que sale, dicha zona se encuentra en equilibrio. Si llega más sedimento del que sale, se presenta sedimentación y el ancho de playa se incrementa o su profundidad disminuye. Si sale más sedimento del que entra, ocurrirá un proceso erosivo cuya consecuencia será un retroceso de la línea de costa o aumento en la profundidad. Esta última situación es la que se presenta en la zona turística de Cancún y la Riviera Maya.

Los orígenes de la problemática son diversos y entre ellos se pueden citar los siguientes:

- La construcción masiva de hoteles y la consecuente invasión de la duna litoral e inclusive de las playas.
- El cierre de bocas.
- Los eventos climatológicos extremos.
- La pérdida de arrecifes en algunos sectores.

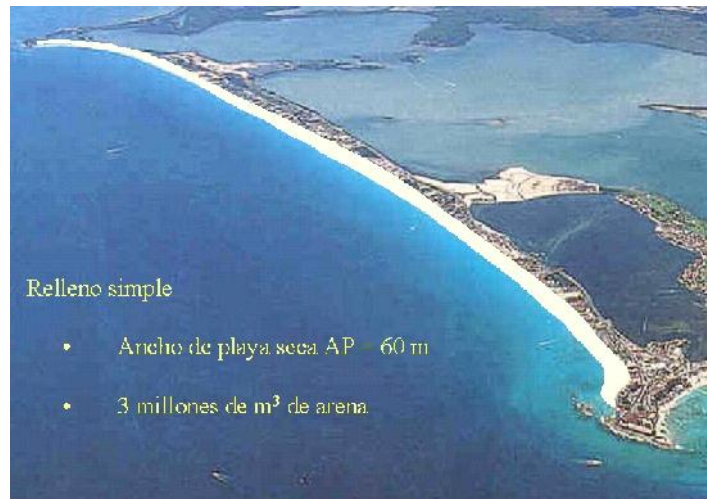
### 4.4 Estudios y propuestas

El Gobierno de Quintana Roo ha solicitado apoyo a diversas instituciones con el fin de realizar estudios que expliquen la problemática de la pérdida de playas y que apoyen a encontrar una solución. A continuación se presentan las instituciones que han participado y los estudios realizados.

#### 4.4.1 Comisión Federal de Electricidad - CFE

A partir de enero del año 2000, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través del Departamento de Oceanografía de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC), ha realizado algunos estudios necesarios para proponer una solución de preservación de las playas de la zona turística de Cancún y la Riviera Maya. El objetivo que se persigue es restablecer en lo posible las condiciones existentes antes del huracán Gilberto, así como mantener la estabilidad de este tramo costero. De esta forma, en el año 2003

se terminó el proyecto ejecutivo titulado: Preservación y Mantenimiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre entre Punta Cancún y Punta Nizuc (actualmente se está actualizando, (ver Fig. 4.3 Perspectiva de implementación).



**Fig. 4.3 Perspectiva de implementación. Fuente: Preservación y Mantenimiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre entre Punta Cancún y Punta Nizuc.**

Este estudio abarcó diferentes tópicos entre los que se cuentan:

- Geofísica. El objetivo principal del estudio fue localizar la(s) área(s) en donde existen bancos de arena con espesor mayor a 1 m, que reúnan las características granulométricas deseadas como relleno de playa, proporcione los volúmenes necesarios y que la presencia de coral vivo, especies móviles y migrantes, pastos marinos así como organismos protegidos sea mínima. De esta forma se hallaron dos bancos para la extracción de arena que son La Ollita y Megarrizaduras, ubicados al norte de la isla barrera de Cancún.
- Topobatimetrías. El objetivo de estos estudios fue el de conocer la morfología del lecho marino y también el de ayudar en la localización de los bancos potenciales de arena.
- Ensayos de granulometría y densidad. Gracias a estos estudios se pudo constatar que el material de los bancos seleccionados correspondía en gran medida al de las playas en donde se llevaría a cabo el bombeo de arena. ( Fig. 4.4 Parte de los resultados granulométricos de la playa)

Bala No.	Abertura (mm.)	B01			B02 - 2M - 23M			B03 - 2M - 11M		
		Peso Ret. Parcial (gr)	% Ret. Parcial	% Que pasa	Peso Ret. Parcial (gr)	% Ret. Parcial	% Que pasa	Peso Ret. Parcial (gr)	% Ret. Parcial	% Que pasa
14	1.168	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.6	0.3	99.7
18	1.000	0.3	0.2	99.9	0.3	0.2	99.8	1.4	0.7	99.0
20	0.833	0.8	0.4	99.5	0.2	0.1	99.7	0.4	0.2	98.8
35	0.417	0.8	0.4	99.1	6.7	4.5	95.2	18.4	9.2	89.6
50	0.297	8.7	4.4	94.7	30.3	20.2	75.0	46.0	23.0	66.6
60	0.250	7.5	3.8	91.0	45.8	30.5	44.5	15.4	7.7	58.9
80	0.180	119.3	59.7	31.3	51.0	34.0	10.5	78.6	38.3	20.6
100	0.147	50.8	25.4	5.9	12.1	8.1	2.4	33.1	16.6	4.1
120	0.125	10.2	5.1	0.8	2.8	1.9	0.5	6.5	3.3	0.8
200	0.074	0.7	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.8	0.4	0.4
Pasa No. 200		0.9	0.5		0.4	0.3		0.8	0.4	
Suma		200.0	100.0		150.0	100.0		200.0	100.0	
Absorción										
Y arena			2.55			2.47			2.42	

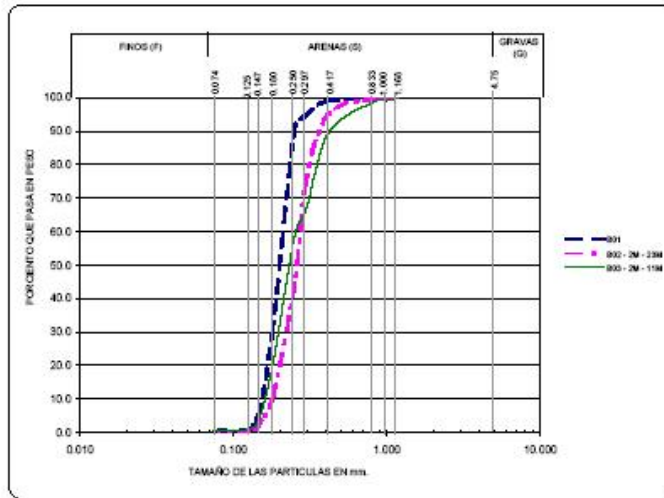


Fig. 4.4 Parte de los resultados granulométricos de la playa. Fuente: Proyecto para la recuperación de la isla barrera Cancún- CFE.

- Modelación numérica. Esta actividad permitió conocer aspectos relacionados con el transporte litoral y transversal de sedimentos y los índices de erosión de las playas. Entre los resultados obtenidos se pueden comentar los siguientes:
- El transporte neto de sedimentos es en la dirección Sur-Norte.
- El resultado de las simulaciones da un transporte transversal, en condiciones de oleaje operacional de 33,00 m<sup>3</sup>/año netos en la dirección de tierra a mar.
- En cuanto al índice de erosión, se consideró un relleno de playa de 35 m y simulando 10 años. Los resultados se presentaron para la zona norte de Cancún, la zona central y la zona sur de la isla barrera.

Zona Norte (entre Pta. Cancún y Sheraton Towers): como consecuencia de la componente longitudinal de transporte de sedimentos existe un movimiento importante en esta zona. Debido a la continuidad de transporte de sedimentos, el material que sale del sistema por Pta. Cancún es sustituido por el que proviene de Pta. Nizuc; por lo tanto, aquí se presenta un menor retroceso que en la zona sur, pero no es tan estable como en la zona central. La tasa de transporte ocasiona un retroceso del orden de 12 m en diez años de simulación.

Zona central (entre Sheraton Towers y Condos Solymar): históricamente esta es la zona más estable, aunque cabe señalar que es la zona más expuesta al oleaje normal, y también lo es al oleaje ciclónico, por lo cual sufre los mayores daños en un evento extraordinario. Sin embargo, su configuración

(playa recta y paralela) ocasiona que se recupere en forma relativamente rápida y tienda a mantenerse en equilibrio dinámico. Esto es claramente visible en los levantamientos topobatimétricos y en las fotografías aéreas realizadas en distintos años. Los resultados de las simulaciones también indican la misma tendencia de equilibrio dinámico, observándose que el retroceso de esta zona es de 6 m durante una década de simulación.

Zona Sur (entre Condos Solymar y Pta. Nizuc): los principales retrocesos del sistema playero de Cancún se presentan en esta zona, principalmente en el área inmediata a la zona de sombra provocada por Pta. Nizuc y la dirección predominante del oleaje que es la dirección Sureste. Esta dirección y la configuración de la punta ocasiona la transformación de las corrientes provocadas por el oleaje; por tanto, la línea de costa retrocede más que en las otras zonas. El retroceso que resulta para diez años es de 14 m.

En este proyecto se contempló la construcción de un relleno simple con arena, desde Punta Cancún hasta Punta Nizuc en una longitud aproximada de 12 kilómetros, sin estructuras de ninguna clase en las zonas de las Puntas. El volumen de dragado y relleno estimado fue de 3 millones de m<sup>3</sup> de arena para lograr un ancho de playa de aproximadamente 60 m (Ver Fig. 4.5 Se presentan los tramos en los que se dividió la isla barrera de Cancún y el volumen de relleno estimado del proyecto). La Figura 4.6 muestra el esquema del proyecto ejecutivo de la Preservación de la Playa de Cancún. El perfil del diseño (relleno), consiste en una berma horizontal de 35 m con una cota +2,5 m (msnmm), más una pendiente dinámica de 25 m de ancho, para un ancho total de playa seca de 60 m. Además, esta figura muestra el perfil de construcción, el cual se verá modificado por la acción del oleaje y las corrientes, adquiriendo entonces el perfil de diseño del proyecto.

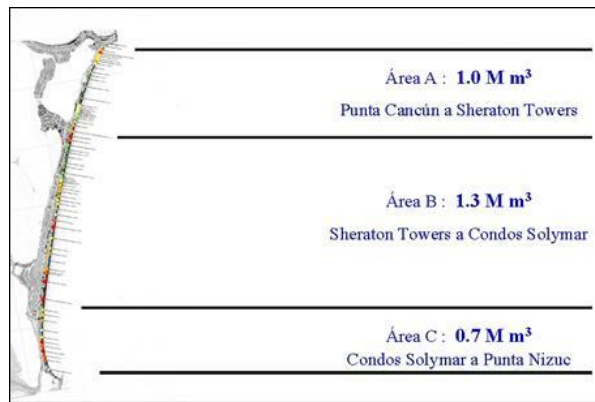


Fig. 4.5 Se presentan los tramos en los que se dividió la isla barrera de Cancún y el volumen de relleno estimado del proyecto. (M m<sup>3</sup>: millones de metros cúbicos). Fuente: Preservación y Mantenimiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre entre Punta Cancún y Punta Nizuc.

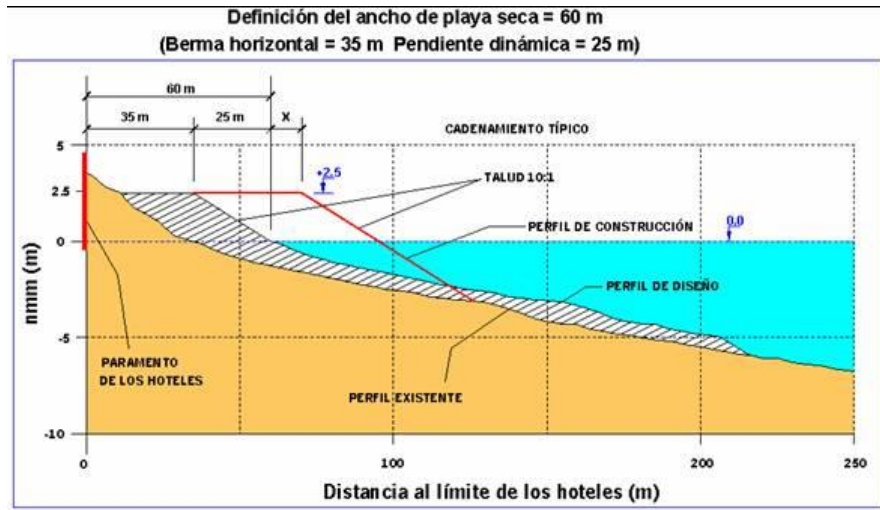


Fig. 4.6 Perfil de construcción y perfil de proyecto en una sección tipo. Fuente: Preservación y Mantenimiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre entre Punta Cancún y Punta Nizuc.

#### 4.4.2 Instituto de Ingeniería – UNAM

El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha realizado diferentes estudios con el afán de aportar en la recuperación de las playas de Cancún y la Riviera Maya. Sobresalen los siguientes:

- Análisis sedimentológico (granulometría, propiedades físicas e inicio del movimiento) de muestras de arena extraídas en campañas de campo en el litoral costero de Q. Roo. Fecha: 2007.

Los resultados del análisis sedimentológico tuvieron como objetivo establecer los parámetros asociados a los sedimentos y que comúnmente se utilizan en los modelos matemáticos del transporte de sedimentos. Además de que esta información ha servido para alimentar los modelos numéricos con que cuenta el Instituto de Ingeniería, puede ser un elemento más de juicio para conocer detalles sobre la dinámica litoral, pudiéndose inferir el sentido del transporte de sedimentos. Se tomaron 100 muestras en 36 sitios (3 corresponden a Pto. Morelos, 11 sobre la isla barrera de Cancún entre Pta. Cancún y Pta. Nizuc, 6 entre Pta. Cancún y Pta. Sam, 2 en las cercanías de las bocas litorales de la laguna de Nichupté, 1 en Isla Mujeres, 2 en la reserva ecológica de Sian Ka’an. Otros lugares de donde se tomaron muestras fueron: Akumal, Bahía Príncipe, Tulúm, Playa del Carmen, Pta. Brava y Holbox. Los análisis efectuados y parámetros determinados incluyen: análisis granulométrico; parámetros estadísticos de las muestras ( $d_5$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{16}$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{75}$ ,  $d_{84}$ ,  $d_{90}$ ,  $d_{95}$ ) con lo que se determinó diámetro medio del material, desviación estándar, sesgo (tendencia de la curva granulométrica) y curtosis (da una idea de cuál es el mecanismo de suspensión o deposito de los sedimentos), coeficientes de uniformidad y curvatura; propiedades físicas (densidad relativa, relación de vacíos, densidad relativa sumergida y peso específico del material; ángulo de reposo del material; umbral de movimiento de las partículas en el fondo marino; tamaño y forma de los granos del sedimento).



- Evolución morfodinámica de la playa comprendida entre Punta Cancún y Punta Nizuc, Q. Roo.

Algunos de los objetivos específicos de este estudio fueron: recopilar información histórica relacionada con la evolución de la línea de costa de la isla barrera de Cancún para desarrollar una base de datos que permita fundamentar la evolución espacio temporal que el sistema ha experimentado, ensamblar y presentar diferentes mosaicos fotográficos y perfiles playeros con el fin de ilustrar los cambios espacio temporales que se han presentado en el sistema, analizar la evolución morfológica en planta para diferentes años e identificar los procesos o eventos que la han influenciado y proponer alternativas de solución para evitar la migración de sedimentos.

Mediante el uso de imágenes aéreas se analizó el impacto de acciones dinámicas como oleaje y el viento para determinar los distintos rasgos morfológicos, ubicar zonas de erosión y acreción, entre otros aspectos. De esta forma, se presentan en este documento, mosaicos de fotografías correspondientes a: 1970 (no se tiene definida con precisión la fecha exacta), diciembre de 1985, noviembre de 1990 y junio de 1999. Con el apoyo de estos mosaicos se caracterizó la zona de playa de la isla barrera de Cancún y se logró determinar los anchos de playa existentes (máximo, medio y mínimo, ver tabla de datos 1) en cada uno de los años analizados. A continuación se hace una descripción breve.

- Mosaico Cancún 1970

Es posible apreciar los terraplenes para el bulevar Kukulkán y los rellenos para ensanchar la isla. A esta imagen se le superpuso el lineamiento urbano actual, luego de igualar escalas, con el fin de comparar los anchos de playa seca y se observaron anchos de playa máximo, medio y mínimo de 106.89 m, 70.95 m y 24.80 m, respectivamente. Se observa un afloramiento rocoso frente a lo que hoy son los condominios Carisa y Savia. En la zona que hoy se conoce como playa Chacmol y en particular frente al condominio Maralago, se observa el relleno de una boca que conectaba la laguna de Nichupte con el mar. Se observa otro relleno en el área donde se encuentra actualmente el Hotel Hyatt y el Cancún Resort. Los eventos extraordinarios que incidieron sobre Cancún en el periodo 1965 – 1970 y que pudieron haber modificado la morfología de la zona, fueron de magnitudes bajas, razón por la cual los rasgos erosivos que pudieran presentarse debieron ser mínimos. Estos eventos fueron seis depresiones tropicales, cuatro tormentas tropicales, un huracán clase 1 (Inés, octubre 1966) y un huracán clase 2 (Beulah, septiembre de 1967).

- Mosaico Cancún 1985

En este mosaico se determinaron un ancho de playa seca máximo, medio y mínimo de 96.45 m, 42.69 m y 6.06 m respectivamente. Se contabilizaron 17 hoteles en funcionamiento y 9 en construcción. Se observan en la parte norte, en lo que se conoce como playa Chacmol, en especial frente a los condominios salvia Cancún y Carisa y palma, algunos afloramientos rocosos, síntoma de erosión, los cuales contrastan con el resto de la playa la cual mantenía un buen equilibrio de sedimentos. Es posible que la urbanización de la zona norte haya ocasionado este desequilibrio. El mayor número de edificaciones se situaban hacia Pta. Cancún, sobre la duna, mientras que la parte sur no tenía esta presión. Por otra parte, en esta época hubo una mayor incidencia de eventos extraordinarios. En 1980 se presentó el huracán Allen y en noviembre de 1985 la depresión tropical Kate. Sin embargo, cinco años después de pasado el huracán Allen, las playas mostraban en general un buen estado.

o Mosaico Cancún 1990

En este mosaico pudo identificarse un ancho máximo, medio y mínimo de playa seca de 44.98 m, 17.40 m y 0 m respectivamente. También que para este año ya habían funcionando 54 edificaciones y se construían 3 hoteles. Se observa que frente a los condominios Salvia Cancún y Carisa y Palma, los afloramientos rocosos aumentaron. Rasgos erosivos se pueden apreciar en toda la costa; el ancho de playa seca se redujo en promedio un 62 %, en comparación con el medido en el mosaico de 1985. Hubo un incremento acelerado en la construcción de edificaciones cercanas a la playa, actividad que se extendió a lo largo de toda la franja costera. Para esta época, la zona no se había recuperado de la incidencia del huracán Gilberto en 1988. Por otra parte también se observa que frente a varios hoteles se colocaron estructuras de contención con el fin de evitar el avance del oleaje hacia las edificaciones y mitigar sus efectos. Las zonas exentas de afloramientos rocosos se redujeron a pequeñas áreas aisladas, las cuales se distinguieron por la concentración de turistas principalmente frente a los hoteles Sheraton, Parck Royal Pirámides en la zona centro norte, Oasis y Gran Oasis en la zona centro sur y otros hoteles frente a los cuales y gracias a su configuración arquitectónica, se crearon pequeñas playas limitadas por terrazas o muros.

o Mosaico Cancún 1999

A partir de este mosaico se logró determinar que el ancho máximo, medio y mínimo de playa seca fue de 37.13 m, 16.26 m y 0 m respectivamente. Por esta época se contabilizaban 63 edificaciones en funcionamiento y 4 en construcción. Se observa a Cancún prácticamente urbanizado, con edificaciones a todo lo largo de la zona costera y algunos rasgos erosivos. Cerca de Pta. Cancún, frente a los hoteles Salvia y Carisa, persisten los afloramientos rocosos y frente a los hoteles Gran Camino Real y Flamingo se presenta un reducido ancho de playa. Ver Tabla de datos 4.1 Evolución del ancho de playa entre 1970 y 1999.

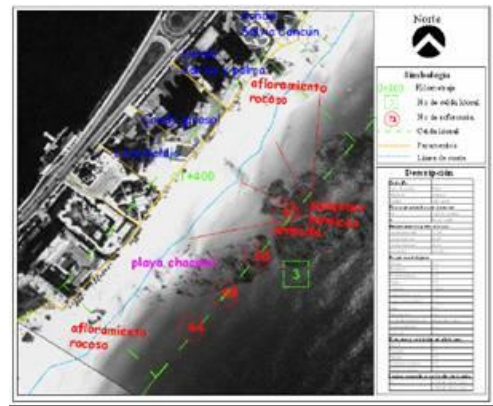
Mosaico	Ancho de playa [m]			Edificaciones	
	Máximo	Medio	Mínimo	Funcionando	En construcción
1970	106.89	70.95	24.80	<i>Apenas se inicia la construcción de terraplenes para las vías y los rellenos para ensanchar la isla</i>	
1985	96.45	42.69	6.06	17	9
1990	44.98	17.40	0	54	3
1999	37.13	16.26	0	63	4

**Tabla de datos 4.1 Evolución del ancho de playa entre 1970 y 1999. Se presentan valores de ancho de playa máximos, medios y mínimos encontrados a partir del análisis de mosaicos de imágenes. Fuente: Tesis Fuente: Ramírez (2006).**

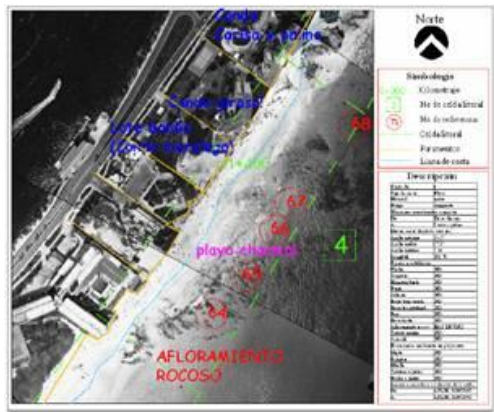




a) Cancún, 1970



b) Cancún, diciembre de 1985



c) Cancún, noviembre de 1990



d) Cancún, junio de 1999

**Fig.4.7 Mosaicos en los que se aprecia un sector de la isla barrera de Cancún en diferentes épocas. Fuente: Tesis Fuente: Preservación y Mantenimiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre entre Punta Cancún y Punta Nizuc. 2006**

En la zona norte se instalaron diversas estructuras artificiales como diques y espigones, mientras que en la zona centro y sur se construyeron algunos muros de contención. Es de resaltar que entre enero de 1990 y junio de 1999 los eventos extraordinarios que incidieron en Cancún fueron de baja intensidad. Se presentaron 5 depresiones tropicales, 4 tormentas tropicales y 1 huracán de categoría 1 (huracán Roxana, 1995).

El conjunto de observaciones realizadas al mosaico indican que el sistema costero, después de 9 años de la ocurrencia del huracán Gilberto, todavía no alcanzaba a recuperar el equilibrio sedimentario que tenía antes de dicho huracán y por el contrario presentaba alta vulnerabilidad ante la incidencia de nuevos eventos extraordinarios como lo fueron el huracán Iván en el 2004 y el Willma en el 2005.( Ver Fig.4.7 Mosaicos en los que se aprecia un sector de la isla barrera de Cancún en diferentes época)

Por otra parte, se hace una propuesta de obras de protección con el propósito de retener la mayor cantidad posible de sedimentos en la línea de costa Para evitar la fuga de arena del sistema, se propuso la construcción de dos diques conectados a ambas puntas (diques 1 y 2, Fig. 4.8 Ubicación de las obras de protección costera propuestas para evitar la fuga de arena del sistema). Mediante estas obras, se interrumpiría el transporte longitudinal de sedimentos que tiende a salir por las puntas, propiciando que la propia dinámica litoral regenere el tramo de costa en donde se ha presentado erosión. Las modelaciones numéricas que se realizaron sobre la propagación del oleaje mostraron que las estructuras conectadas en

ambas puntas disminuyen eficientemente el coeficiente de propagación del oleaje que incide sobre las mismas.

Se sugiere evitar el uso de estructuras que sobresalgan de la superficie del agua dañando el paisaje e interrumpiendo las actividades náuticas, por lo cual se propone la construcción de dos diques de material granular y totalmente rebasables. En esta investigación se propone el uso de roca caliza con peso específico de  $2.2 \text{ ton/m}^3$ .



**Fig.4.8 Ubicación de las obras de protección costera propuestas para evitar la fuga de arena del sistema. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.**

Además de las dos estructuras conectadas a las puntas, se proponen otras dos de apoyo a las adyacentes (diques 3 y 4, figura 4.8). Estas estructuras cumplirían con la función de defensa costera y se ubicarían en forma paralela a ella (diques exentos), generando una zona de aguas tranquilas en el trasdós de las mismas evitando la pérdida de sedimentos de las playas detrás de ellas o contribuyendo a la sedimentación en aquellas zonas donde se presentan procesos erosivos. Finalmente se propusieron dos estructuras más al centro de la costa de la isla barrera de Cancún (diques 5 y 6, figura 4.8). Algunas conclusiones que se deben resaltar de este estudio son las siguientes:

- La zona en estudio presentaba originalmente la configuración morfológica de una isla barrera estrecha y con dos tómbolas en proceso de formación en sus puntas, configuración que se alteró por el acarreo y depósito de material que tuvieron como objetivo ensanchar la isla preparar las zonas para su urbanización.
  - La construcción de edificaciones a lo largo de la costa y sobre la duna costera ha restringido las aportaciones de sedimentos hacia la playa.
  - La observación de los distintos mosaicos fotográficos confirma la hipótesis del desprendimiento de material rocoso en Pta. Cancún y la separación de las masas rocosas que conforman Pta. Nizuc, lo cual ha dificultado el proceso de recuperación natural de las playas.
  - Es necesario hacer modelos a escala de estas estructuras con el fin de evaluar su desempeño y/o hacerlas más eficientes, antes de construirlas.
- Caracterización geológica de la zona norte del Estado de Q. Roo. Fecha: Junio 2008.

Se hace una caracterización geológica de la isla barrera de Cancún y la Riviera Maya, desde Pta. Sam hasta Tulum, aproximadamente 150 km. En la costa Este de la Península de Yucatán donde se localiza la zona de estudio, se identifican afloramientos de calizas pertenecientes a la plataforma continental, que a su vez forman costas que tienen pequeños cantiles y salientes que separan a las playas. En la margen Este de la Península existe una falla geológica con dirección Nor – Noreste – Suroeste, que se piensa pudo haber influido en la tendencia de la forma de la costa Noreste de dicha Península.

La isla de Cozumel localizada frente a la costa de Quintana Roo, está constituida por material calcáreo y por la separación con respecto al continente, se piensa que la isla tuvo su origen a partir del producto de los procesos generados por el llamamiento tectónico. Hacia el sur de la Riviera Maya, la costa se considera extremadamente confinada, debido a una estructura de falla. En la parte este de la Península de Yucatán se identifica una gran barrera de coral, que se extiende intermitentemente a lo largo de 650 km, iniciando de la esquina Noreste de la Península hasta el límite sur dentro del Golfo de Honduras; cientos de cayos e islotos abundan en el arrecife y en la parte posterior de este. Las lagunas someras que se encuentran son delimitadas con manglares que crecen sobre terrenos de lodo calcáreo o de los mismos arrecifes coralinos, los cuales a su vez resguardan a las lagunas de las acciones provocadas por el oleaje.

Aguayo (1980) realizaron un estudio sedimentológico del área de Tulúm, Cancún e Isla Mujeres en el cual hicieron varias consideraciones interesantes. Comentaron que el área analizada es tectónicamente inactiva y está afectada por las corrientes litorales, la acción del oleaje, las mareas y el viento, siendo estos procesos los que controlan la movilidad de los diferentes tipos de material calcáreo que se distribuyen en cinco ambientes sedimentarios: 1) complejo arrecifal, desarrollado desde el extremo sur de la isla barrera de Cancún hacia el sur de esta provincia; 2) playa de alta energía en mar abierto, generando gran cantidad de oolitas, depositadas a lo largo de la isla barrera de Cancún; 3) megarrizaduras de fondo, entre el continente e Isla Mujeres (Bahía Mujeres); 4) dunas eolíticas y litorales, las cuales conforman a las dos islas, Cancún y Mujeres; 5) lagunas restringidas que se desarrollaron durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno a causa del depósito de tómbolas o espolones en los extremos sur y norte de la isla barrera de Cancún.

En la línea de costa de la zona de Tulúm se observan sedimentos de playa del Holoceno y eolianitas del Pleistoceno. En Playa Paraíso, los sedimentos recientes están constituidos por arena fina, moderadamente bien clasificada, formada principalmente por corales y en menor proporción por microforaminíferos bentónicos, espículas de alcionarios, entre otros. Esta arena procede en su mayor parte de la destrucción de la barrera arrecifal, localizada aproximadamente a 0.5 km al oriente de las costas de la Península de Yucatán en el Mar Caribe. La barrera arrecifal finaliza hacia el norte en Pta. Nizuc, extremo sur de isla barrera de Cancún, a unos 100 m de la orilla de la playa. Al parecer el arrecife termina en este lugar por dos razones: 1) la disminución de la profundidad del agua hacia el norte y 2) debido a la competencia que existe entre el desarrollo de arrecifes y los bancos de oolitas, las cuales son más abundantes al norte de Pta. Nizuc, haciendo que el fondo se encuentre en constante movimiento. En Tulúm afloran eolianitas del Pleistoceno formando los acantilados del Mar Caribe cuya composición litológica varía de un sitio a otro, de acuerdo a las condiciones locales de depósito.

Para Aguayo (1980) en la isla barrera de Cancún se tienen tres tipos principales de ambientes depositacionales: 1) ambiente de playa; 2) ambiente de laguna abierta o estrecha y 3) ambiente de laguna restringida y protegida. El ambiente de playa se presenta a todo lo largo de la costa oriental de la isla, donde el impacto del oleaje del Mar Caribe es casi normal a la línea de costa. El material que se encuentra es arena muy fina y muy bien clasificada, formada casi en su totalidad de oolitas y en menor proporción fragmentos de corales. Esta playa forma parte de un cinturón de sedimentos que corre paralelamente a la costa del Mar Caribe, desde Cancún hasta Isla Blanca. El lugar se considera de alta energía, dado que el área es barrida por el oleaje permanentemente y a partir de ello, se realiza una buena clasificación del sedimento. La arena que se extrae de la zona de rompientes de Punta Cancún está constituida por materiales arenosos muy gruesos y moderadamente bien clasificados; contiene en su totalidad fragmentos biógenos, sobre todo de corales y espículas de alcionarios. Se cree que el origen de estas arenas surge debido a la destrucción de material depositado mecánicamente por el hombre en la zona de rompientes, con la finalidad de evitar la erosión de las eolianitas pleistocénicas que forman la punta. Los sedimentos de la playa de Pta.

Nizuc están formados por arena mal clasificada constituida por fragmentos de corales que se localizan en las cercanías de dicho lugar.

En la zona de playa que corresponde a Puerto Morelos y su periferia, el material sedimentario está constituido por calizas coquinoides formadas en ambiente somero de playa. Esta coquina se compone esencialmente de fragmentos de conchas y moluscos, así como de corales mal clasificados.

En la Bahía Mujeres (Cancún) se observan depósitos de eolianitas pleistocénicas, dunas y arenas oolíticas holocénicas, a lo largo del estrecho sobre las zonas de post-playa y de playa, respectivamente.

Pta. Sam se encuentra constituida por sedimentos eólicos y arena de playa del Reciente; los sedimentos eólicos están formados por arena mediana, moderadamente clasificada, compuesta principalmente por oolitas y en menor cantidad de fragmentos de corales, moluscos, ostrácodos y equinodermos, además de microforaminíferos bentónicos y planctónicos. Por otro lado, la arena mediana bien clasificada está formada por oolitas y en menor porcentaje, fragmentos de corales y equinodermos, así como también de microforaminíferos bentónicos y planctónicos.

- Análisis de la dinámica geomorfológico de la zona hotelera de Cancún como contribución al desarrollo de un plan de manejo costero. Tesis de Licenciatura. Fecha: Junio 2008.

El objetivo es analizar las características geomorfológicas de la zona hotelera de Cancún para determinar los patrones y tendencias de la dinámica de sus playas y su interacción con el desarrollo costero con el fin de hacer recomendaciones para el manejo costero. Se definen dos periodos de desarrollo para la isla barrera de Cancún, el primero que corresponde a la década de los años 70's y el segundo a las décadas de los años 80's y 90's. Dentro de este contexto, se hacen una serie de apreciaciones muy importantes que a continuación se describen.

- Desde su formación, la isla barrera de Cancún presenta una tendencia hacia la erosión por las tormentas y ciclones tropicales; sin embargo, el sistema tenía la capacidad de recuperarse por si mismo y mantener un cierto equilibrio.
- La cobertura vegetal sobre la barra que detenía material sedimentario, desaparece completamente en el segundo periodo de desarrollo.
- La erosión ha ido en aumento, conforme se han hecho construcciones. Se han observado patrones de recuperación de las playas en algunos sectores cuando el tiempo entre el paso de un huracán y otro es considerable. Los huracanes contribuyen con la erosión de las playas, pero no son la única consecuencia de esta.
- Se considera que los sedimentos que pierden las playas, se depositan en barras sumergidas después de la rompiente; este material no regresa al sistema y cuando ocurren huracanes, es transportado mar adentro.
- Con relación al manejo costero, es necesario tomar acciones que permitan la subsistencia del sistema. Es necesario un manejo integral de la zona costera, con el fin de que el sistema vuelva a tener la capacidad de autoregularse y a la vez que este destino turístico se desarrolle de manera sostenible.

En la Fig. 4.9 se pueden apreciar los elementos morfológicos del sistema litoral Tulúm, Cancún, Isla Mujeres, mientras que en la Fig.4.8 se presenta el sistema de la isla barrera de Cancún en la actualidad.



**Fig.4.9 Elementos morfológicos del sistema litoral Tulúm – Cancún – Isla Mujeres. Fuente: Google Maps.**

- Caracterización del clima marítimo en el corredor turístico Cancún – Tulúm desde el año 1948 al 2007.

En este estudio se hizo una caracterización del clima marítimo en el Golfo de México, específicamente del corredor turístico Cancún – Tulúm, a partir de una modelación numérica. Dicha modelación se realizó con el fin de generar los estados del mar de la zona de estudio. Obtenidos los diferentes estados del mar, se efectuó un análisis extremal y medio, así como de tormentas, con el objetivo de conocer las características del oleaje que influye sobre el comportamiento de la playa. El modelo numérico empleado fue el Wave Model (WAM) con el fin de saber la altura, periodo y dirección del oleaje, en diferentes estados del mar. El HURAC es un modelo de predicción del oleaje con viento ciclotrónico y fue utilizado para corregir la caracterización del clima marítimo que se realizó con el WAM. Es de resaltar que para llevar a cabo la modelación se empleó la batimetría en aguas profundas y los campos de viento tomados de la base de datos de la British Oceanographic Data Center BODA. Los resultados que se presentan corresponden a la celda Cancún y a continuación se presentan algunos de los resultados.

Se pueden apreciar seis ejemplos de la caracterización de la altura de ola significativa para las celdas de Cancún, Cozumel y Sian Kaan que se obtuvieron a partir de la simulación numérica WAM – HURAC. Ambas figuras muestran el estado del mar correspondiente a los años en los cuales se presentaron los huracanes más intensos en la zona de estudio de los últimos sesenta años, Gilberto 1988, Emily y Wilma 2005. Se verificó que la información obtenida mediante la modelación correlacionaba muy bien con mediciones de campo (obtenidas mediante las boyas oceanográficas de la NOAA), lo cual constituye una ventaja pues los datos producto de modelaciones podrían emplearse con gran certidumbre para solucionar los problemas de intermitencia en la información que adquiere algún equipo de medición de oleaje. (Ver Fig.4.10 Registro anual de los estados del mar, correspondiente al año 1988 en las celdas Cancún, Cozumel y Sian Kaan, obtenido de la simulación numérica del oleaje WAM – HURAC, Fig.4.11 Registro anual de los estados del mar, correspondiente al año 2005 en las celdas Cancún, Cozumel y Sian Kaan, obtenido de la simulación numérica del oleaje WAM - HURAC )



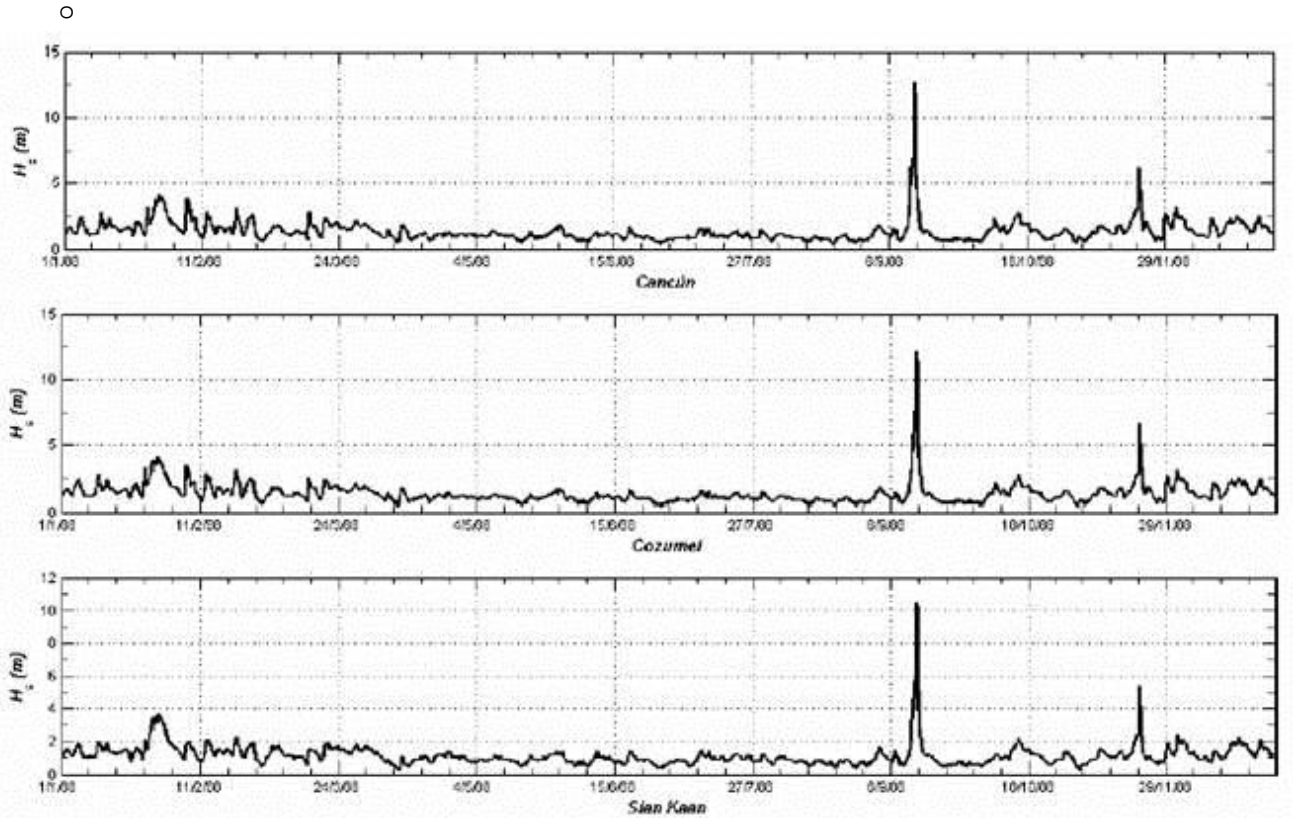


Fig.4.10 Registro anual de los estados del mar, correspondiente al año 1988 en las celdas Cancún, Cozumel y Sian Kaan, obtenido de la simulación numérica del oleaje WAM - HURAC.

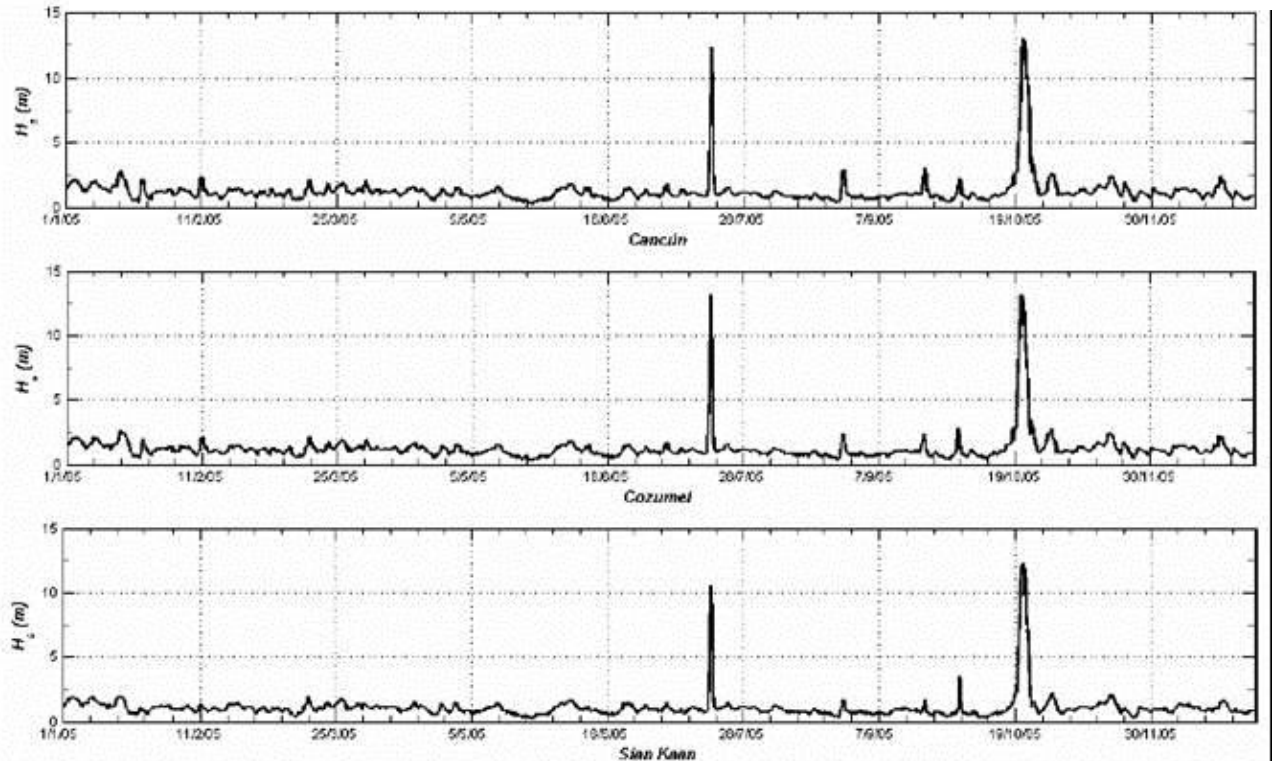


Fig.4.11 Registro anual de los estados del mar, correspondiente al año 2005 en las celdas Cancún, Cozumel y Sian Kaan, obtenido de la simulación numérica del oleaje WAM - HURAC.

- 
- En el caso particular de Cancún, se presentan en este estudio los resultados de un análisis de probabilidad conjunta (ver Fig.4.12). A partir de la interpretación de estas gráficas, se identifica que las alturas de ola significativa que arriban a la costa, se encuentran en un rango de 0 a 4 m y los valores del periodo medio van desde los 4 a los 10.5 s; la dirección de propagación del oleaje dominante se encuentra en tres sectores, siendo la dirección Este – Sureste la dirección a partir de la cual la costa recibe más oleaje.

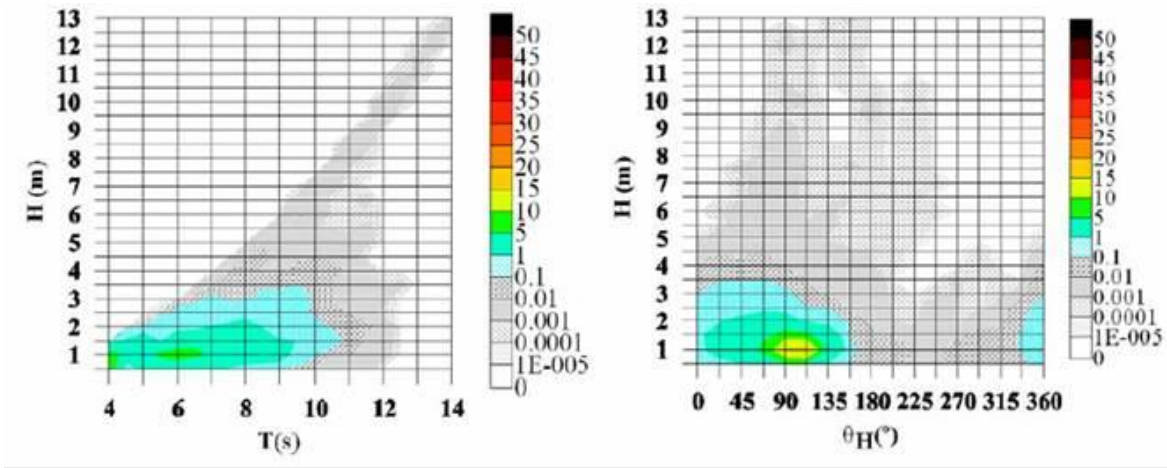


Fig.4.12 Gráficas de probabilidad conjunta de a) Ola significativa – Periodo medio, b) Altura de ola significativa –Dirección de propagación, para la celda Cancún con observaciones de 1948 al 2007. Fuente: Bautista y Silva (2005).

- Mediante el uso de rosas de oleaje es posible representar la magnitud y la frecuencia de la altura de ola con respecto a su dirección. De esta forma es factible también identificar la frecuencia de incidencia y la dirección de propagación del oleaje de manera rápida y sencilla. En la figura 4.13a se presenta la rosa de oleaje para la celda Cancún con observaciones de 1948 al 2007. De acuerdo con esta gráfica, el 28 % del oleaje que se presenta anualmente en la zona de Cancún, proviene de la dirección Este – Sureste, mientras que el oleaje que llega del Este, representa el 30 % de las olas.

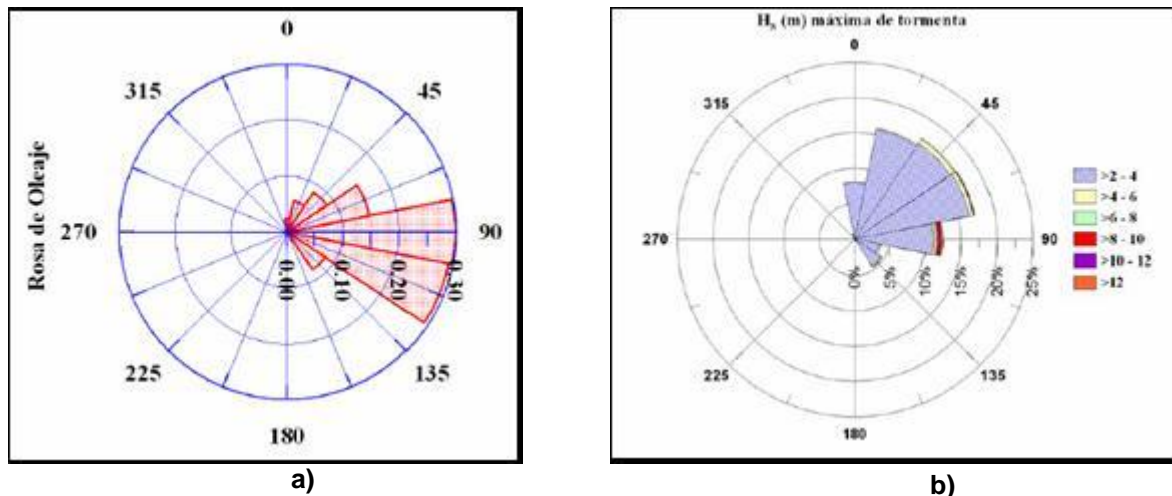
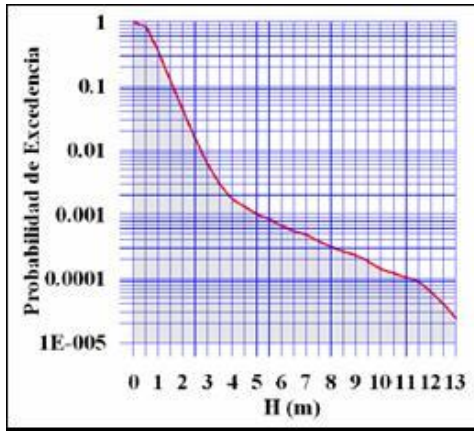
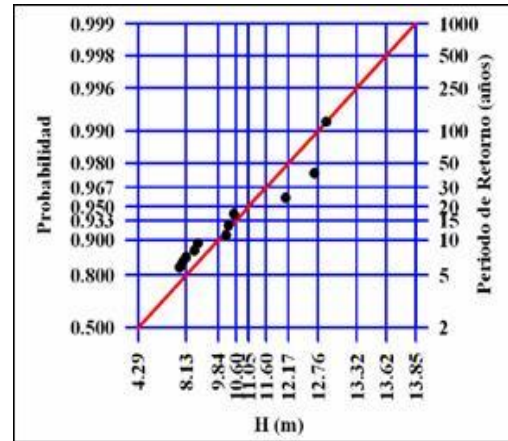


Fig.4.13 a) Rosa de oleaje de verano para la celda Cancún con observaciones de 1948 al 2007 b) Rosa de altura de ola máxima de tormenta para la celda Cancún. Fuente: Bautista y Silva (2005).

- Luego de comparar las direcciones de las olas que arriban a la costa (figura 4.13a) para la celda Cancún y las alturas del oleaje de tormenta (figura 4.13b) se observó que la dirección de los mayores oleajes de tormenta observados coincide con el sentido de propagación del oleaje incidente. También se verificó que las tormentas que se presentan con mayor frecuencia provienen de las direcciones Noreste, Este – Noreste y Nor – Noreste, notándose que el oleaje para la zona de estudio en condiciones normales o de calmas proviene del Mar Caribe, mientras que el oleaje generado por las tormentas se aproxima de la región del canal de Yucatán y el Golfo de México.
- El análisis extremal realizado en este estudio permitió obtener gráficas de probabilidad de excedencia de alturas de olas, a partir de observaciones entre 1948 y el 2007, considerando inclusive distintos periodos de retorno.



a)

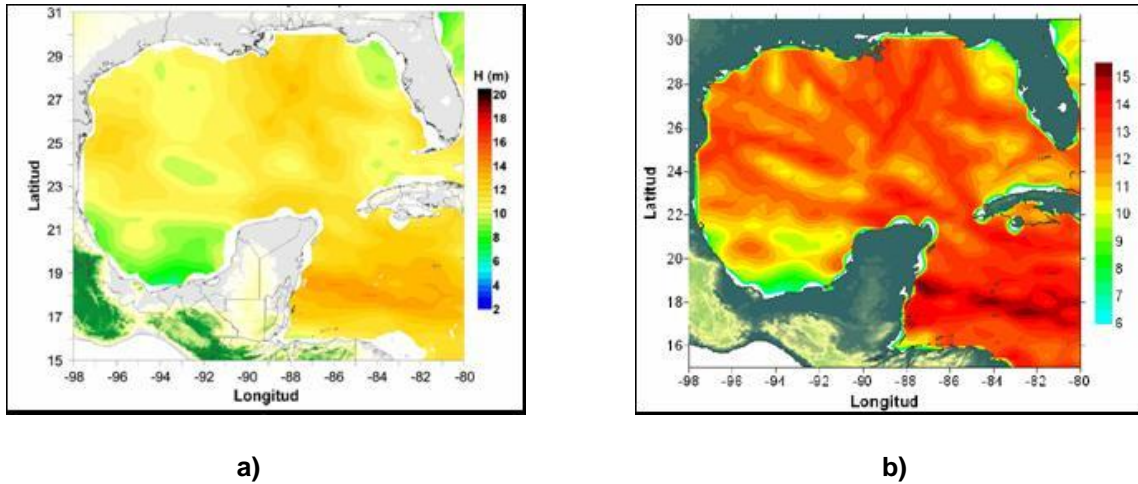


b)

Fig.4.14a) Gráfica de probabilidad de excedencia para la celda Cancún con observaciones de 1948 al 2007, b) Distribución de Weibull a largo plazo para la altura de ola significativa para el periodo de tiempo de 1948 al 2007 para la celda Cancún (la línea recta representa el mejor ajuste de las observaciones). Fuente: Bautista y Silva (2005).

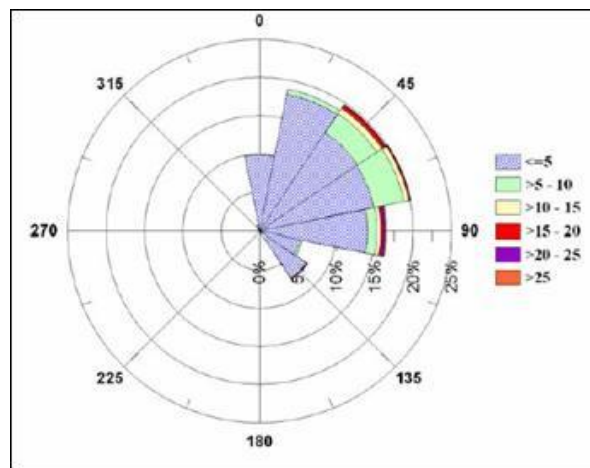
- Basándose en los resultados del cálculo del periodo de retorno para todas las celdas que cubren el Golfo de México y Mar Caribe, se generaron mapas de periodos de retorno de: 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 150, 250, 500 y 1000 años, en los cuales se muestra la distribución de las alturas de ola que se presentarán en el intervalo de recurrencia que se señala en el mapa. Se identificó con el uso de dichos mapas, que en la zona de estudio, existe un 98 % de probabilidad de que se registren alturas de olas de 12 m cada 50 años, ver Fig 4.14a. En la Fig 4.14b se presentan las alturas de ola significativa máximas para el Golfo de México y Mar Caribe; se reconocen en esta figura que las alturas máximas que pueden ser usadas para propagar el oleaje de aguas profundas a someras es de 6 a 12 m, para la zona de Cancún y la Riviera Maya.





**Fig.4.15 a) Mapa de altura de ola significativa para un periodo de retorno de 50 años b) Mapa de altura de ola significativa máxima histórica para la vertiente Atlántica Mexicana. Fuente: Bautista y Silva (2005).**

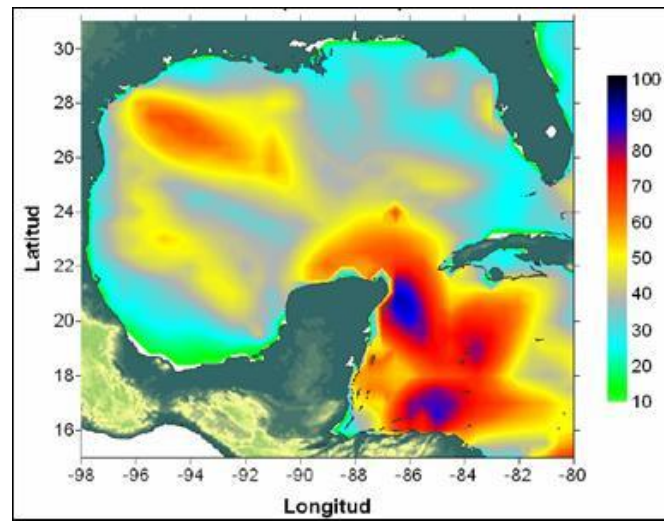
- Es obvio que el sentido direccional de las tormentas coincide con las direcciones energéticas del oleaje para la celda Cancún (Fig.4.16 Rosa de energía correspondiente a la celda Cancún)). Es importante resaltar que la dirección en donde se registra el mayor número de tormentas, con alturas de ola que superan los 8 m es el cuadrante Este y por ello se esperaría, que dicha dirección se considerara como la que mayormente aporta energía a la costa. Sin embargo, a partir de las rosas de energía normalizadas, se identifica que las tormentas que desarrollaron una mayor energía, se presentaron en los sectores Noreste, Este – Noreste y Este. Por lo anterior, las direcciones que deberían considerarse como las más energéticas son la Noreste y la Este – Noreste.



**Fig.4.16 Rosa de energía correspondiente a la celda Cancún. Fuente: Bautista y Silva (2005).**

- Se verificó que de todo el litoral mexicano de la vertiente atlántica la zona en la que se ha presentado la mayor cantidad de energía corresponde a la línea de costa de Quintana Roo, en la cual se localiza la zona de interés, Cancún y la Riviera Maya (Fig.4.17 Mapa de energía normalizada máxima histórica para la vertiente atlántica mexicana). Esta información es de especial interés para el diseño de obras de protección costera con mejor desempeño. También permite una mayor certidumbre en cuanto a la

elección de las alturas de ola que generalmente se requieren para la modelación numérica del comportamiento de la zona litoral.



**Fig.4.17 Mapa de energía normalizada máxima histórica para la vertiente atlántica mexicana.**  
Fuente: Bautista y Silva (2005).

El Instituto de Ingeniería cuenta con los siguientes modelos numéricos:

- Modelo numérico de predicción de oleaje, para conocer altura, periodo y dirección de las olas significantes de los diferentes estados del mar en el Golfo de México y el mar Caribe.
- Modelo numérico para simular corrientes en las costas.
- Modelo numérico para el estudio de la erosión y sedimentación.

## 4.5 Acciones realizadas, situación actual y necesidades de las playas de Cancún y la Riviera Maya

### 4.5.1 Acciones realizadas en Cancún y la Riviera Maya

Las acciones realizadas a la fecha en la zona turística Quintana Roo (Cancún y la Riviera Maya) han sido sobre la isla barrera de Cancún con el fin de mantener la actividad turística en la zona. Es de anotar, que luego de la ocurrencia del huracán Gilberto en 1988, el Gobierno Federal tuvo que tomar acciones con el fin de mantener el potencial turístico de la zona con la limitante de no afectar el paisaje, los arrecifes coralinos ni las actividades náuticas. Por estas razones, la opción de bombear arena se vio como una alternativa viable en el corto plazo. Posteriormente se complementó con la instalación de los geotubos. Entonces en resumen las actividades desarrolladas en Cancún han sido:

- ✓ 2006: bombeo de 2.7 millones de  $m^3$  de arena.
- ✓ 2007: colocación de 1.5 km de geotubos.
- ✓ 2006-2007: 5 jornadas de topobatimetría con sus respectivas restituciones.

- ✓ 2007-2008: registro de anchos de playa desde antes del huracán Dean, actualizado cada mes.
- ✓ Se está desarrollando un modelo matemático de simulación del comportamiento de la celda litoral.

En el caso de la Riviera Maya (zona turística de Playa del Carmen y Cozumel), las acciones realizadas han sido por parte de particulares (ver Fig.4.18 Vista del sector norte de la isla barrera de Cancún), quienes en su afán por mantener un ancho de playa seca han colocado estructuras de protección en forma indiscriminada. Se pretende también rellenar con arena las playas para lo cual existe un proyecto que data del 2006 y que en la actualidad está siendo actualizado por la CFE. Existe también una Manifestación de Impacto Ambiental promovida por el Municipio de Playa del Carmen para que se ejecute el proyecto.



**Fig.4.18 Vista del sector norte de la isla barrera de Cancún. Se indica con una flecha la localización de los geotubos instalados. Fuente: Internet**

En el caso de la isla de Cozumel las acciones han sido las siguientes:

- Autorización de creación de un “banco seco” de arena.
- Validación de la capacidad del banco norte (al norte de la isla) como fuente de reposición de arena.
- El Municipio ha sido facultado para comercializar al menudeo la arena para la construcción de areneros en las instalaciones hoteleras.

#### 4.5.2 Situación actual y necesidades de Cancún

A pesar de las acciones realizadas y de que las obras realizadas han ayudado de manera razonable a la regeneración de las playas, es necesario realizar nuevas acciones para permitirle al sistema la recuperación de su equilibrio (bombear más arena y colocar más geotubos). Los geotubos han ayudado a la recuperación de las playas y a la retención de la arena, son estructuras flexibles que no generan contaminación visual ni afectan las actividades náuticas, asimismo son una opción de bajo costo, ver figura 27. Lo que actualmente prevalece es:

- Un Cancún recuperado.

- Zonas de erosión al centro de la isla barrera, afectaciones de alta energía y efectos basculantes muy notorios de la arena (falta de arena en el sistema)
- Anchos de playa de 20 m en promedio. (Actividad turística asegurada).
- Zona sur consolidada con anchos mayores a 30 m; Zona norte ganando playa de manera paulatina.

Es importante resaltar que la dinámica costera está variando en el tiempo debido al calentamiento global. Las necesidades actuales de la isla barrera de Cancún son las siguientes:

- Eliminar todas las estructuras colocadas de manera irregular.
- Adición de más arena al sistema (1 millón de m<sup>3</sup>).
- Refuerzo de las instalaciones de mamparas de geotextil.
- Programa de mantenimiento permanente.
- Creación del fondo de contingencia.
- Incorporar toda la zona de playas.
- Proteger los manglares.
- Vigilar que las construcciones no invadan la zona de la duna principal y los manglares.
- Es fundamental que se mantenga el mecanismo de coordinación actual entre la Semarnat y el Comité de Recuperación de Playas.
- Para proponer soluciones de largo plazo es necesario instrumentar para generar un mejor conocimiento sobre el comportamiento de las variables que intervienen en la dinámica costera y así asegurar el usufructo de la zona turística.

#### 4.5.3 Situación actual y necesidades de las Playas de la Riviera Maya

Esta zona presenta una compleja situación en la actualidad, las Playas de Playacar están expuestas al mar abierto. Las obras adelantadas por particulares no han sido las más adecuadas ya que no obedecen a ningún diseño, además de que:

- Generan contaminación visual.
- Afectan las actividades náuticas.

En algunos casos muy específicos, los particulares han logrado mantener la playa, sin embargo esto no es fundamento suficiente para que se construyan este tipo de obras. Frente a Playa Car la presencia de un arrecife ofrece protección a la costa. (Ver Tabla de datos 4.2 Situación actual de tres sectores de la Riviera)

Sector de la Riviera Maya			
Tres Ríos – Coco Beach (8.5 km)	Coco Beach – Porto Real (1.3 km)	Porto Real – Playa Car (4.3 km)	Playa Car – Calica (4 km)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducida franja de playa (5 – 10 m).</li> <li>• Duna poco desarrollada.</li> <li>• Escarpes de erosión cortando la duna litoral.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duna poco desarrollada.</li> <li>• Construcciones próximas a la orilla.</li> <li>• Escarpes de erosión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta densidad de ocupación costera.</li> <li>• Duna litoral eliminada.</li> <li>• Afloramientos rocosos.</li> <li>• Presencia de muros,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausencia de acumulaciones de arena.</li> </ul>

• Afloramientos rocosos.		espigones, rompe olas.	
--------------------------	--	------------------------	--

**Tabla de datos 4.2 Situación actual de tres sectores de la Riviera. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.**

Las necesidades actuales de las Playas de la Riviera Maya son las siguientes:

- Terminar la actualización del proyecto por parte de CFE.
- Eliminar todas las estructuras que se han puesto de manera irregular.
- Vertido de 1 millón de m<sup>3</sup> de arena del banco Cozumel Norte.
- Instalar al menos 1 km de geotubos para reforzar el apoyo en la celda litoral y disminuir la energía del mar.
- Desarrollar un programa de mantenimiento permanente y la creación del fondo de contingencia.
- Proteger los manglares.
- Vigilar que las construcciones no invadan la zona de la duna principal y los manglares.

(Ver Fig.4.19 a) Obras de protección instaladas por particulares b) Invasión de la duna litoral y de la playa)



a)



b)

**Fig.4.19 a) Obras de protección instaladas por particulares b) Invasión de la duna litoral y de la playa. Fuente: Internet.**

- Es fundamental que se mantenga el mecanismo de coordinación actual entre la Semarnat y el Comité de Recuperación de Playas.
- Para proponer soluciones de largo plazo es necesario instrumentar para generar un mejor conocimiento sobre el comportamiento de las variables que intervienen en la dinámica costera y así asegurar el usufructo de la zona turística.

#### 4.5.4 Situación actual y necesidades de la Isla de Cozumel

La situación actual de la isla de Cozumel puede describirse de la siguiente manera:

- La actividad turística se desarrolla en la costa poniente de la isla, principalmente en dos zonas hoteleras: Norte y Sur (en esta costa no hay playas, es zona de arrecifes, roca y cantil).

- En la costa oriente las playas no tienen a la fecha la presión de las construcciones como en Cancún y Playa del Carmen. Hay un proceso natural de recuperación de arena.
- La protección de esta costa tiene más importancia como elemento de seguridad para la infraestructura carretera. (Ver Fig.4.20 Deterioro de un tramo de vía paralelo a la costa debido a la erosión en la isla de Cozumel)



**Fig.4.20 Deterioro de un tramo de vía paralelo a la costa debido a la erosión en la isla de Cozumel. Fuente: Internet.**

- Proyecto en suspenso por problemas contractuales y de calidad del equipo destinado para los trabajos (dos dragas se hundieron).
- El banco seco no era apto ambientalmente para recibir el producto del dragado.

Entre las necesidades que se tienen se cuentan las siguientes:

- Revisar el proyecto aprobado y relanzarlo en su caso.
- Durante el bombeo para Playa del Carmen incluir también a Cozumel.
- Elaborar el proyecto para protecciones marginales en las playas del este de la isla.
- Instalar las mamparas de geotextil en la costa este.
- 

## **4.6 Proyecto de restauración y recuperación de la zona federal Marítimo terrestre de Cancún, Playas del Carmen y Cozumel**

### **4.6.1 Actividades de Dragado**

En las playas de Cancún se implementó el relleno artificial con arena, mediante el uso de dragas. La responsabilidad de las medidas estuvo a cargo de la CFE, quien siempre contó con personal a bordo de las dragas *Kaishuu* y *Volvox Terranova*. Y personal de la UNAM. (Ver Fig.4.21 Vistas de la draga *Volvox Terranova*. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración, Fig.4.22 Vista de la draga *Kaishuu*. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración)





**Fig.4.21** Vistas de la draga Volvox Terranova. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración.



**Fig.4.22** Vista de la draga Kaishuu. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración.

Como en todo proyecto de regeneración con arenas naturales marinas, existen dos zonas donde se siente su impacto ambiental: la de extracción y la de relleno; y dicho impacto se produce como consecuencia respectivamente de las acciones de dragado y vertido, y también de los cambios topológicos, e infraestructurales en aquellas zonas en las que se requiere obras complementarias.

De los puntos a estudio sobre el ambiente para la realización y la liberación se tiene los siguientes

- El primero se refiere a la evaluación de los impactos, que requiere una previa identificación de los mismos para percibir mejor los efectos de los diferentes elementos del proyecto sobre los del medio y lograr una mayor precisión en su evaluación, pero también como modo de facilitar la identificación de las posibilidades de prevención y/o mitigación de tales efectos o impactos considerados negativos
- El segundo se refiere a una identificación completa del medio, de modo que se puede disponer de un inventario ambiental suficientemente desglosado por elementos y factores para facilitar la fase analítica, incluye una buena identificación de los factores susceptibles de recibir o sufrir impactos.

- El tercero y último se refiere al avance de un pronóstico ambiental o de la evolución del sistema suficientemente acabado para conducir a establecer un programa de monitoreo ambiental

Para lo anterior se tiene análisis detallado de la evolución de la línea de costa desde 1984 hasta el IVÁN, como se puede observar en las imágenes siguientes se seccionaron en zonas desde punta Niczu hasta punta Cancún observando los avances y retrocesos de la línea de costa en 12 etapas

En la sección 01(Fig.4.23 Vista de la draga Kaishuu) el retroceso obtenido se ha mostrado en todas las ocasiones. Sorprende la estabilidad entre 2000 y 2004 y es alarmante la pérdida total en 2004 con el Iván. Todo ello se muestra en todos los puntos a un lado y otro de la sección en unos 100 metros a lo largo de la costa

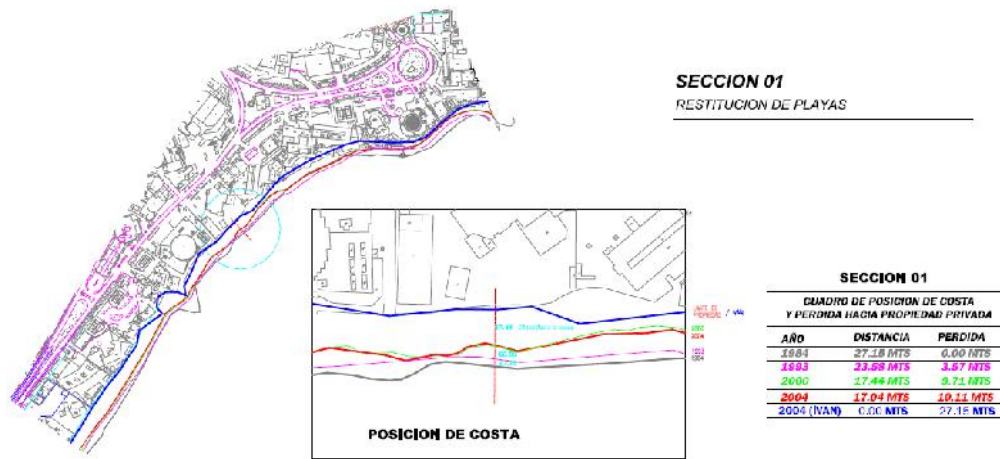


Fig.4.23 Vista de la draga Kaishuu. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.

En la sección 02(Fig.4.24 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 2) , sin embargo el retroceso con el Iván fue pequeño frente a los anteriores, pero es que prácticamente no había ya playa seca. Es aquí donde el retroceso se muestra muy persistente desde el origen, perdiéndose casi la mitad de la plataforma seca de la playa en cada período

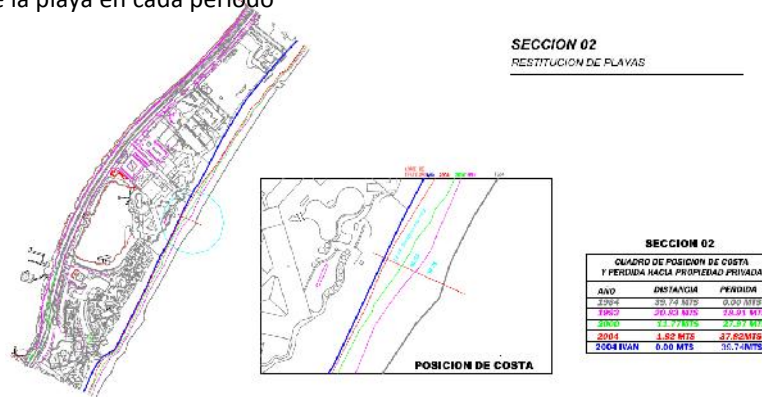


Fig.4.24 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 2. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.



En la sección 03(Fig.4.25 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 2 para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005), la erosión del Iván no consigue acabar con la playa seca, aunque el retroceso es notorio (más de la mitad de la misma); pero el resto de las características con los que éste se ha producido desde 1984 es semejante: progresivamente acentuado. Sin embargo se puede ver que el efecto de apoyo (el de abrigo ya no existe a esa latitud) de la Punta Cancún es ya reducido

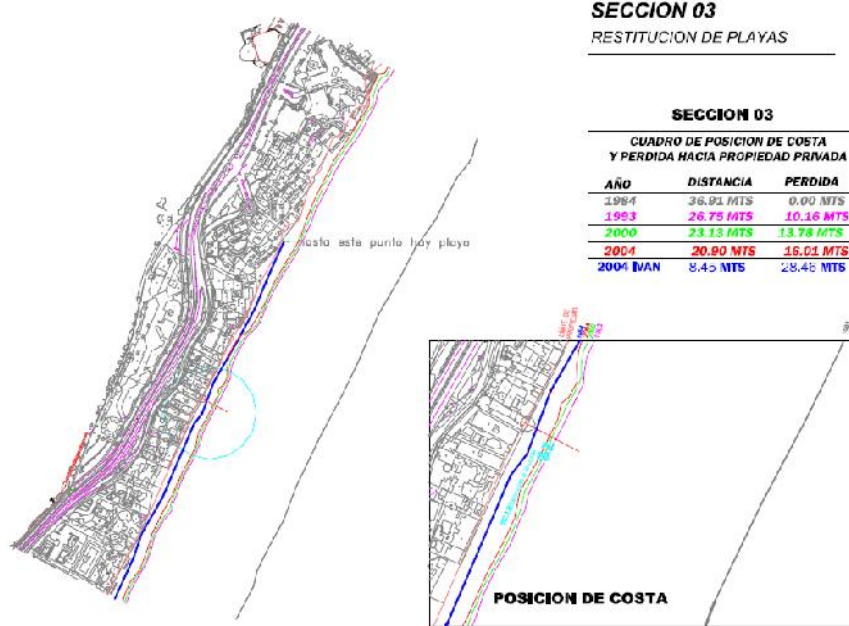


Fig.4.25 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 2 para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.

En la Sección 04 (Fig.4.26 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 4) los procesos han sido análogos a los de la sección anterior: recuperación pero insuficiente tras el Gilberto, erosión importante pero no completa durante el temporal del Iván, retrocesos persistentes

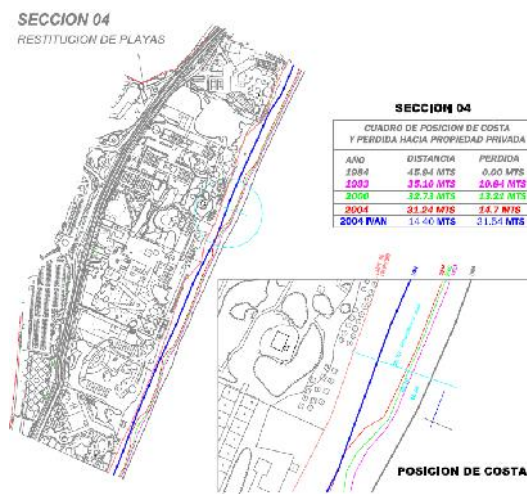
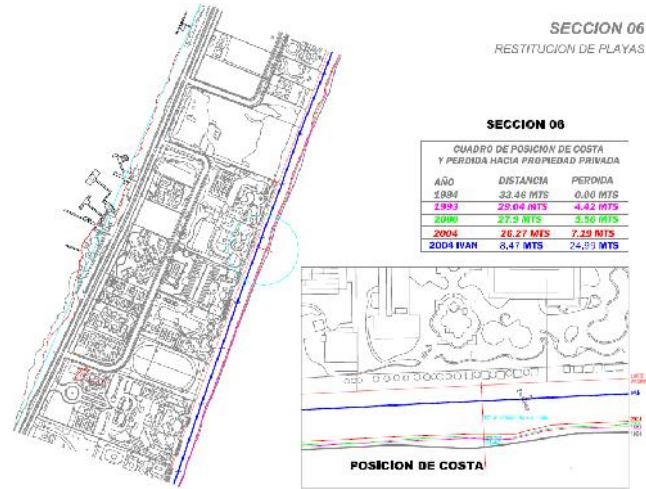


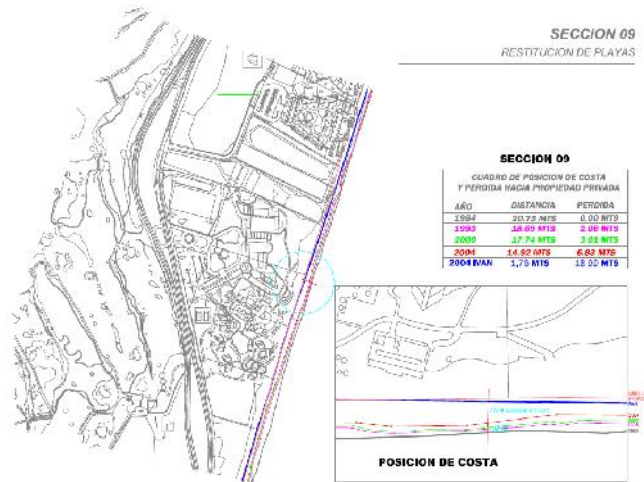
Fig.4.26 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 4. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.

En la sección 05 (Fig.4.27 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 5), tanto en la propia sección como en sus entornos próximo y lejano, las cosas han sucedido en forma análoga a la sección anterior por lo que no ha lugar a comentarios especiales y lo mismo puede aducirse en lo fundamental respecto de la sección 06, aunque en la mitad sur del entorno lejano de ésta se pueden ver algunos avances de la línea de costa entre 1993 y 2000, e incluso un avance persistente desde 1984 en un tramo de unos cien metros a unos 300 metros al sur de la sección, siendo un tramo en el que se puede decir que hubo una cierta tendencia a la estabilidad, al menos de resistencia a la erosión de la playa seca, desde el Gilberto hasta el Iván. Y esta evolución del tramo 06 sur se mantiene, con algunos matices a lo largo de todos los tramos que incluyen las secciones 07 y 08 y sus entornos, en la segunda con algunas inversiones más relevantes incluso; además los efectos del Iván son menos importantes, mientras que la estabilidad y avances en distintas etapas entre 1984 y 2004 (Marzo) son muy notorias en muchos de sus tramos.



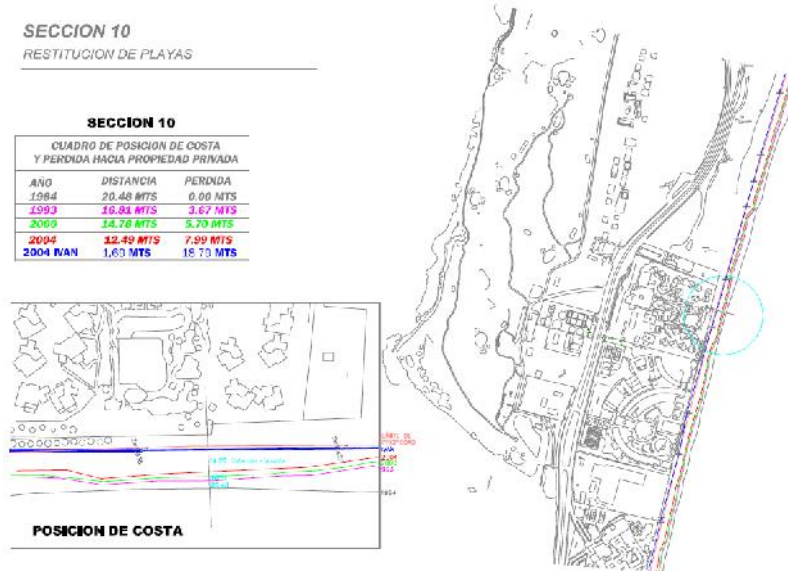
**Fig.4.27 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 5. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.**

En la sección 09(Fig.4.28 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección) vuelven a cambiar las cosas. Cerca de esta sección se encuentra ya la zona de dunas y sin embargo la acción del Iván ya llevó la línea de costa por detrás de la curva de nivel que en tiempos señalaba el alcance de la duna en la parte norte del tramo entorno a esta sección. En la sección misma la playa seca llegó casi a desaparecer también (menos de 2 metros) tras el Iván, y el retroceso de la línea de costa nuevamente se muestra progresivamente creciente desde 1984



**Fig.4.28 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 9.** Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.

En la sección 10(Fig.4.29 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 10) continúan evolucionando los procesos de la misma manera descrita en la sección anterior, pero con crecientes tasas anuales de retroceso de la línea de costa hasta alcanzar, tras el Iván, una situación casi idéntica (menos de dos metros de playa seca) a la de aquella



**Fig.4.29 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 10.** Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.

En la sección 11 (Fig.4.30 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 11), la evolución puede considerarse intermedia de las 09 y 10 hasta el año 2000

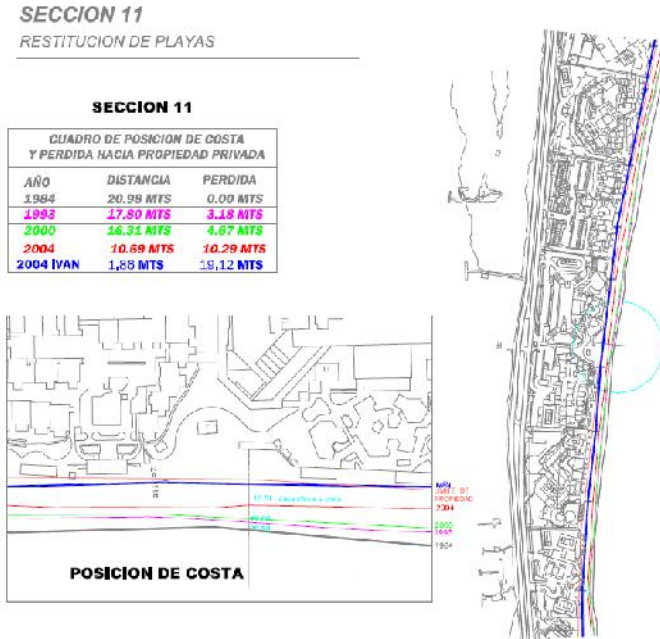


Fig.4.30 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 11. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.

En la sección 12 (Fig.4.31 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 12) el retroceso del Iván es nulo, pero es consecuencia de que su incidencia del sudeste permitió propagaciones adecuadas para mantener estable la zona abrigada por la Punta Nizuc a pesar de que la componente transversal del oleaje y del transporte hubo de modificar el perfil transversal notablemente y extraer arenas de la playa seca. De hecho, observando el entorno de la sección hacia el norte se ve que se produjo avance respecto a Marzo de 2004, y también respecto de 2000, incluso de 1993, en algún tramo

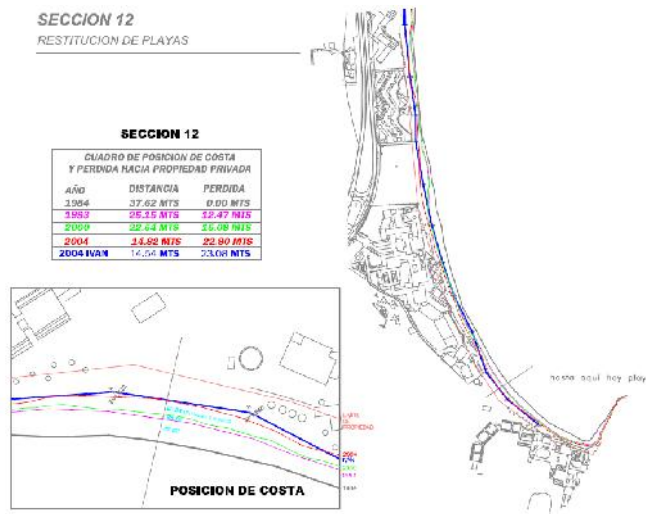


Fig.4.31 Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 12. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.



El desarrollo de las actividades de vertido de arena sobre la línea de la costa esta evidenciada, en una serie de fotos tomada por personal de CFE y la UNAM, de las cuales se muestran algunas a continuación (Fig.4.32, Fig.4.33, Fig.4.34, Fig.4.35).



**Fig.4.32** Fotografías de las actividades de vertido en las playas de la zona hotelera de Cancún. El límite del vertido se ubicó a la altura del Hotel Royal Solaris a aproximadamente 1.5 Km al Norte de Punta Nizuc. Vertido de la draga KAISHUU. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración.



**Fig.4.33** Acciones de vertido en Playa del Carmen, donde se verificó la medida, en específico la no existencia de organismos vivos dentro de la ZOFEMAT. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración.



**Fig.4.34** Actividades de vertido en Playa del Carmen, entre la Terminal Marítima y el muelle de ultramar (a la altura del hotel 10 & The Beach). El vertido de la draga KAISHUU inicio a 800 m al sur del muelle de la Av. Constituyentes en Playa del Carmen. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración.



**Fig.4.35** Vertido de arenas para la Restitución de Playas Nizuc-Cancún, sin obras de cierre adicionales. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún.

Los puntos a revisión relacionados en cuanto al cumplimiento de normas ambientales y desarrollo del proyecto fueron:

1. Componentes del aire
2. Sustrato costero arenoso
3. Componentes del agua
4. Componentes de la flora
5. Componentes de la fauna
6. Componentes factor social

#### 4.6.1.1 Componentes del aire

Dentro de estos se encuentra todo lo relacionado con el cumplimiento de las medidas descritas por el responsable de hacer la acreditación ambiental en este proyecto se utilizó el apoyo de Acuacorp de Hidalgo quien dictamino el cumplimiento tanto del manejo de residuos peligrosos generados por las actividades de la obra como mantenimiento de maquinaria y en las dragas, el manejo de saneamiento que sean directa o indirectamente cumpliendo con las normas vigente, que los trabajos fueran desarrollados con equipos de escape cerrado, el control de niveles de ruidos ocasionado principalmente por las maquinarias. (Ver Fig.4.36 a)Sanitarios en playa, b) Manejo de residuos peligrosos, c) Mantenimiento de maquinaria en playa uso de equipo anti derrame).



**Fig.4.36 a) Sanitarios en playa, b) Manejo de residuos peligrosos, c) Mantenimiento de maquinaria en playa uso de equipo anti derrame. Fotografías tomadas por personal de CFE.**

#### 4.6.1.2 Sustrato costero arenoso

Respecto a la anchuras de la playa seca parece evidenciarse que antes de 1985 habían sido superiores a los 40m, y por ello la UNAM propuso recuperar hasta 40 m. de playa seca no solo a razones estéticas sino a funcionales -turísticas y medio ambientales, las aportaciones naturales desde punta Cancún a Nizuc está determinada por los efectos de apoyo y de abrigo, en Punta Cancún domina el efecto apoyo y en Nizuc el efecto abrigo aunque es mixto en ambos, pero ambas puntas son rebasables y permeables; el transporte en verano es hacia Cancún y en invierno hacia Nizuc; y el resultante anual medio es hacia Cancún, que es por donde las arenas se salen de la playa para emigrar en Bahía Mujeres.

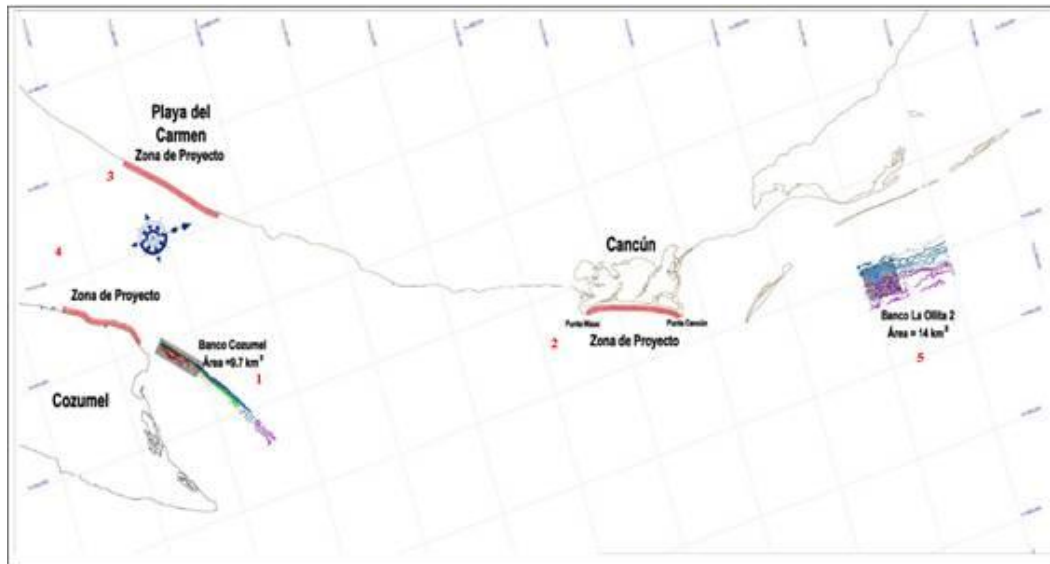
En NIZUC se perdió hasta el 2000 todo lo ganado en 1988 y en Cancún 2/3 más de lo ganado en 1988. De ambas pérdidas deben responsabilizarse a los arrecifes relictos del lado del mar (que dificultan la recuperación) y a los edificios del lado de tierra (por su efecto pantalla y la interceptación de los vientos de poniente), pero también, a la realidad de un perfil erosivo. Por lo tanto se necesita de la recuperación de arena mediante bancos de préstamo. La alimentación se hizo de bancos próximos siendo estos los más convenientes ya que reúnen todas las condiciones estos son; megarizaduras y ollita ya que son suficientes para suministrar los volúmenes requeridos. Así como que éstos constituyen fuente adecuada para la alimentación de las playas.

La extracción de las arenas de dragado puede afectar a los fondos y a los posibles caladeros de los mismos, pero también a las propias formas costeras si interfieren con el transporte litoral. Los fondos arenosos móviles, libres por tanto de praderas sumergidas suelen considerarse desiertos submarinos porque las tasas de biomasa son reducidas. Para todo lo anterior se dio seguimiento al desarrollo del proyecto mediante las acreditaciones necesarias, tanto en el desarrollo como en la finalización del mismo. El personal de acreditación ambiental también hizo presencia a bordo de las dos dragas en diferentes ocasiones



supervisando no solo el cumplimiento de las rutas de navegación, sino también la formación y dispersión de los sedimentos durante la extracción de arena.

Para lo cual el personal de navegación respeto los registros requeridos como fueron; las rutas de navegación, la señalización correcta de las actividades de vertido de arena y el uso correcto de vehículos manejados por el personal contratista. (Ver Fig.4.37 Fotografía de Cancún, indicando las rutas de navegación y la ubicación de los bancos Megarizaduras y Ollita)



**Fig.4.37 Fotografía de Cancún, indicando las rutas de navegación y la ubicación de los bancos Megarizaduras y Ollita.**  
**Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún.**

Las actividades que se reportan son durante la etapa de construcción y conclusión de las actividades del proyecto y las que se destacan:

- Extracción de arena de los bancos de arena denominados Banco (La Ollita) y Banco (Punta Norte en Cozumel), con el consecuente vertido en las costas de la Zona Hotelera de Cancún y de Playa del Carmen.
- Se alcanza un volumen, de extracción del Ollita con 1,480,000 m<sup>3</sup> y con 4,498,000 m<sup>3</sup> en el Banco Megarizaduras.

#### 4.6.1.3 Componentes agua, flora y fauna

Se realizaron monitores de calidad del agua, durante el desarrollo del proyecto, esto se llevo a cabo con un programa de condiciones fisicoquímicas del agua (sólidos suspendidos disueltos, turbidez, nutrientes, oxígeno disuelto) previo y durante el desarrollo del proyecto, para poder establecer las condiciones iniciales y a partir de esto, se prevengan condiciones de alta turbidez durante periodos de tiempo prolongados en la zona de afectación directa y hasta 350 m de distancia de un punto de emisión dado, además detectar si en algún momento se encuentran fuera de los parámetros establecidos por la norma ambiental;



**CANCÚN NORTE:**

Los resultados en este sitio se caracterizan por carecer de un patrón o periodo, sin embargo resaltan las siguientes observaciones:

1. En ningún momento se rebasa el nivel de los 400 mg/l de SST.
2. No se observa un incremento en SST, entre las mediciones realizadas de manera previa al vertimiento, con respecto a las realizadas durante el vertimiento activo en el sitio.
3. Fue común encontrar valores de Nitrógeno amoniacal por encima del valor de registro del kit utilizado (2 ppm), tanto antes como durante el vertimiento activo de arena, lo que sugiere materia orgánica en descomposición que se encuentra en el sitio, de manera independiente y ajena a las actividades de restitución de playas.

**CANCÚN SUR:**

Los resultados obtenidos en este sitio sugieren lo siguiente:

4. Los resultados de SST, muestran cierta periodicidad con respecto a los episodios meteorológicos conocidos como "Nortes", que corresponde con la llegada de una masa de aire frío a las costas lo que incrementa el viento y el oleaje, y hace que se resuspendan los sedimentos en el sitio, es evidente que en este segmento la restauración de playas hasta el momento no ha tenido efecto, ya que el mayor valor registrado en este parámetro corresponde al 21 de octubre del 2009, fecha previa a cualquier acción de vertido.
5. La transparencia se muestra ligada también con los nortes y disminuida al norte de Nizuc, debido a la gran energía que ahí se presenta.
6. Los valores de Nitrógeno Amoniacal, se muestran erráticos y sin un patrón lo que sugiere aportes locales y aislados de materia orgánica, la cual es ajena al proyecto de restitución de playas.

En general los resultados muestran que la modificación en la columna de agua en el frente de trabajo de Cancún por vertimiento de arena, se ha restringido a la parte inmediata de la costa con una distancia de 200 metros o, incluso, menor. Los resultados exponen que en el sitio existen procesos independientes y ajenos al proyecto que causan la pérdida de transparencia del agua así como la presencia de materia orgánica en descomposición. Tabla de datos 4.3 Parámetros físicos, químicos y de campo determinados

Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua	Datos y parámetros de campo
Demanda bioquímica de oxígeno	Coordenadas
Sólidos suspendidos totales	Profundidad total
Sólidos disueltos totales	Oxígeno disuelto
Sólidos sedimentables	pH
Demanda química de oxígeno	Conductividad
Coliformes fecales	Salinidad
Nitritos	Temperatura del agua
Nitratos	Transparencia (disco de Secchi)
Ortofosfatos	
Turbiedad	

**Tabla de datos 4.3 Parámetros físicos, químicos y de campo determinados. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.**

En las imágenes siguientes (Fig.4.38 ) se observa la toma de muestras y levantamiento de datos de parámetros fisicoquímicos del agua, para medir oxígeno, pH, conductividad, salinidad y temperatura. Las muestras de agua tomadas durante los monitoreos fueron enviadas a un laboratorio acreditado y certificado en la ciudad de Mérida, para asegurar que los análisis de los parámetros fueran realizados en tiempo y forma.



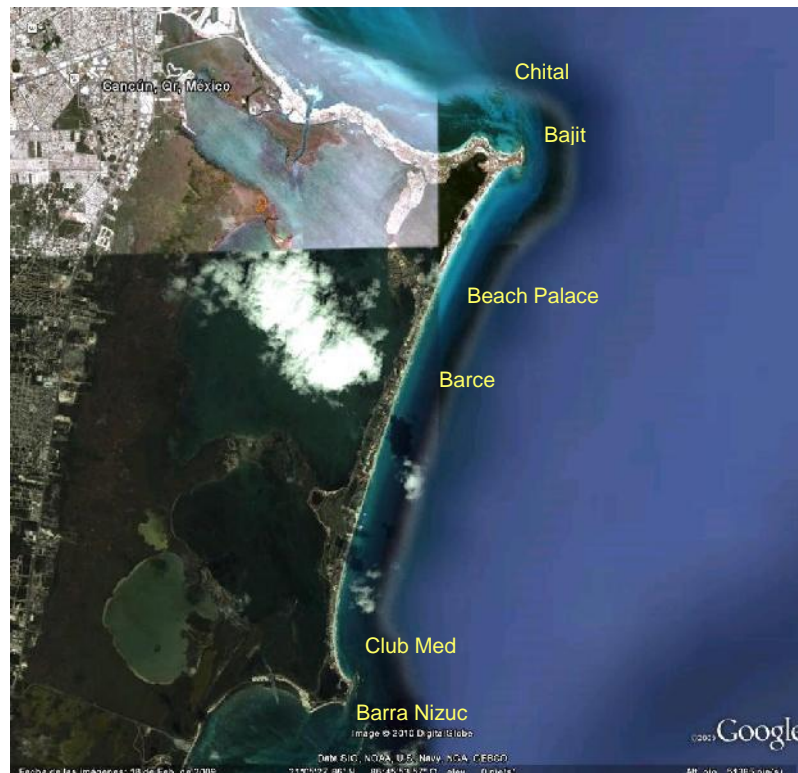
**Fig.4.38 Dispositivos de medición en la primera imagen se puede observar el disco de Secchi . Fotografías tomadas por personal de CFE.**

*Análisis de resultados en Cancún*

Las estaciones seleccionadas para el monitoreo fisicoquímico del agua, así como el análisis de parámetros de campo en la zona de Cancún se presentan en la Tabla 4.4 y en la Fig.4.39 correspondiente.

Nombre de la estación	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
Chitales	21° 9' 1.01"	104° 44' 42.7"
Bajito	21° 8' 25.87"	104° 44' 32.6"
Beach Palace	21° 6' 26.3"	104° 45' 27.6"
Barceló	21° 6' 6.48"	104° 45' 39.8"
Club Med	21° 2' 12.7"	104° 46' 42.03"
Barrera Nizuc	21° 1' 50.7"	104° 46' 38"

**Tabla 4.4 Nombre y ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo en Cancún. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.**



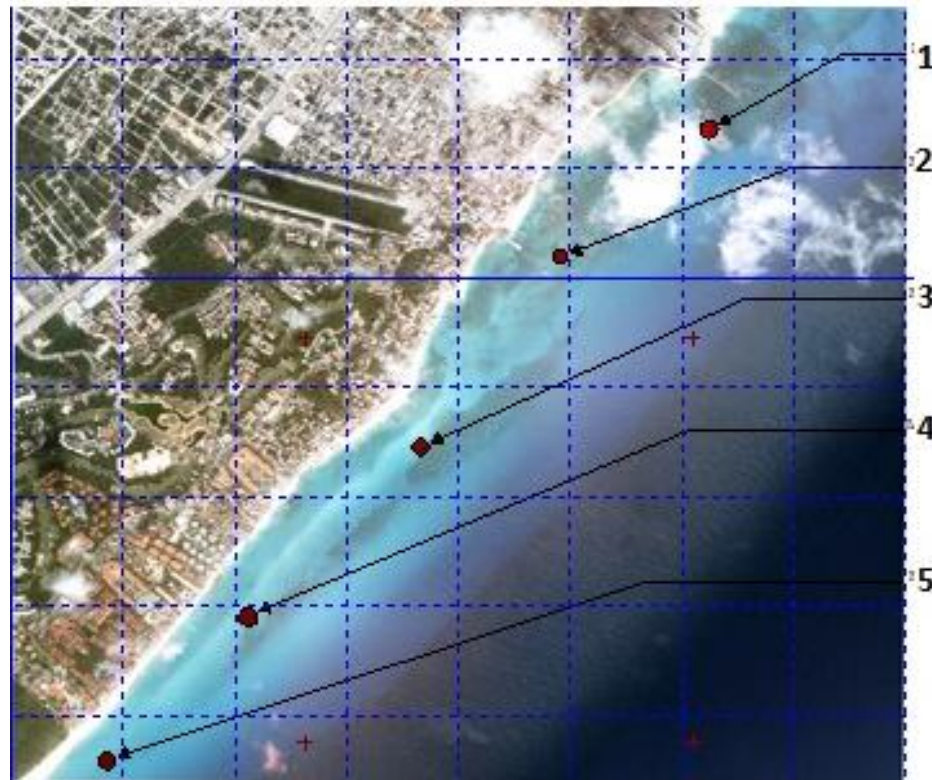
**Fig.4.39 Estaciones de monitoreo en Cancún. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.**

*Playa del Carmen.*

El muestreo de calidad de agua en la columna marina en Playa del Carmen se tomaron en el frente costero en los 4.2 km de conformación de playa. Considerando 5 puntos (Tabla 4.5 y Figura 4.40), uno cada kilómetro de playa, para la toma de muestras y levantamiento de datos de campo tomados *in situ* y de las muestras obtenidas para el laboratorio.

Nombre de la estación	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
1	20° 37' 31"	105°03' 57.6"
2	20° 37' 5.1"	105° 04' 18.7"
3	20° 36' 41.1"	105° 04' 41.13"
4	20° 36' 18.4"	105° 05' 5.15"
5	20° 35' 55.3"	105° 05' 29.5"

**Tabla de datos 4.5 Ubicación de las estaciones de muestreo en Playa del Carmen Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.**



**Fig.4.40 Ubicación de los puntos de muestreo de calidad del agua, en el frente costero de playa del Carmen. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.**

En conclusión: es factible aseverar que en ningún momento se han rebasado ni las concentraciones permitidas en el resolutive de impacto ambiental emitido por la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (400 mg/l), ni la dinámica oceánica permite que perdure demasiado tiempo la pluma de dispersión en los bancos.

En el reporte de avance presentado por CFE el 28 de diciembre de 2009 indica “Personal especializado de CFE ha realizado antes y durante los vertidos de arena el monitoreo de fauna en la línea de costa (Véase Fig. 4.41), empleando recorridos diurnos y nocturnos a fin de ubicar los sitios donde se encuentran organismos que pudieran verse afectados por las diversas actividades de la obra. Siendo las tortugas marinas las especies que más atención han requerido, debido a que son los organismos que pudieran ser objeto de captura, caza, colecta, comercialización y tráfico. Dado que la obra inició cuando el periodo de desoves había terminado, los esfuerzos se centraron en la ubicación y rescate de nidos, actividad que desarrolló personal de CFE en conjunto con personal de la Dirección General de Ecología del Municipio de Benito Juárez, lográndose el rescate de la totalidad de huevos de tortuga y tortugas neonatas existentes en la ZOFEMAT del Frente de Trabajo Cancún, a finales de Octubre del 2009, antes del inicio de los vertidos de arena, a partir del 01 de Noviembre del 2009”



**Fig.4.41 Protección de especies que viven en las playas antes y después del vertido. Fotos tomadas por personal de CFE.**

En el reporte del rescate realizado en Punta Norte de Cozumel se concluye lo siguiente:

- Se realizaron 57 transectos de banda obteniendo un área total de barrido de 1, 293,074 m<sup>2</sup>, donde se registraron doce especies; seis equinodermos, cinco moluscos y un crustáceo.
- Se rescató un total de 4373 individuos, principalmente *Strombus gigas*, *Strombus costatus*, *Meoma ventricosa*, *Oreaster reticulata* y *Cassis tuberosa*
- El área de reubicación y liberación de los individuos rescatados se ubica a una distancia promedio de 5km al Este del Banco B, y cuenta con características similares del sistema ambiental de donde se extrajeron los organismos.
- Se confirma que el área donde posteriormente se realizará el dragado, presenta un sustrato arenoso.
- Bajo este contexto, el área de barrido obtenida en este programa de rescate se considera suficiente y representativa para llevar a cabo posteriores labores de dragado y extracción de arena.



En el reporte del rescate realizado en La Ollita se concluyó lo siguiente:

- Se realizaron 15 transectos de banda obteniendo un área de barrido de 41180 m<sup>2</sup>, donde se registraron cinco especies equinodermos y una especie de molusco.
- Se rescataron un total de 3557 individuos, principalmente la galletas de mar *Encope aberrans* y *Leodia sexiesperforata*.
- En el área muestreada no se registró la presencia de individuos de Caracol rosado *Strombus gigas*, ni de la langosta del Caribe *Palinurus argus*. Además que no registraron zonas de pastos marinos.
- El área de reubicación y liberación de los individuos rescatados se ubica a una distancia promedio de 1.5km al Oeste del Banco A, y cuenta con características similares del sistema ambiental de donde se extrajeron los organismos.
- Se confirma que el área donde posteriormente se realizará el dragado, presenta un sustrato arenoso.
- Bajo este contexto, el área de barrido obtenida en este programa de rescate se considera suficiente y representativa para llevar a cabo posteriores labores de dragado y extracción de arena.

Con las observaciones que se realizaron, resulta imposible predecir el impacto que puedan provocar las obras sobre la población de aves en general. Esto se hará evidente solo en el largo plazo. Sin embargo, se nota la perturbación provocada en las golondrinas marinas (*Sterna sandvicensis*), debido a que ya no se observan en las cercanías del Islote, a diferencia de lo que sucede con los pelícanos que no reflejan síntoma alguno de perturbación.

Se observó que durante y después del vertido descansan Pelícanos, Gaviotas y Golondrinas tanto en el Islote la pajarera y en el borde de las mallas; por otro lado se observa que durante el vertido las aves buscan y obtienen alimento en el área de espuma, en la línea de costa y en la zona de la pluma de dispersión. Ver Fig. 4.42 Afectación al ecosistema Aviar.



**Fig.4.42 Afectación al ecosistema Aviar. Foto tomada en el desarrollo del proyecto CFE.**

Se colocaron señalamientos de prohibido el paso a los turistas en el Islote de Golondrinas y estructura de cierre, debido a se puede acceder al Islote por la playa conformada y por lo tanto se perturba a las aves y esto evita que puedan regresar a su habitat ya sea para perchar, alimentarse o reproducirse, principalmente las golondrinas. Se realizo el monitoreo de observación de aves para determinar las especies que se encuentren como transitorias, residentes de verano o permanentes.

En cuanto a la afectación de corla, la CFE colocó una serie de colectores de sedimento, de tal manera que con las lecturas que se obtengan, será posible determinar los niveles de sedimentación y con ello establecer la condición de los corales de Punta Nizuc y Punta Cancún con motivo de los procesos de sedimentación relativos a la ejecución de los vertidos que se llevaron a cabo en las playas de Cancún, las lecturas cubren las distintas etapas del proyecto. (Ver Fig. 4.43)



**Fig.4.43** En las imágenes se puede apreciar gráficamente la posición de cada uno de los colectores enlistados en la tabla anterior. Imagen empleada en el reporte de CFE.

#### 4.6.1.4 Componentes factor social

En relación con ese punto, el personal contratista se encargo de mantener las necesidades de transito para usuarios de la playa como para las embarcaciones que circulan por la zona, fueron: señalizaciones, medida de precaución para evitar accidentes, todos estas reglas fueron evaluadas mediante recorridos de inspección, notificación para las embarcaciones cuando se esté trabajando en la extracción, ver Fig.4.44 Señalamientos de medida de seguridad para los turistas



**Fig.4.44** Señalamientos de medida de seguridad para los turistas. Fotos tomadas por el acreditado ambiental.



## 4.7. Alternativas de solución

### 4.7.1 En el corto plazo

Después de revisar los estudios realizados por la CFE y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el IMTA respalda la alternativa de solución a corto plazo e inmediata que propone el Gobierno del Estado de Quintana Roo, esta es la: Reposición de arena y colocación de protecciones. Esta alternativa debe ser inmediata.

#### Ventajas:

- Bajo impacto al medioambiente.
- Mínima afectación al paisaje natural
- Facilidad en la instalación.
- Economía de costos.
- Flexibilidad de manejo.
- Evolución positiva de las playas en donde se ha aplicado: México (Zona hotelera de Cancún) y en el mundo
- (EE. UU., España, Islas del Caribe).

La selección de la alimentación artificial como técnica de avanzada para el mantenimiento de las playas naturales, se viene haciendo con base en sus reconocidas ventajas ecológicas y estéticas con respecto a otras técnicas y en el caso particular de Cancún, los resultados han sido satisfactorios. Es así como a la fecha hay un evidente mejoramiento de las condiciones estéticas y recreacionales de las playas de la isla barrera de Cancún, en donde no solo las acciones de relleno con arena sino también la instalación de geotubos ha sido una buena combinación.

Estas obras han tenido un comportamiento aceptable a pesar de la ocurrencia de algunos eventos meteorológicos extremos en fechas recientes. Por otra parte, los resultados han sido los esperados:

- Recuperación razonable y conservación de las condiciones recreacionales y estéticas de la playa a pesar de que se trata de un ambiente frágil desde un punto de vista ambiental.
- Ha disminuido la vulnerabilidad de las edificaciones.
- El impacto sobre el medio ambiente ha sido mínimo y la relación costo – beneficio ha sido favorable.

La existencia de bancos de material cercanos también favorece la alternativa del bombeo de arena hacia las playas de Cancún y la Riviera Maya y reduce costos. Dada la necesidad de que las obras de protección sean sostenibles medioambientalmente, no dañen el paisaje natural y tampoco interfieran con las actividades náuticas, el relleno con arena y la instalación de geotubos son una buena opción para asegurar la actividad turística de toda la Riviera Maya.

## CAPÍTULO V CONCLUSIONES

Con base a los análisis realizados en el estudio de caracterización de las playas, y la obtención de fundamentos técnicos y morfológicos, con el objetivo de regenerar, proteger y estabilizar las playas. Estas propuestas presentan cierto tamaño, sin embargo, estas alternativas, deben de ser analizadas y estudiadas por medio de simulaciones físicas o numéricas que ayuden en la consecutividad y contribuyan en el dimensionamiento, geometrías y morfología de las obras más eficaces para la mitigación de lo efectos erosivos que sufre cada zona en particular.

La erosión marina afecta hoy en día a numerosos espacios de nuestro litoral y en particular a las playas de arena. Tenemos muchas playas que se están quedando sin arena, por lo que los ayuntamientos están observando la disminución de su atractivo turístico. La playa es necesaria para el turismo, para el desarrollo económico pero también es un medio de protección de las dunas y de las zonas situadas detrás de las dunas: es un elemento del patrimonio que conviene, por lo tanto, preservar. Para ofrecer una solución duradera a estos problemas, se ha desarrollado la técnica, para la solución de estos problemas

Frente a la problemática de la erosión y pérdida de playas se pueden encontrar en la literatura científica diversas alternativas de solución que incluyen muros rígidos, espigones marinos, rompeolas y revestimientos. Pero la construcción de estructuras en la playa no aumenta físicamente la cantidad de arena de la playa, sino que redistribuye la arena existente. La acumulación de arena en un sitio de la playa necesariamente produce erosión en otras áreas de playa. Por esta razón es que se requiere además de la construcción de obras, el suministro de arena para compensar los desequilibrios causados por la construcción de las obras y en el caso particular de Cancún y la Riviera Maya, por la ocurrencia de huracanes.

Algunas de estas estructuras de protección como las que se comentaron presentan serias desventajas como son:

- Por su altura pueden no ser suficientes para reducir la acción de las olas.
- Puede no permitir la recuperación natural de la de la playa.
- Son un riesgo para la navegación.
- No hay mucha experiencia con este sistema.
- Pueden ser costosas de construir.
- Son difíciles de inspeccionar.
- Pueden disminuir la calidad del agua si dificultan la circulación de agua entre las estructuras y la playa.
- No existe claridad sobre la filosofía del diseño de algunas de estas estructuras de protección. Si deben ser largas o cortas, altas o bajas, permeables o impermeables.

En necesario método de protección blanda que se integren perfectamente a su medio, tanto desde un punto de vista estético, como del respeto de los intercambios sedimentarios que controlan la geomorfología litoral. Utiliza los movimientos sedimentarios e hidráulicos naturales para ayudar al litoral a encontrar un equilibrio sedimentario positivo.

Algunos de los objetivos principales serían:

- Proteger las playas y las dunas,
- Estabilizar los *stocks* sedimentarios,
- Impedir las salidas de arena,
- Disminuir
- la energía de las olas,
- Evitar el enarenamiento de los puertos,
- Crear islas o zonas de surf artificiales.

En muchas zonas, los efectos combinados de la erosión costera, la construcción de infraestructuras y la implantación obras de defensa reducen la anchura de la franja litoral. Este “estrés costero” se observa sobre todo en las llanuras costeras y en las zonas intermareales que, de manera natural, se ajustarían a las variaciones del nivel del mar, de las tormentas y de las mareas. A pesar de los problemas generados por la erosión costera y del incremento de los impactos y la capacidad de de la costa para sustentar la actividad humana, las presiones de desarrollo en la costa no han cesado. Las obras de protección duras son todavía ampliamente utilizadas. Esto conlleva una reducción del espacio disponible tanto para la propia actividad humana como para la protección que ofrece el funcionamiento natural de los sistemas costeros, así como para una explotación sostenible de los recursos naturales, por lo cual es necesario hacer un cambio de paradigma sobre las obras que se están haciendo, es necesario desarrollar un equilibrio entre las nuevas estructuras blandas y el ecosistema, donde se pueda sustentar la economía y un entorno natural para un mejor futuro

## ANEXOS DE FIGURAS

Fig. 1.1	Rompeolas Antiguo Fuente: Imágenes de Internet google	Pág. 1
Fig. 1.2	Coloso de rodas siglo IV a.C. Fuente: Imágenes de Internet google	Pág. 3
Fig. 1.3	Golfo de México. Fuente: SeaWiFS Project, NASA //Goddard Centro de vuelo espacial, y ORBIMAGE	Pág. 11
Fig. 1.4	Constitución del sistema litoral Fuente: imágenes de google	Pág. 14
Fig. 1.5	Partes sur de México.Fuente: <a href="http://v6.yucatan.com.mx/reportaje.asp?rx=092\$87\$162">http://v6.yucatan.com.mx/reportaje.asp?rx=092\$87\$162</a>	Pág. 20
Fig. 1.6	Tubos geotextiles ,reduccion de la energia de la ola. Fuente: Goesynthetics volumen junio/julio 2006	Pág. 22
Fig. 1.7	Restauracion de la linea de playa despus de ocho meses colocado el geotubo. Fuente: Goesynthetics volumen junio/julio 2006	Pág. 23
Fig. 2.1	Número de Reynolds. Fuente: Tesis de evolucion morfodinamica de playas UNAM 2006	Pág. 29
Fig. 2.2.	Número de Froude. Fuente: Tesis de evolucion morfodinamica de playas UNAM 2006	Pág. 30
Fig. 2.3	Fuerzas en las partículas. Fuente: Tesis de evolucion morfodinamica de playas UNAM 2006	Pág. 31
Fig. 2.4	Relaciones de sedimentos basada de Hjulstrom 1935	Pág. 32
Fig. 2.5	Parámetros asociados a la onda. Fuente: Tesis de evolucion morfodinamica de playas UNAM 2006	Pág. 34
Fig. 2.6	Regiones de validez para diferentes teorías de oleaje. Fuente: Tesis de evolucion morfodinamica de playas UNAM 2006	Pág. 36
Fig. 2.7	Tipos de rotura. Fuente: Tesis de evolucion morfodinamica de playas UNAM 2006	Pág. 39
Fig. 2.8	Registro análogo de oleaje, distribución de altura de ola y espectro.	Pág. 41
Fig. 2.9	Celda de Hadley, <a href="http://meteobasica.blogspot.com/2010/12/circulacion-general-de-la-atmosfera.html">http://meteobasica.blogspot.com/2010/12/circulacion-general-de-la-atmosfera.html</a> .	Pág. 44
Fig. 3.2	Ejemplo del cambio morfológico en la costa por efecto de una estructura de cresta baja y una estructura sumergida	Pág. 54
Fig. 3.3	Esquema tridimensional de los arrecifes artificiales	Pág. 55
Fig. 3.4	Esquema estandar de estructuras sumergidas	Pág. 56
Fig.3.5	Ejemplo numérico de la respuesta de la línea de costa como una función de transmisión y verificación de los criterios propuestos, según Hanson y Kruse 1990	Pág. 57
Fig.3.6	Ejemplo de un perfil de diseño para un relleno de playa	Pág. 61
Fig. 3.7	Ejemplo de vallas de madera y textiles para la construccion de dunas	Pág. 64
Fig.3.8	Colocón y posicionamiento de vallas para la formación de dunas costeras	Pág. 64
Fig.3.9	Detalles de los elementos que conforman una valla de madera, comparación con vegetación empleada también en estos procesos	Pág. 65

Fig. 3.10	Formación de dunas costeras, y sembrado de pastizales para ofrecer estabilidad	Pág. 65
Fig. 3.11	Resultados finales en la construcción de dunas por procesos naturales.	Pág. 66
Fig. 3.12	Esquema de runup sobre la playa	Pág. 66
Fig.3.13	Factores considerados en la delimitación de la administración distrital de la duna	Pág. 67
Fig.3.14	Componentes del procedimiento para el cálculo de Runup	Pág. 67
Fig.3.15	Información de la ola y sobrelevación por tormenta usada en el cálculo del Runup(Sourse; U.S. Army Corpe of Engineers, 1976 and Thompson,1977)	Pág. 68
Fig.3.16	Duna altura/ancho por regresión lineal	Pág. 69
Fig. 4.1	Trayectoria de los huracanes a) Gilberto, b) Wilma y c) Dean. Fuente: internet	Pág. 71
Fig. 4.2	Isla barrera de Cancún y elementos morfológicos del sistema litoral Tulúm – Cancún – Isla Mujeres. Fuente:	Pág. 72
Fig. 4.3	Perspectiva de implementación. Fuente: Preservación y Mantenimiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre entre Punta Cancún y Punta Nizuc.	Pág. 74
Fig. 4.4	Parte de los resultados granulométricos de la playa. Fuente: Proyecto para la recuperación de la isla barrera Cancún- CFE.	Pág. 74
Fig. 4.5	Se presentan los tramos en los que se dividió la isla barrera de Cancún y el volumen de relleno estimado del proyecto. (M m3: millones de metros cúbicos). Fuente: Preservación y Mantenimiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre entre Punta Cancún y Punta Nizuc.	Pág. 76
Fig. 4.6	Perfil de construcción y perfil de proyecto en una sección tipo. Fuente: Preservación y Mantenimiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre entre Punta Cancún y Punta Nizuc.	Pág. 77
Fig.4.7	Mosaicos en los que se aprecia un sector de la isla barrera de Cancún en diferentes épocas. Fuente: Tesis Fuente: Preservación y Mantenimiento de la Zona Federal Marítimo Terrestre entre Punta Cancún y Punta Nizuc. 2006	Pág. 80
Fig.4.8	Ubicación de las obras de protección costera propuestas para evitar la fuga de arena del sistema. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.	Pág. 81
Fig.4.9	Elementos morfológicos del sistema litoral Tulúm – Cancún – Isla Mujeres. Fuente: Google Maps.	Pág. 83
Fig.4.10	Registro anual de los estados del mar, correspondiente al año 1988 en las celdas Cancún, Cozumel y Sian Kaan, obtenido de la simulación numérica del oleaje WAM - HURAC.	Pág. 85
Fig.4.11	Registro anual de los estados del mar, correspondiente al año 2005 en las celdas Cancún, Cozumel y Sian Kaan, obtenido de la simulación numérica del oleaje WAM - HURAC.	Pág. 85
Fig.4.12	Gráficas de probabilidad conjunta de a) Ola significativa – Periodo medio, b) Altura de ola significativa –Dirección de propagación, para la celda Cancún con observaciones de 1948 al 2007. Fuente: Bautista y Silva (2005).	Pág. 86
Fig.4.13	a) Rosa de oleaje de verano para la celda Cancún con observaciones de 1948 al 2007 b) Rosa de altura de ola máxima de tormenta para la celda Cancún. Fuente: Bautista y Silva (2005).	Pág. 86

Fig.4.14	a) Gráfica de probabilidad de excedencia para la celda Cancún con observaciones de 1948 al 2007 b) Distribución de Weibull a largo plazo para la altura de ola significativa para el periodo de tiempo de 1948 al 2007 para la celda Cancún (la línea recta representa el mejor ajuste de las observaciones). Fuente: Bautista y Silva (2005).	Pág. 87
Fig.4.15	a) Mapa de altura de ola significativa para un periodo de retorno de 50 años b) Mapa de altura de ola significativa máxima histórica para la vertiente Atlántica Mexicana. Fuente: Bautista y Silva (2005).	Pág. 88
Fig.4.16	Rosa de energía correspondiente a la celda Cancún. Fuente: Bautista y Silva (2005).	Pág. 88
Fig.4.17	Mapa de energía normalizada máxima histórica para la vertiente atlántica mexicana. Fuente: Bautista y Silva (2005).	Pág. 89
Fig.4.18	Vista del sector norte de la isla barrera de Cancún. Se indica con una flecha la localización de los geotubos instalados. Fuente: Internet.	Pág. 90
Fig.4.19	a) Obras de protección instaladas por particulares b) Invasión de la duna litoral y de la playa. Fuente: Internet.	Pág. 92
Fig.4.20	Deterioro de un tramo de vía paralelo a la costa debido a la erosión en la isla de Cozumel. Fuente: Internet.	Pág. 93
Fig.4.21	Vistas de la draga Volvox Terranova. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración.	Pág. 93
Fig.4.22	Vista de la draga Kaishuu. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración.	Pág. 93
Fig.4.23	Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 1. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.	Pág. 95
Fig.4.24	Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 2. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.	Pág. 95
Fig.4.25	Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 3. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.	Pág. 96
Fig.4.26	Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 4. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.	Pág. 96
Fig.4.27	Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 6. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005	Pág. 97
Fig.4.28	Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 9. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.	Pág. 98
Fig.4.29	Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 10. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.	Pág. 98
Fig.4.30	Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 11. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.	Pág. 99

Fig.4.31	Pérdida de costa hacia propiedad privada sección 12. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún 2005.	Pág. 99
Fig.4.32	Fotografías de las actividades de vertido en las playas de la zona hotelera de Cancún. El límite del vertido se ubicó a la altura del Hotel Royal Solaris a aproximadamente 1.5 Km al Norte de Punta Nizuc. Vertido de la draga KAISHUU. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración.	Pág. 100
Fig.4.33	Acciones de vertido en Playa del Carmen, donde se verificó la medida, en específico la no existencia de organismos vivos dentro de la ZOFEMAT. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración	Pág. 100
Fig.4.34	Actividades de vertido en Playa del Carmen, entre la Terminal Marítima y el muelle de ultramar (a la altura del hotel 10 & The Beach). El vertido de la draga KAISHUU inicio a 800 m al sur del muelle de la Av. Constituyentes en Playa del Carmen. Imagen tomada por personal de la UNAM en el proyecto de restauración.	Pág. 101
Fig.4.35	Vertido de arenas para la Restitución de Playas Nizuc-Cancun, sin obras de cierre adicionales. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún.	Pág. 101
Fig.4.36	a) Sanitarios en playa, b) Manejo de residuos peligrosos, c) Mantenimiento de maquinaria en playa uso de equipo anti derrame. Fotografías tomadas por personal de CFE.	Pág. 102
Fig.4.37	Fotografía de Cancún, indicando las rutas de navegación y la ubicación de los bancos Megarizaduras y Ollita. Fuente: Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún.	Pág. 103
Fig.4.38	Dispositivos de medición en la primera imagen se puede observar el disco de Secchi . Fotografías tomadas por personal de CFE.	Pág. 105
Fig.4.39	Estaciones de monitoreo en Cancún. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.	Pág. 106
Fig.4.40	Ubicación de los puntos de muestreo de calidad del agua, en el frente costero de playa del Carmen. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.	Pág. 107
Fig.4.41	Protección de especies que viven en las playas antes y después del vertido. Fotos tomadas por personal de CFE.	Pág. 108
Fig.4.42	Afectación al ecosistema Aviar. Foto tomada en el desarrollo del proyecto CFE.	Pág. 109
Fig.4.43	En las imágenes se puede apreciar gráficamente la posición de cada uno de los colectores enlistados en la tabla anterior. Imagen empleada en el reporte de CFE.	Pág. 110
Fig.4.44	Señalamientos de medida de seguridad para los turistas. Fotos tomadas por el acreditado ambiental	Pág. 110



## ANEXOS DE TABLAS

Tabla 1.1	Factores del cambio climático. Fuente: tesis de efectos del cambio climático en el escurrimiento natural superficial de la cuenca el sistema hidroeléctrico del rio Grijalva 2011	Pág. 6
Tabla 1.2	PIB de Yucatan. Fuente : INEGI 2009	Pág. 21
Tabla 2.1	Características de una onda. Fuente: Wikipedia	Pág. 34
Tabla 2.2	Parámetros adimensionales de onda. Fuente: Wikipedia	Pág. 35
Tabla 2.3	Profundidad relativa del oleaje. Fuente: Wikipedia	Pág. 35
Tabla 2.4	Escala de los movimientos atmosféricos. Fuente: Wikipedia	Pág. 43
Tabla 2.5	Escala de Beaufort. Fuente: <a href="http://esrenovable.blogspot.com/2007/10/la-escala-de-beaufort.html">http://esrenovable.blogspot.com/2007/10/la-escala-de-beaufort.html</a>	Pág. 47
Tabla de datos 4.1	Evolución del ancho de playa entre 1970 y 1999. Se presentan valores de ancho de playa máximos, medios y mínimos encontrados a partir del análisis de mosaicos de imágenes. Fuente: Tesis Fuente: Ramírez (2006).	Pág. 79
Tabla de datos 4.2	Situación actual de tres sectores de la Riviera. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.	Pág. 91
Tabla de datos 4.3	Parámetros físicos, químicos y de campo determinados. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.	Pág. 105
Tabla de datos 4.4	Nombre y ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo en Cancún. Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.	Pág. 106
Tabla de datos 4.5	Ubicación de las estaciones de muestreo en Playa del Carmen Fuente: Informe de recuperación de la Riviera Maya UNAM.	Pág. 107

## ANEXOS DE GRÁFICAS

Gráfica 1.1	MODELOS CLIMATOLÓGICOS, ANOMALÍAS DE LA TEMPERATURA, AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR Y EXTENSIÓN DE LA CUBIERTA DE HIELO. Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), Climate Change 2007 - The Physical Scienc	Pág. 8
Gráfica 1.2	Comparison of seagrass, salt marsh, mangrove, and coral reef habitats in terms of (a) journal publications (Web of Science 1950–2006) and (b) citations in more broadly accessed media (Google and Web of Science), and estimated monetary value of ecosystem services provided by these habitats (Costanza et al. 1997).	Pág. 9
Gráfica 1.3	Estructura del PIB Yucatan Fuente: INEGI 2009	Pág. 21

---

## BIBLIOGRAFÍA

- *PDHengineer.com*, Course № C-3018, History of Coastal Engineering (2002)
- Manejo costero integrado y sustentabilidad un análisis propositivo de políticas públicas Universidad de Cadiz (2010)
- La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe Alicia Bárcena Síntesis (2010)
- Alternative Shoreline Stabilization Devices, Western Carolina University - Beach Stabilization
- Coastal adaptation technologies, United Nations framework convention on climate change subsidiary body for scientific and technology advice (2000)
- Efectos del cambio climático en el escurrimiento natural superficial de la cuenca del sistema hidroeléctrico del río Grijalva UNAM (2011)
- Potential Negative Impacts Associated with Alternative Devices, Western Carolina University - Beach Stabilization
- Conceptual description of a soft-shore alternative to marine bulkheads and revetments: the “root wall”, environmental education assessment & management. (2002)
- Seagrass, biology, ecology and conservation Anthony W.D. Larkum
- A global crisis for seagrass ecosystems. Robert J. Orth, Tim J. B. Carruthers (2006).
- SEAGRASS HABITAT IN THE GULF OF MEXICO: Degradation, Conservation and Restoration of a Valuable Resource. <http://www.epa.gov/gmpo/>
- Shore Erosion Control Guidelines Marsh Creation, Maryland Department of the Environment Wetlands and Waterways Program March (2006)
- El sistema litoral. Formación y morfología costera. Humedales costeros, arrecifes y manglares. Capítulo 5
- Estructuras marinas. Capítulo 14 (2002)
- Alternative systems for coastal protection an overview krystian w. pilarczyk rykswaterstaat, hydraulic engineering institute (2011).
- Coastal erosion management manual Chapter 5 your response to the problem (2003).
- Diagnóstico de los procesos de erosión en las playas arenosas del Caribe. PNUMA/GPA, Marzo, (2003).
- Erosion control techniques and permitting. lake chelan hydroelectric project. (2000).
- A guide to managing coastal erosion in beach/dune systems. (2008)

- Mechanism of Stabilization of Beach Profile under Storm Waves Nobuyuki Ono, Isao Irie, Masaki yokota, Hiroshi Yamaguchi Department of Civil Engineering, Graduate School of Kyushu University Fukuoka, Japan (2002)
- ¿Qué es erosión costera?, CIMBRA / N° 380 / MARZO - ABRIL (2008)
- Shore erosion control guidelines for waterfront property owners (2006)
- Evolución Morfológica de playa comprendida entre punta Cancún y punta Niczu UNAM 2006
- Introducción a los procesos costeros. Ministerio de medio ambiente y recursos naturales servicio nacional de estudios territoriales servicio oceanográfico nacional unidad de geología marina (2009)
- Origen y evolución de playas en una zona semiárida con arenas eólicas (región de Coca, Cuenca del Duero, España) G. Desir, M. Gutiérrez Elorza y F. Gutiérrez Santolalla (2003)
- Shoreline restored with geotextile tubes as submerged breakwaters. .Geosyntheticsmagazine Enrique Alvarez, Ramiro Rubio,( 2006).
- Distribución del sedimento en las costas de Yucatán y Quintana Roo. Ruíz Cavazos Dalila, Ruíz Martínez Gabriel, Mendoza Baldwin Edgar Gerardo y Silva Casarín. Rodolfo4. (2010)
- ProMéxico inversión y comercio Yucatán (2010)
- Escalas espaciales y temporales del manejo costero. Capitulo 3, Isaac Azuz Adeath y Evelia Rivera Arriaga. (2003).
- Infraestructura de protección costera UNAM .Capitulo 13. Paulo Salles Afonso de Almeida y Rodolfo Silva Casarín.
- El manejo de los cambios en la morfología costera. UNAM Capitulo 16. *Isaac A. Azuz Adeath*
- El futuro del manejo costero en México. UNAM Capitulo 47. *Antonio Díaz de León-Corral1, Porfirio Alvarez-Torres1, Fausto Efrén-Burgoa2 y Gustavo Pérez-Chirinos1*
- Informe final\* del Proyecto CQ061 Dictamen Técnico y Manifestación de Impacto Ambiental para el proyecto de restitución de playas de Cancún (2005).
- Proyecto para la regeneración de playas en Playa del Carmen, Q. R. Reporte parcial. CFE (2006).
- Planeamiento y Gestión del Sistema Costero Presentación José A. Jiménez. (2007).
- Situación ambiental de la zona costera y marina en particular humedales costeros y manglares. SEMARNAT. 2000-2006
-