



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ANALISIS DE LA EROSION EN LA
PLAYA DE HOLBOX

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

MARIANO NICOLAS CRUZ BOURNAZOU



MEXICO, D. F.



2005

m. 345053

EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente	Prof. María Isabel Gracia Mora
Vocal	Prof. Martín Merino Ibarra
Secretario	Prof. Ana María Martínez Vázquez
1er. Suplente	Prof. Ricardo Pérez Camacho
2º. Suplente	Prof. Martín Rivera Toledo

Sitio en donde se desarrolló el tema


Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM

Asesora



Ana María Martínez Vázquez

Sustentante



Mariano Nicolás Cruz Bournazou

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Mariano Nicolás Cruz Bournazou

FECHA: 31 junio 2005

FIRMA: Mariano Cruz

Este trabajo fue posible gracias al apoyo generoso y desinteresado de un grupo numeroso de personas cuya lista sería demasiado extensa para citar en estas pocas líneas, a todas ellas debo mi más sincero reconocimiento. Sin embargo, me parece indispensable dirigir una mención especial al MVZ. Francisco Remolina (Director de la Reserva Yum Balam), al Dr. Jorge Euan, (CINVESTAV Mérida), a Norma Betancourt Sabatini (Directora de Proyectos de la Reserva Yum Balam), al Dr. Martín Merino (Ciencias del Mar, UNAM), a la Dra. Isabel Gracia (F. Q., UNAM), a mi tutora Ana María Martínez (IIM, UNAM); finalmente quiero agradecer a la Dirección General de Apoyo al Personal Académico y al Programa de Apoyo a la Investigación y la Innovación Tecnológica por el apoyo económico otorgado (beca de proyecto IN222904/15).

ÍNDICE

Introducción	1
Entrevistas a los pobladores	18
Fotos aéreas	19
Análisis Granulométrico	21
Oleaje	22
Antecedentes	24
Objetivos	25
Hipótesis	26
Procedimiento	26
Entrevistas	26
Estudio de Fotos Aéreas	29
Análisis Granulométrico	31
Análisis de Oleaje	32
Análisis de resultados	34
Entrevistas	34
Estudio de Fotografías Aéreas	43
Análisis cualitativo	43
Análisis cuantitativo	48
Análisis Granulométrico	52
Oleaje	58
Conclusiones	63
Bibliografía	65

Introducción

La humanidad siempre se ha sorprendido por la diversidad del ambiente en las zonas donde el mar y la tierra se unen, desde los glaciares hasta las cálidas costas con arena blanca, pasando por las enormes rocas que resisten el embate de las olas. Existen personas que han organizado sus vidas cerca del mar donde consiguen alimento y en estos días, gracias al desarrollo económico, una fuente de ingresos por medio del turismo.

Como sucede alrededor de todo el mundo, la humanidad altera los ecosistemas que habita. Sin embargo, al vivir en la interfase que divide a la tierra del mar, su presencia afecta dos ecosistemas distintos, el terrestre y el marino. Es por esto que realizar estudios para poder comprender los efectos que tienen las personas que habitan estas zonas es muy importante.

Uno de los muchos problemas que puede causar la presencia humana en ecosistemas naturales es la erosión acelerada en ambientes que no están preparados para resistirla. Por medio de distintas acciones como la destrucción de la vegetación, la construcción y la alteración de la geomorfología del lugar entre otras, la humanidad acelera la erosión y altera el equilibrio que antes existía. Este es un fenómeno que también sucede en las playas. Aquí las grandes construcciones hoteleras, la colocación de muelles o puertos y la deforestación de la vegetación como los mangles, aceleran la erosión y provocan que la playa pierda terreno frente al mar. Al suceder esto, varias especies se ven afectadas, así como pequeñas poblaciones y en casos extremos, ecosistemas enteros. Por consecuencia, es responsabilidad del ser humano remendar el daño ocasionado, y procurar que no se vuelva a presentar.

Al igual que en otras partes del mundo, a lo largo de toda la costa en la península de Yucatán se presentan las llamadas "Islas de Barrera". Este tipo de islas se forma a causa de la deposición de arena en zonas cercanas a la placa continental. Entre las islas y el continente se forman lagunas como las de

Cancún o Tizimín. Como parte de su evolución natural, estas islas se mantienen en constante cambio al sufrir erosión en la parte que ve al mar, y deposición en la zona de la laguna. Este movimiento se prolonga hasta que la isla se une a la placa continental y pasa a ser parte de su playa. Los pobladores que habitan en estas islas han ocasionado cambios en la dinámica de la Isla, acelerando así su erosión. La falta de conocimiento y de una planeación adecuada ha provocado que los proyectos realizados en algunas de estas islas no logren hasta ahora resolver el problema. Un claro ejemplo de este problema es la isla de Holbox.

Holbox es una "isla de barrera" de aproximadamente 80 km² situada en la península de Yucatán, justo en la frontera que divide al Mar Caribe del Golfo de México, entre los paralelos 21°12'60" y 21°13'60" latitud norte y los meridianos 87°10'80" y 87°12'90" longitud oeste. Se encuentra en el Municipio de Lázaro Cárdenas, en la porción Noroeste del Estado de Quintana Roo. Forma parte del Área de Protección de Flora y Fauna conocida como Yum Balam (Figura 1).

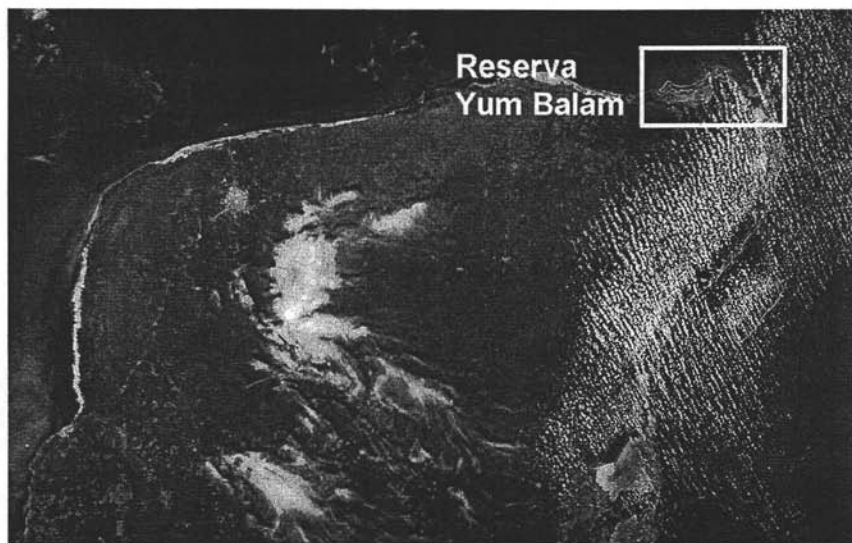


Figura 1 Península de Yucatán, Yum Balam

Yum Balam fue decretada Área Natural Protegida el 6 de junio de 1994, de acuerdo a lo que se publicó en el Diario Oficial de la Federación. Tiene una

superficie de 154,052.25 Ha. La importancia de la zona radica en su hábitat. Es un área importante para más de treinta especies de aves terrestres que migran, cruzando el Golfo de México desde Lousiana y el oeste de Florida, hasta la península de Yucatán. Es el primer sitio de descanso en tierra firme al que llegan estas aves. Para estas especies es crítico el disponer de este hábitat para reabastecerse y así continuar su viaje hacia América del Sur, o bien permanecer en la península durante el invierno. Presenta ecosistemas con biodiversidad neotropical, que albergan especies endémicas, raras y en peligro de extinción.

Estos ecosistemas constituyen una extensión de la selva y los humedales de la Reserva Especial de la Biósfera Río Lagartos, en el Estado de Yucatán, única área de nuestro país que se ubica en la Convención de Humedales de Importancia Mundial. Los pantanos y humedales que la conforman son hábitats de aves acuáticas, migratorias y residentes. En la zona se han reportado diversas especies protegidas como las tortugas marinas caguama (*Caretta caretta*), el manatí (*Trichechus manatus*), el jaguar (*Panthera onca*), los venados temazate (*Mazama americana*) y cola blanca (*Odocoileus virginianus*). En la isla también se encuentran vestigios arqueológicos y se registran acervos culturales e históricos de los indígenas de la región.¹

Para llegar a la Isla de Holbox (Figura 2) se recorre la carretera a Cobá y la antigua carretera Cancún-Mérida, hasta que se llega al poblado de Chiquilá, el más cercano a la Isla y donde se pueden tomar embarcaciones hacia el puerto de Holbox.

Holbox cuenta con una población de 1276 habitantes según el censo del INEGI de 2000. En el 2002 un estudio socioeconómico (Tran,2002) contó 2100 personas, lo que indica que la tasa de crecimiento de la población de la zona es relativamente alta. Holbox ha cambiado, de la misma manera que toda la zona del Caribe, de una economía netamente pesquera a una actividad basada en el turismo. La infraestructura urbana que existe en la isla es limitada. Los caminos no están pavimentados y no hay vehículos motorizados (sólo

¹ Secretaría Estatal de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente/Secretaría Estatal de Turismo.

tricicletas y carros de golf). Sin embargo, el rápido desarrollo del turismo en los últimos diez años ha conducido a una acelerada construcción de edificios para poder acomodar a los visitantes.

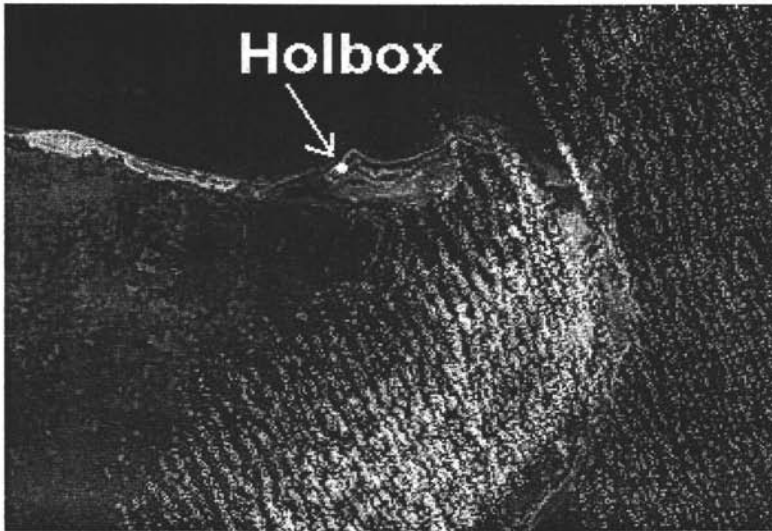


Figura 2 Península de Yucatán, Holbox

Holbox es una "isla de barrera" es decir, una isla en la que la acumulación de los sedimentos, productos de la erosión marina y de los procesos hidrodinámicos costeros, ha dado lugar a la formación de una extensa isla sedimentaria, paralela a la línea de costa continental, y con lagunas costeras someras y humedales que las separan entre sí (Capurro, 2003). El litoral caribeño responde al mismo tipo de evolución, aunque cuenta además con la presencia de una extensa barrera de arrecifes de coral a flor de agua que además de constituir la principal atracción marina, actúa como rompeolas y amortigua la erosión marina generada por las olas y corrientes. Sin embargo, en Holbox no existe la barrera coralina, por lo que la isla está en general menos protegida.

Toda la península de Yucatán está caracterizada por su costa de tipo "Isla de barrera" (es decir, la secuencia playa - isla de barrera - laguna costera - continente) (Capurro, 2003). En la mayoría de los casos, la gran y continua

laguna costera está dividida en varias lagunas parciales, como Chelem, Chuburná y otras, y es aquí donde se puede observar que la erosión es un proceso natural de las islas de barrera; la isla se desgasta en su lado oceánico y crece en su costado lagunar, desde Celestún hasta Campeche, con lo cual desaparece la isla de barrera. La erosión llega a tal grado, que lo único que queda es un litoral sin playas con una línea de costa cubierta por manglares profusos que llegan hasta su contacto con el mar (Capurro, 2003). Los manglares encuentran aquí condiciones adecuadas debido a los ojos de agua dulce del acuífero peninsular, que en su contacto con el agua de mar crean condiciones de salinidad óptimas para su desarrollo. Esto muestra que un factor que evita el movimiento de este tipo de islas es la vegetación. Al crecer árboles en la isla, sus raíces evitan la erosión y forman terrenos fijos.

Hace cuarenta años aproximadamente, Holbox sufrió un cambio importante en su vegetación cuando el amarillamiento letal del cocotero atacó las palmeras de la isla. El amarillamiento letal del cocotero es una enfermedad que afecta principalmente especies dentro de la familia Palmae. Una vez que llega a una isla o región continental, la muerte de cocotereros alcanza el 80% ó más de la población. Un caso particular que indica el potencial destructor de la enfermedad es el de Jamaica (Figura 3), en donde en 20 años (1961-1981), la población original de cocotereros estimada en unos seis millones, fue diezmada de manera abrupta (S.J. Eden-Green).

En Holbox, esta plaga afectó parte de la economía de la isla que se dedicaba al plantío de cocotereros. También se cree que al desaparecer las palmeras, la erosión aumentó y empezó a disminuir el perfil de playa. Los cocos no sólo ayudan a evitar la erosión al fijar la arena, con su altura también disminuyen el efecto erosivo que tiene el viento (Hsu, 1988). Los habitantes cuentan que en estos cuarenta años ha desaparecido hasta una cancha de béisbol que se encontraba en la playa, lo que indica la gravedad del caso. A este problema se le suma la aceleración de la erosión por el factor humano. Con el fin de detener la erosión se construyeron seis espigones en 1970, a los cuales le siguieron doce más en 1980 en posición perpendicular a la línea de playa.



Figura 3 Jamaica afectada por el amarillamiento letal

Los espigones aceleraron el proceso de erosión, ya que no permiten el paso de las corrientes cercanas a la costa que son las encargadas de distribuir los sedimentos (Euan, 2004).

Hoy día, en Holbox la erosión continúa y la necesidad de atacar el problema con otro método es evidente. La erosión natural que está sufriendo la playa, agudizada por la presencia de los espigones, amenaza la supervivencia del pueblo a largo plazo y la economía del lugar. Los hoteles están perdiendo sus playas y varios terrenos están desapareciendo. Esto además empieza a presentar un problema legal de tenencia de la tierra, ya que de acuerdo con la Ley General de Bienes Nacionales (Artículo 49, fracción I), cuando la costa presenta playas, la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT) estará constituida por la faja de 20.00 metros de ancho de tierra firme, transitable y contigua a dichas playas(Figura 4).

Por playa se entiende (Artículo 29, fracción IV), "las partes de tierra que, por virtud de la marea, cubre y descubre el agua desde los límites de mayor reflujo, hasta los límites de menor flujo anuales, es decir, desde la bajamar hasta el pleamar". Como la playa se erosiona, la ZOFEMAT cada vez se encuentra más cerca de los límites del terreno de los hoteles, incluso parte de los hoteles ya se encuentran en la ZOFEMAT. Es por esta razón que en Holbox se tomó la

decisión de realizar algunos proyectos, los cuales no han producido ningún beneficio a la población. Después de efectuar un estudio cuyos resultados no fueron expuestos a la comunidad, se optó por la construcción de espigones.

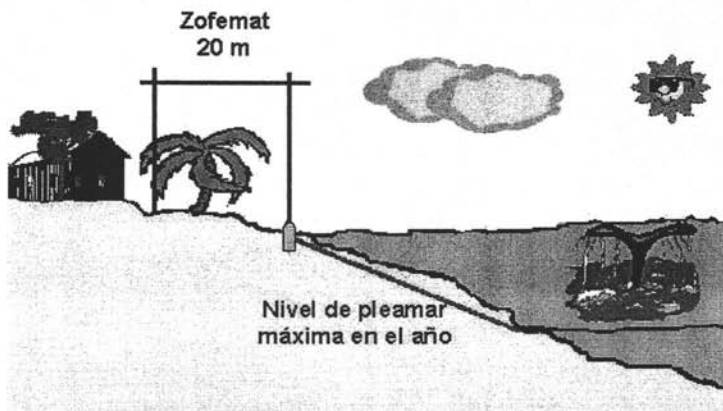


Figura 4 Esquema de la Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT)

Los espigones (Figura 5) son estructuras situadas generalmente de manera perpendicular a la línea de playa. El efecto de un solo espigón es la acumulación de sedimentos del lado que ve hacia la corriente litoral y la erosión amplificada del otro costado (Figura 6).

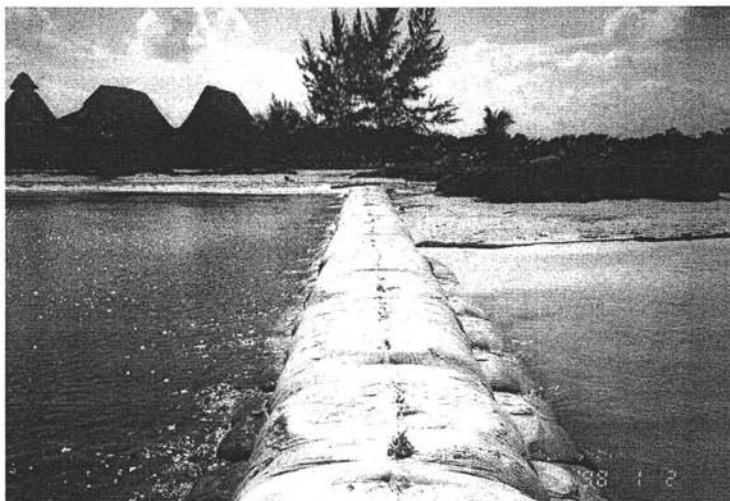


Figura 5 Espigón donde se observa la erosión de lado derecho y la deposición de sedimento de lado izquierdo.

Estas estructuras pueden indicar la dirección del transporte litoral ya que tienen una particularidad. Los espigones detienen el transporte horizontal de sedimentos a lo largo de la zona donde rompen las olas. El propósito de su colocación es detener la erosión que provoca este transporte. Por desgracia, al evitar este transporte también detiene la deposición en la parte subsiguiente al espigón en dirección de la corriente.

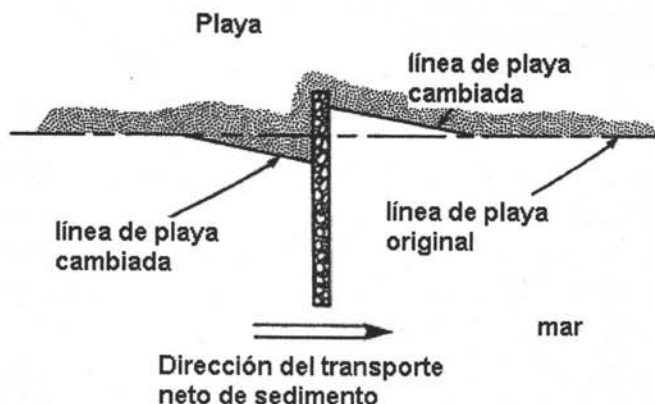


Figura 6 Esquema de un espigón y su efecto en el perfil de la playa, Adaptado de CEM, Cap V-3

Este fenómeno provoca que el lado del espigón que ve hacia la corriente (el cual llamaremos "corriente arriba") acumule sedimentos y promueve un crecimiento del perfil de playa. Sin embargo, el lado contrario (el cual llamaremos "corriente abajo") presenta una erosión acelerada, ya que deja de recibir nuevo sedimento a causa del espigón que lo detiene. Al colocar todo un sistema de espigones, cada uno de estos presenta un lado con erosión y otro con deposición. El resultado es una forma de "dientes picudos" a lo largo de toda la playa, como se observa en la Figura 7.

Los espigones se construyen con la intención de disminuir la erosión en la costa. Sin embargo, también se emplean para evitar la sedimentación en zonas donde no se desea perder la profundidad para propósitos marítimos generalmente. Los espigones generan patrones de corrientes y olas muy complicados, por lo que es necesario un estudio detallado para que su

colocación produzca los resultados deseados (Kraus, Hanson, y Blomgren 1994).

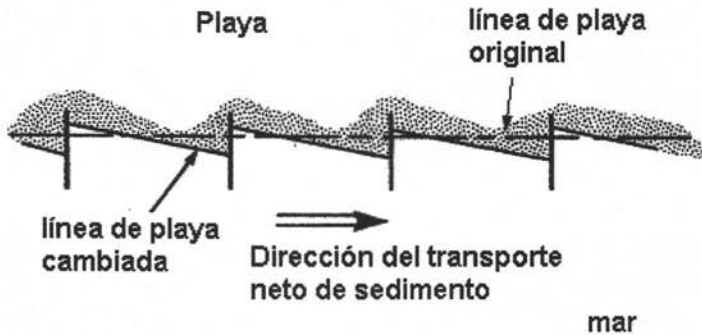


Figura 7 Esquema de una serie de espigones donde se observa la formación de "dientes picudos" en la costa, adaptado de CEM, Cap V-3

Las principales variables de los espigones que se deben contemplar son: el largo, la altura, la permeabilidad y la distancia entre ellos. Alterando estos valores se pueden obtener resultados completamente distintos. Es por esto que los espigones sólo se utilizan en casos muy específicos, donde se cuenta con todos los datos necesarios y se sabe que representan una clara ventaja sobre las demás soluciones.

La colocación de espigones ha fracasado en la mayoría de los casos en los que se han utilizado para detener la erosión. Los espigones son estructuras que presentan respuestas muy distintas en cada proyecto. A pesar de que se han realizado extensos estudios sobre su funcionamiento, no es posible predecir con certeza su efecto en el perfil de playa (Kraus and Bocamazo, 2000). En cambio se han utilizado otras estructuras que presentan mejores resultados y los riesgos de efectos negativos son menores. Estas estructuras se conocen como rompeolas (Figura 8). Como su nombre lo indica, un rompeolas es colocado para romper una ola, es decir, para reducir su energía. Esto se logra colocando una pared dentro del mar en posición paralela al perfil de la playa con el fin de que la ola choque contra esta estructura antes de

llegar a la playa. Estas estructuras han demostrado ser efectivas para controlar la erosión (Lesnick 1979).

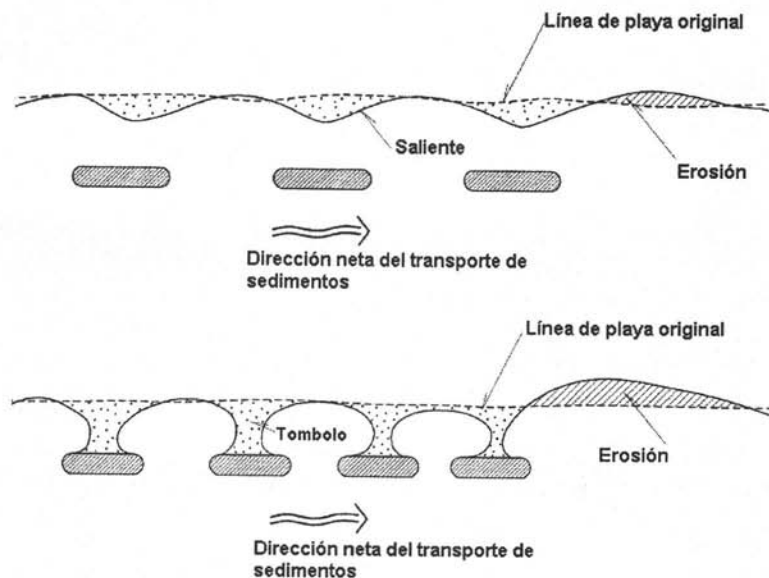


Figura 8 Esquema de rompeolas y sus efectos. Adaptado de CEM, CapV-3

Para predecir el comportamiento de los rompeolas y con esto diseñarlos se utilizan modelos sencillos (Fulford 1985). En estos modelos se considera que las olas son constantes en cuanto a dirección y fuerza. Por esto la ola va a romper simultáneamente en toda la periferia y no existirán corrientes a lo largo del perfil de la playa. La tangente de la sección de tierra es exactamente paralela a la normal de la dirección de la ola. Cuando esto sucede se dice que la playa se encuentra en equilibrio estático, lo que lleva a que se mantenga así hasta que haya un cambio significativo en las olas. El proceso en el cual la playa cambia continuamente su forma debido a estas particularidades, sin que estos cambios sean tan drásticos como para impedir que cuando el sistema se encuentre en condiciones normales logre inducir al perfil de playa a su forma original, es característico de una playa en "equilibrio dinámico". Al no poder predecir por medio de cálculos un equilibrio dinámico, se supone un equilibrio

estático para lograr el diseño de los rompeolas. Hsu, Silvester and Xia (1987, 1989), desarrollaron un modelo.

Es importante calcular el largo mínimo que debe tener un rompeolas, para poder controlar la erosión y además otorgar protección contra tormentas. En estos cálculos debe considerarse el largo del rompeolas, la distancia entre los rompeolas, la profundidad en el punto donde está situado el rompeolas, la erosión provocada por la tormenta considerada, y la distancia entre el rompeolas y la línea de playa original. Al colocar un rompeolas existe el riesgo de formar "tombolos", que no son mas que espigones formados por la deposición de arena formando una unión entre el rompeolas y la playa (Ver Figura 8). Para evitar una repuesta no deseada por parte del perfil de playa, se tienen que realizar cálculos que proporcionan un diagnóstico aproximado Dally and Pope (1986).

Las variables que más influyen en el funcionamiento de los rompeolas son:

Y = distancia entre el rompeolas y la línea de playa

L_s = longitud del rompeolas

L_g = distancia entre cada rompeolas en caso de formar un sistema

d_s = profundidad por debajo del nivel promedio del agua

L = altura de la ola

Dally and Pope (1986) proporcionan una tabla (Tabla 1) donde la relación L_s/Y es el principal indicador de la formación o no de tombolos.

Tabla 1. Indicadores de formación de tombolos

Valor L_s/Y	Respuesta de la playa
De 1.5 a 2	Formación de tombolos (un rompeolas)
1.5	Con la restricción $L \leq L_g \leq L_s$; formación de tombolos en sistemas con más de un rompeolas
De 0.5 a 0.67	Formación de salientes pronunciadas
0.125	Formación de salientes en sistemas muy largos

Ahrens and Cox (1990) por su lado presentan un índice de respuesta (I_s) que considera los mismos aspectos, pero de manera exponencial de acuerdo al siguiente factor y como se plantea en la Tabla 2.

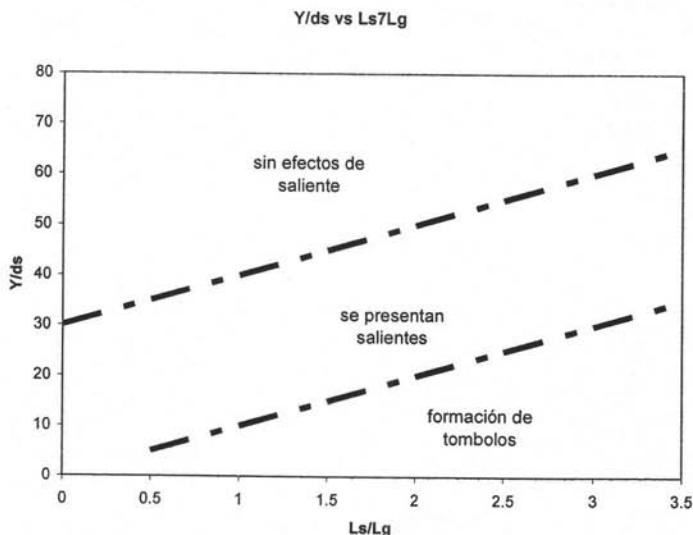
$$I_s = \exp(1.72 - 0.41(L_s/Y))$$

Tabla 2. Índice de respuesta para formación de tombolos

Valor del índice de respuesta (I_s)	Resultado previsto
1	Se forma un tombolo permanente
2	Se forma un tombolo periódico
3	Se forma una saliente importante
4	Se forma una saliente ligera
5	No se presenta alteración en la forma de la playa

Otra relación importante es L_s/L_g . Esto es, mientras mayor es el espacio entre rompeolas (menor la relación L_s/L_g) mayor es la energía del oleaje que puede entrar e impedir la formación del tombolo. Esta relación junto con Y/d_s (la relación entre la distancia y la profundidad) se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Relación Y/d_s versus L_s/L_g como indicador de la formación de tombolos.



Como se observa en la tabla anterior, existe una relación L_s/L_g óptima para la formación de salientes que es lo que frena la erosión. Si el proyecto se encuentra en la sección superior, los rompeolas no inducen ningún efecto en el cambio de la dinámica de la costa. En segunda sección que es la intermedia, los rompeolas promueven la formación de salientes y frenan la erosión sin que se llegue al grado de formar tombolos. En la sección inferior, los rompeolas están demasiado cerca de la playa y entre ellos, lo que provoca que se formen tombolos y se sufran problemas similares a los que ocasionan los espigones.

Un ejemplo del éxito obtenido por los rompeolas se puede ver en la isla de Presque (Figura 9) (Mohr 1994), en donde se han construido sesenta rompeolas desde 1985, cuyos efectos han sido monitoreados y analizados con el fin de comprender más a fondo su funcionamiento.



Figura 9 Isla de Presque, (fotografía de CEM)

En Holbox se han colocado rompeolas. Uno de los espigones tiene un rompeolas atravesado que le da la forma de cruz². Esta estructura funciona igual que un rompeolas que ha formado un tombolo y es la única estructura que presenta deposición en la zona en la que se encuentra. Por lo mismo y como veremos más adelante, los rompeolas representan una buena alternativa para detener la erosión en Holbox.

Otra alternativa para evitar la erosión es la creación de arrecifes artificiales. Estos tienen el mismo principio que los rompeolas, sin embargo no afectan la estética de la playa ya que se encuentran sumergidos. Además permiten el crecimiento de seres vivos y con esto promueven la recuperación animal y vegetal de la zona.

Dentro de las medidas de restauración y rehabilitación de ecosistemas costeros, los arrecifes artificiales representan una herramienta de ordenación y protección ecológica. Un arrecife artificial definido por la ERAN (*The European Reef Research Network*) es una estructura sumergida localizada deliberadamente, con algunas características de los arrecifes naturales y completamente mimetizada. Hay numerosos ejemplos a nivel mundial donde estas estructuras se han utilizado para realizar varias funciones, Por ejemplo; (1) la protección física de ecosistemas sensibles y frágiles, (2) la adición o reposición de la complejidad de hábitats, (3) la creación de nuevos sustratos, (4) la sustitución de algún recurso socioeconómico, (5) la disminución de la pesca ilegal dificultando el uso de redes de arrastre y (6) el control de la erosión de las playas.

El material con el que se pueden construir los arrecifes artificiales es muy variado. En Europa, el concreto es el material predominante, aunque se ha investigado el re-uso de materiales pulverizados. En Japón se manipulan materiales para la construcción de arrecifes en donde sus materias primas incluyen metal y fibra de vidrio. En Australia, Jamaica y Filipinas se utilizan las llantas porque en estos lugares no son tóxicas; contrariamente en Europa las

² En la Figura 14 se presenta este espigón con el número 2.

llantas son consideradas por muchos una contaminación. En México se han utilizado barcos de la Secretaría de Marina que se han hundido deliberadamente para la creación de arrecifes artificiales.

Particularmente en la zona de Melaque (en Jalisco) se han construido arrecifes artificiales de concreto, con varillas de hierro en su interior y estructuras tubulares de plástico que forman las zonas de refugio para las distintas especies. Estos arrecifes artificiales se cubren de algas y corales en poco tiempo. Además, por su forma, sirven para evitar la pesca por arrastre que tanto daña a ciertos ecosistemas marinos, y con estos se detiene la sobrepesca.

Antes de realizar una nueva propuesta en el caso de Holbox, es importante recordar que para encontrar solución a los problemas de la erosión y poder decidir que proyecto es el más adecuado, se requiere acudir a la ingeniería costera, que es la que estudia este tipo de fenómenos y sus posibles soluciones. En la construcción de muelles, diques y canales, es necesario hacer una evaluación previa de los efectos que pueden causar estos cambios a largo plazo, ya que de otra forma los resultados pueden ser distintos a los deseados. Es importante revisar todos los aspectos del sistema a estudiar, incluyendo factores que pudieran parecer insignificantes, como son el aire, el tipo de arena y los cambios de corriente. Otro factor importante es el estudio de las olas, su movimiento, su energía, la dirección, la altura máxima y los distintos métodos que existen para alterar estas variables. En países como Holanda, Japón, Reino Unido, y Estados Unidos han hecho grandes avances al respecto. Las inversiones en este rubro son muy importantes. Por ejemplo, España invirtió 200 millones de dólares (MDD) en este rubro en el periodo de 1993 a 1997, Alemania invierte desde hace años 90 MDD anuales, Holanda invirtió 32 MDD en 1994 y en los EE.UU. la inversión anual ha sido de 15 MDD a lo largo de los últimos 40 años (SEMARNAT).

También en México se han hecho grandes inversiones en este campo. Debido al impacto del huracán Gilberto se perdió una buena parte de las playas a lo largo de 12 km, especialmente las que se localizan entre Punta Cancún y

Punta Nizuc. Debido a esto se inició un proyecto con el propósito de restaurar una franja de playa de 60 metros de anchura en los 12 kilómetros, y construir un gran Boulevard Peatonal Playero de 12 km. de longitud (Figura 10). Para esto se rellenó la zona con 4 millones de metros cúbicos de arena, y se construyeron diques de protección en Punta Cancún y en Punta Nizuc . La inversión efectuada se estima en 40 millones de dólares. El proyecto fue elaborado por la CFE, y financiado por Fonatur, el Municipio y la Semarnat. Por último fue aprobado por las autoridades federales, estatales y municipales y la gran mayoría de los hoteleros afectados, quienes asumieron parte del costo de las obras.



Figura 10 Proyectos de ingeniería de costas en Cancún de www.semarnat.gob.mx.

Las costas separan el 29 % de espacio terrestre del 71 % de superficie marina en el planeta Tierra. Estos límites se encuentran en constante movimiento a consecuencia de la acción de las olas, los vientos y los sucesos naturales como lo son terremotos, huracanes y hasta meteoritos. La diversidad natural en las costas de México es de una gran magnitud, y los ecosistemas que aquí se presentan son específicos de la zona. Estas características peculiares, son las que complican la realización de proyectos en las playas mexicanas, ya que no es posible adoptar proyectos realizados en otras partes. Las condiciones que se presentan la dinámica de la playa son tan distintas que los resultados pueden llegar a ser totalmente inversos, especialmente en las costas del

caribe. Aquí es necesario volver a medir el comportamiento de todas las variables que se necesitan con el fin de comprender el comportamiento de éstas y su efecto sobre la forma de la costa.

Las costas son susceptibles a cambios por una infinidad de factores de los cuales los más influyentes son las olas, las mareas, las corrientes, la geología, la morfología y el uso que el hombre le da al suelo. Para el estudio de la dinámica de costas se deben tener presentes los siguientes aspectos:

- La costa es dinámica y se encuentra en constante evolución para alcanzar nuevas condiciones de equilibrio.

Esto es importante ya que al alterar la evolución natural de la costa se puede ocasionar un problema. Este es el caso de las islas de barrera, cuya evolución natural las lleva a desplazarse hasta unirse a la placa continental. Por lo tanto, al detener la erosión se puede estar alterando el ecosistema de la zona de manera irreversible.

- La interacción de los fenómenos que afectan la forma de la costa es distinta en cada lugar.

Esto significa que no es posible asumir que los resultados de un proyecto realizado en una zona, presenten los mismos resultados en otros lugares. Los sistemas que se utilizan para realizar el análisis y los procedimientos que se deciden aplicar para resolver el problema pueden ser útiles en ciertas zonas y totalmente obsoletos en otras. Un ejemplo es el dragado, el funcionamiento de este método que se utiliza para transportar sedimento de un lugar a otro, depende en gran medida del tipo de sedimento, por lo que puede funcionar muy bien en ciertas playas y ser inútil en otras.

Para evitar resultados adversos, es necesario conocer los principales factores que afectan la dinámica de la zona, que en este caso son el tamaño de sedimento y el oleaje, considerando su variabilidad con el tiempo y la magnitud de su influencia en el problema.

A lo largo del tiempo se han realizado diversos proyectos con el fin de detener la erosión, pero los resultados no han sido los deseados. En este trabajo se presenta un estudio cuyo objetivo principal es el de analizar la erosión y los efectos que los distintos proyectos han tenido en la línea de costa de la Isla de Holbox. Con esto tendremos una idea de la situación actual. Sin embargo, para tener un diagnóstico más completo es necesario comprender el ecosistema de la zona, en su estado previo y en su estado actual. Esto no es sencillo, ya que todos los estudios que se han realizado en la reserva son recientes, además de que la mayoría contemplan el interior de laguna de Yalahau mientras que la erosión se presenta del lado opuesto de la isla. Sin embargo, se puede obtener información sobre el estado de la isla desde hace cuarenta años a través de los pobladores de la isla. Por esta razón, para este trabajo se realizaron entrevistas a algunos pobladores. Además y con el fin de obtener información indispensable para el análisis de la situación actual, se analizó la granulometría, se estudiaron fotos aéreas y se analizó el oleaje. El orden en el cual se realizaron los distintos estudios fue:

1. Entrevistas a los pobladores para conocer el estado previo de la isla.
2. Análisis de las fotos aéreas realizadas en 2003.
3. Medición de la granulometría de la arena de la zona.
4. Cálculo aproximado de las características de las olas.

1. Entrevistas a los pobladores

En la mayoría de los estudios, y aún más en ciencias como la biología, una limitante importante es la falta de datos. Por algo dicen que "la vida es un conjunto de datos incompletos". Estos son esenciales, ya que permiten conocer el proceso que ha seguido el fenómeno a lo largo del tiempo, así como establecer su varianza y su confiabilidad. En el estudio de la costa no sólo se

necesitan una gran cantidad de datos, también se requieren mediciones durante por lo menos cinco años (USACE).

En muchos países la gente no piensa en la playa más que para nadar y pasear. Sin embargo, Holbox ha sido habitado desde hace más de cien años por gente que se dedica a la pesca principalmente. Los pescadores viven del mar y conocer su comportamiento representa una ventaja en su trabajo y también es indispensable para su seguridad. El mar realmente forma parte de su vida diaria. Es por esto que conocen bien su conducta y recuerdan las condiciones en las que se encontraba la playa hace varias décadas.

Se consideró que la experiencia acumulada por estas personas durante más de medio siglo puede ser de gran ayuda para el estudio. Esta experiencia puede sustituir, en cierta medida, la información histórica para este análisis. Es decir, de esta manera es posible tener un acercamiento a las condiciones en las que se encontraba el ecosistema en tiempos pasados.

Para las entrevistas se consideraron siete personas seleccionadas después de un sondeo realizado con la Directora de Proyectos de la Reserva Yum Balam (Norma Betancourt Sabatini). Al ser un pueblo con un número tan bajo de habitantes, Norma conoce a la mayoría de los pobladores. Gracias a su apoyo se encontraron las personas más indicadas.

2. Fotos Aéreas

El análisis de fotos aéreas nos permite determinar el comportamiento de ciertas variables, como el transporte litoral neto y el funcionamiento en general de los espigones con base en los resultados observados. Los resultados que se obtienen son de gran utilidad porque indican claramente la respuesta de la playa ante los espigones. Con el análisis de las fotos tomadas en la isla de Holbox se puede determinar la dirección predominante de la corriente litoral.

Las fotos también son útiles para determinar el efecto de los espigones en la dinámica de la costa.

Por medio de las fotos aéreas es posible determinar cual es la dirección de la corriente, estableciendo cual es el lado corriente arriba (en el que se acumula el sedimento), y cual es el lado corriente abajo (donde se acelera la erosión) en el espigón. Primero se forma un plano cartesiano con el espigón representando el eje Y, siendo el cero la punta del espigón que se encuentra en el mar, y el signo positivo en dirección a la playa. Una vez realizado esto, es posible otorgarle un signo a la dirección del transporte en la componente X. La magnitud de las componentes en ambos ejes no se puede determinar por medio de las fotos.

Es importante resaltar que la dirección del transporte solo se va a determinar para el caso de los espigones totalmente rectos. Los espigones con distintas formas (Figura 11), presentan comportamientos variados y el análisis se vuelve más complejo (Sorensen, 1990). Si un espigón tiene una forma curva, con la punta doblada en la misma dirección que la corriente, se debe ver el problema como un espigón y un rompeolas juntos. En este caso el aumento del perfil se da en ambos lados, y en el lado corriente abajo se ve mayor deposición. Si la punta está doblada en el sentido contrario, el efecto es similar al de un espigón recto, pero el efecto del lado corriente arriba es aún más drástico.

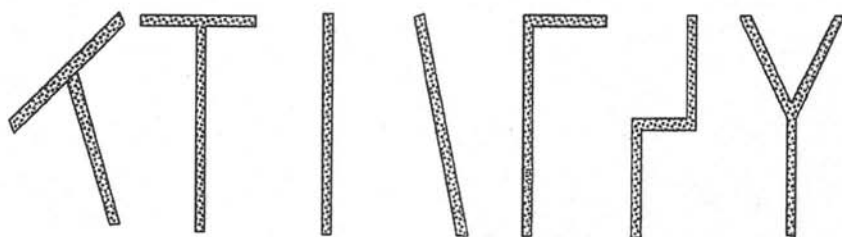


Figura 11 Espigones con distintas formas de CEM.

3. Análisis granulométrico

El análisis de los sedimentos es crucial para entender el fenómeno de la erosión, ya que sus características determinan las condiciones en las cuales habrá erosión o deposición. Para que el sedimento sea transportado por una corriente, la energía de la ola debe ser capaz de levantarlo del suelo, y la turbulencia debe permitir que el sedimento se mantenga en suspensión. En el estudio del sedimento sólo se considera el tamaño y la forma de la partícula. La carga de la partícula, que está relacionada con la electroestática y considera fuerzas magnéticas de atracción y repulsión entre partículas, no se toma en cuenta. Esto se debe a que las fuerzas causadas por la electroestática son, en este caso, tan pequeñas que no afectan el comportamiento del sedimento. El tamaño de las partículas que conforman el sedimento explica en gran medida su comportamiento. Mientras mayor sea el tamaño de la partícula, mayor debe ser la energía de la ola y la turbulencia de la corriente para lograr levantar y mantener la partícula suspendida. Esto es fácil de comprender si se imagina uno un vaso con agua, al que se le agrega una cucharada de tierra y se agita. Podemos observar que en el fondo del vaso se mantienen girando las partículas más grandes, mientras que las pequeñas están suspendidas aún después de detener la agitación. En resumen, es más fácil suspender partículas pequeñas que grandes, y también es más sencillo transportarlas de un lugar a otro, lo que se traduce en que la energía necesaria para mover o suspender una partícula de sedimento depende directamente del tamaño de la partícula.

El Caribe es un claro ejemplo de la importancia que tiene para el estudio considerar el tamaño de los sedimentos, ya que la energía de las olas en esta zona no es suficiente para erosionar una playa con arenas de silicatos como lo son la mayoría de las arenas en el mundo. Sin embargo, la península de Yucatán emergió del mar y está constituida por piedra caliza (CRUPY). En esta región los sedimentos en la playa están formados a base de conchas que fueron y son trituradas por la acción de las olas a lo largo del tiempo, lo que le da a la arena del Caribe su peculiar característica. Esta arena es blanca,

formada por partículas pequeñas de 0.105 mm de diámetro principalmente, y su estructura le da una adherencia mayor a la de las arenas de sílice.

El sedimento del Caribe está formado por carbonatos básicamente, por lo que es muy fino y adherente. Esto es importante ya que explica porque olas tan pequeñas como las del Caribe en general, y las de la isla de Holbox en particular, son capaces de erosionar la playa. Las cualidades de la arena del Caribe tienen ciertas ventajas, como es el hecho de que es posible dragar la arena con bastante eficiencia. Esto es útil para proyectos en los que se requiere transportar la arena de una zona a otra, conocidos como de impacto suave, ya que sus efectos son de bajo impacto en la dinámica de la zona. Para poder dragar la arena se necesita de potentes bombas. Sin embargo, en el caso de las arenas más finas, la bomba puede ser más pequeña ya que no se requiere tanta potencia. Al ser un sedimento más adherente, la cantidad que se logra dragar es mayor. Así pues, en el Caribe se debe considerar como una opción adicional la de dragar la arena.

4. Oleaje

Las olas que se consideran en este estudio son exclusivamente las formadas por la acción del viento. Estas olas se forman cuando la energía cinética del viento se transfiere al mar en la interfase que existe entre el aire y la superficie del agua. Las olas no pueden crecer infinitamente, ya que la energía que reciben del viento también la disipan de diferentes maneras. Al romper cambia la dirección del vector de velocidad de la ola, lo que produce una pérdida de energía por disipación. Este fenómeno también sucede cuando dos olas que van en diferentes direcciones chocan entre sí. También la fricción que se genera entre el fondo marino y el agua, transforma parte de la energía cinética en calorífica y turbulencia.

Cuando uno observa el mar desde una distancia razonable tiene la impresión de que todas las olas llevan la misma dirección. Esto se debe a que existe una dirección predominante. En esta dirección predominante se mueven las olas

más grandes, que son las que tienen mayor altura, longitud y velocidad. Estas olas pueden llegar incluso días antes que las pequeñas, y esto se debe a la combinación de varios factores. En el lugar donde se generan las olas, la energía se transfiere de las olas con períodos cortos a las olas con períodos más largos. Las olas largas pueden recorrer distancias de cientos de kilómetros, y a pesar de la disipación de energía que sucede por distintas razones, en realidad las olas no transfieren tanta energía a su entorno. Esto significa que si las olas se generaron a grandes distancias de la costa, sólo llegarán las más grandes. Esta es la razón por la cual en las costas, por lo general, las olas tienen períodos más largos (de 5 segundos en adelante) que en las zonas donde se generaron.

Las olas que nos interesan en este estudio son las de la zona costera, a profundidades no mayores de 20 m, ya que esta es la zona donde se genera la deposición o erosión de la playa. Por fortuna, no siempre es necesario conocer todas las particularidades de la ola. Para este estudio basta con conocer la altura, el período (tiempo que se tardan en pasar por un punto determinado la cresta y el valle de una ola) y la dirección de las olas. Los datos de altura y período de las olas fueron obtenidos de la base de NOAA (*National Oceanic Atmospheric Administration*) que es el organismo de Estados Unidos que se encarga del monitoreo del clima con el fin de prever desastres principalmente. NOAA utiliza una serie de satélites para determinar y predecir el clima en el mundo (Figura 12). El acceso a esta información se logró por una página de internet llamada Bouyweather. Esta página divulga esta información para los navegantes aficionados principalmente. En esta página se puede encontrar un registro histórico desde 1998 con la altura, la dirección y el período diario del oleaje en cualquier parte del mundo.

Conociendo el valor aproximado de estos tres factores, es posible calcular la altura y la longitud de la ola en la costa. Estos dos últimos factores son los que determinan el tipo de proyecto que se seleccione.

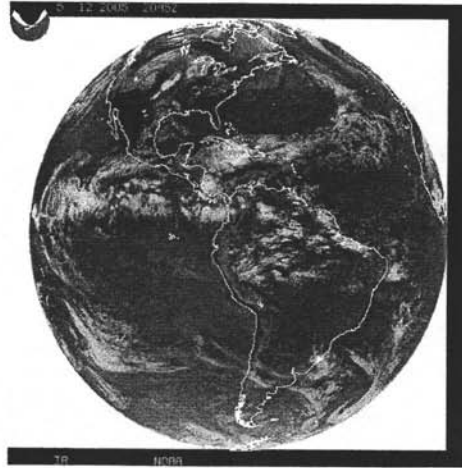


Figura 12 Foto de satélite Gosp

Para determinar el valor de estas variables en la costa se va a utilizar el modelo matemático conocido como ola lineal (Airy1845). A pesar de no ser un modelo muy confiable a profundidades bajas, se considera que el margen de error es aceptable para los propósitos del estudio.

Antecedentes

El doctor Jorge Euan, investigador del CINVESTAV Mérida ha supervisado un monitoreo realizado por habitantes de la zona y dirigido por Alberto Coral, pescador de Holbox. En este monitoreo se mide mensualmente la altura del perfil de playa en 16 puntos. Con estas mediciones se determina el comportamiento del perfil de la playa en esta zona. El estudio se inició en el año 2003 y no se ha detenido hasta la fecha. En la Figura 13 se observa un ejemplo de los resultados que obtienen el doctor Euan y su equipo. La Figura corresponde a uno de los puntos de monitoreo (el sitio 15 que se encuentra en un lugar conocido como El Estuache, al este del poblado). De la gráfica se deduce que la playa ha perdido 5 metros aproximadamente en el período de febrero de 2003 a mayo de 2005.

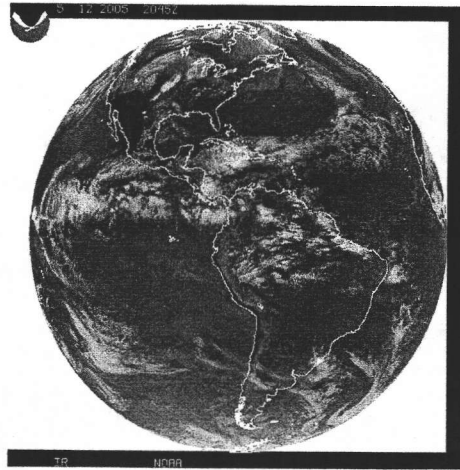


Figura 12 Foto de satélite Gosp

Para determinar el valor de estas variables en la costa se va a utilizar el modelo matemático conocido como ola lineal (Airy1845). A pesar de no ser un modelo muy confiable a profundidades bajas, se considera que el margen de error es aceptable para los propósitos del estudio.

Antecedentes

El doctor Jorge Euan, investigador del CINVESTAV Mérida ha supervisado un monitoreo realizado por habitantes de la zona y dirigido por Alberto Coral, pescador de Holbox. En este monitoreo se mide mensualmente la altura del perfil de playa en 16 puntos. Con estas mediciones se determina el comportamiento del perfil de la playa en esta zona. El estudio se inició en el año 2003 y no se ha detenido hasta la fecha. En la Figura 13 se observa un ejemplo de los resultados que obtienen el doctor Euan y su equipo. La Figura corresponde a uno de los puntos de monitoreo (el sitio 15 que se encuentra en un lugar conocido como El Estuache, al este del poblado). De la gráfica se deduce que la playa ha perdido 5 metros aproximadamente en el período de febrero de 2003 a mayo de 2005.

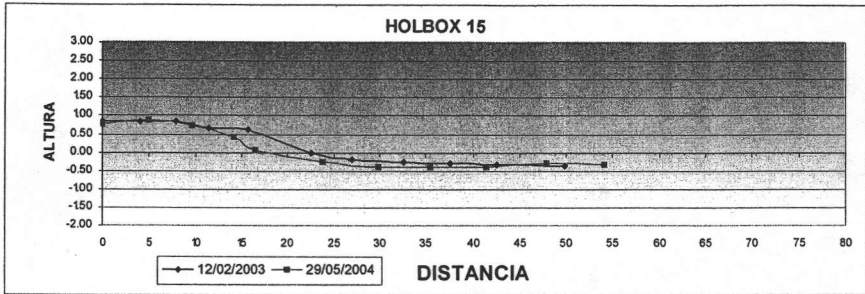


Figura 13 Ejemplo de las gráficas reportadas por el equipo del doctor Euan

Con los resultados completos se concluye que hay siete estaciones donde la playa está en condiciones estables, tres que presentan depósito de sedimento, y seis donde aparece una clara tendencia erosiva.

El comportamiento general de la costa en Holbox ha sido de una pérdida de la línea de playa. La arena ha sido transportada de la isla hacia adentro de la laguna e incluso ha formado un pequeño islote que se conoce como la Isla Pasión. Para la colocación de los espigones se realizaron distintos proyectos por parte de las constructoras, pero no se tiene reporte de los resultados que obtuvieron.

El trabajo que se presenta en esta tesis se realiza en colaboración con el Dr Jorge Euan. Una vez que se realicen las medidas pertinentes para controlar la erosión en Holbox se continuará con el monitoreo de la línea de costa con el fin de analizar y controlar los resultados de la propuesta.

Objetivos

- Determinar las causas principales que promueven la erosión en la isla de Holbox
- Estudiar el efecto que han tenido los espigones en la dinámica de la zona.
- Realizar mediciones del oleaje y el tipo de sedimento en la costa de la isla.

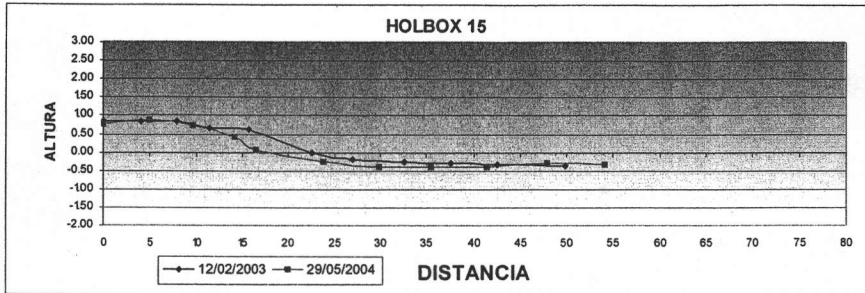


Figura 13 Ejemplo de las gráficas reportadas por el equipo del doctor Euan

Con los resultados completos se concluye que hay siete estaciones donde la playa está en condiciones estables, tres que presentan depósito de sedimento, y seis donde aparece una clara tendencia erosiva.

El comportamiento general de la costa en Holbox ha sido de una pérdida de la línea de playa. La arena ha sido transportada de la isla hacia adentro de la laguna e incluso ha formado un pequeño islote que se conoce como la Isla Pasión. Para la colocación de los espigones se realizaron distintos proyectos por parte de las constructoras, pero no se tiene reporte de los resultados que obtuvieron.

El trabajo que se presenta en esta tesis se realiza en colaboración con el Dr Jorge Euan. Una vez que se realicen las medidas pertinentes para controlar la erosión en Holbox se continuará con el monitoreo de la línea de costa con el fin de analizar y controlar los resultados de la propuesta.

Objetivos

- Determinar las causas principales que promueven la erosión en la isla de Holbox
- Estudiar el efecto que han tenido los espigones en la dinámica de la zona.
- Realizar mediciones del oleaje y el tipo de sedimento en la costa de la isla.

- Buscar nuevas propuestas para solucionar el problema de la erosión en la isla.

Hipótesis

El proceso natural de erosión de las "Islas de barrera" es acelerado por la presencia de la población que realiza actividades como la destrucción de la vegetación, la remoción de arena y el barrido del sargazo. Además de la presencia del hombre en esta zona, la construcción de espigones, que evita el transporte de sedimento a lo largo de la playa, acelera la erosión en la isla. Hoy día, los espigones son la causa principal de la erosión en la.

Otros sistemas, como rompeolas y arrecifes artificiales, pueden ofrecer un mejor control de la erosión. Además ofrecen otros beneficios que los espigones no pueden otorgar, como protección contra huracanes por parte de los rompeolas, o la creación de un medio ambiente más favorable para las especies acuáticas por parte de los arrecifes artificiales.

Procedimiento

Entrevistas

La base que se utilizó para diseñar las entrevistas fue el capítulo con este título que se encuentra en el libro *Periodismo* (Leñero y Marín, 1986). La entrevista se realizó en forma de diálogo, permitiéndole al entrevistado relatar sus anécdotas. Durante la plática los pobladores pudieron darse cuenta de las buenas intenciones del proyecto y de los investigadores que lo realizan, y esto les permitió platicar con confianza. El objetivo es obtener información desconocida, por lo que se les permitió gran libertad en sus relatos.

Con el fin de aplicar la entrevista a las personas indicadas se dedicó mucho tiempo en seleccionar a los entrevistados. El objetivo fue maximizar la cantidad

- Buscar nuevas propuestas para solucionar el problema de la erosión en la isla.

Hipótesis

El proceso natural de erosión de las "Islas de barrera" es acelerado por la presencia de la población que realiza actividades como la destrucción de la vegetación, la remoción de arena y el barrido del sargazo. Además de la presencia del hombre en esta zona, la construcción de espigones, que evita el transporte de sedimento a lo largo de la playa, acelera la erosión en la isla. Hoy día, los espigones son la causa principal de la erosión en la.

Otros sistemas, como rompeolas y arrecifes artificiales, pueden ofrecer un mejor control de la erosión. Además ofrecen otros beneficios que los espigones no pueden otorgar, como protección contra huracanes por parte de los rompeolas, o la creación de un medio ambiente más favorable para las especies acuáticas por parte de los arrecifes artificiales.

Procedimiento

Entrevistas

La base que se utilizó para diseñar las entrevistas fue el capítulo con este título que se encuentra en el libro *Periodismo* (Leñero y Marín, 1986). La entrevista se realizó en forma de diálogo, permitiéndole al entrevistado relatar sus anécdotas. Durante la plática los pobladores pudieron darse cuenta de las buenas intenciones del proyecto y de los investigadores que lo realizan, y esto les permitió platicar con confianza. El objetivo es obtener información desconocida, por lo que se les permitió gran libertad en sus relatos.

Con el fin de aplicar la entrevista a las personas indicadas se dedicó mucho tiempo en seleccionar a los entrevistados. El objetivo fue maximizar la cantidad

- Buscar nuevas propuestas para solucionar el problema de la erosión en la isla.

Hipótesis

El proceso natural de erosión de las "Islas de barrera" es acelerado por la presencia de la población que realiza actividades como la destrucción de la vegetación, la remoción de arena y el barrido del sargazo. Además de la presencia del hombre en esta zona, la construcción de espigones, que evita el transporte de sedimento a lo largo de la playa, acelera la erosión en la isla. Hoy día, los espigones son la causa principal de la erosión en la.

Otros sistemas, como rompeolas y arrecifes artificiales, pueden ofrecer un mejor control de la erosión. Además ofrecen otros beneficios que los espigones no pueden otorgar, como protección contra huracanes por parte de los rompeolas, o la creación de un medio ambiente más favorable para las especies acuáticas por parte de los arrecifes artificiales.

Procedimiento

Entrevistas

La base que se utilizó para diseñar las entrevistas fue el capítulo con este título que se encuentra en el libro *Periodismo* (Leñero y Marín, 1986). La entrevista se realizó en forma de diálogo, permitiéndole al entrevistado relatar sus anécdotas. Durante la plática los pobladores pudieron darse cuenta de las buenas intenciones del proyecto y de los investigadores que lo realizan, y esto les permitió platicar con confianza. El objetivo es obtener información desconocida, por lo que se les permitió gran libertad en sus relatos.

Con el fin de aplicar la entrevista a las personas indicadas se dedicó mucho tiempo en seleccionar a los entrevistados. El objetivo fue maximizar la cantidad

y calidad de información obtenida. Los aspectos más importantes a considerar para seleccionar a las personas que participan en las entrevistas son:

- Edad

Se consideró importante tener la opinión de distintas generaciones. Sin embargo, se le dio prioridad a las personas de edad avanzada, ya que son quienes conocen el cambio del comportamiento de la playa desde hace más tiempo.

- Ocupación

Seis de los siete entrevistados se dedican o se dedicaron alguna vez a la pesca, profesión en la cual es indispensable predecir el clima y que obliga al pescador a estar en la playa casi todos los días.

- Intereses

Se le otorgó mucha importancia a que los entrevistados no tuvieran algún interés en particular, como puede suceder con las personas que tienen terrenos frente al mar. Esto es importante, ya que aún sin hacerlo de manera conciente, es posible que los narradores alteren la realidad para beneficiar sólo una fracción de la playa.

Tomando esto en cuenta, y considerando las personas que una mejor disposición a ser entrevistados, los seleccionados fueron los siguientes:

- Francisco Betancourt Sabatini, 48 años, pescador proveniente de los primeros pobladores en Holbox.
- Manuel Betancourt Cetina, 78 años, pescador consciente y activo en todas las cuestiones sociales y políticas de la isla.
- Carmelo Sabatini Gomez, 73 años, pescador y secretario de la cooperativa "Ensueño del Caribe", la más grande de las cuatro que se han formado en la isla.

- Saturnino Coral Torres, 68 años, pescador reconocido por su gran conocimiento del mar.
- Andrés Jacobo Limón, 27 años, administrador del 2000 al 2003 del hotel "Villas Chimay" que se encuentra en la zona más afectada por la erosión.
- Alberto Coral Santana, pescador, 52 años, encargado de realizar las mediciones de batimetría en la playa y presidente de la cooperativa "punta mosquito".
- Antonio Noh Olivar, 40 años, pescador con amplios conocimientos del mar.
- Tomás Jiménez Sabatini, 87 años, pescador retirado y el entrevistado de mayor edad.

A pesar de permitir la plática libre es importante encaminar la discusión hacia los temas necesarios. Para lograr que la información obtenida estuviera relacionada con los temas de interés, se realizaron las siguientes preguntas.

1. ¿Cuál es su opinión acerca del funcionamiento de los espigones?
2. ¿Cuáles son las distintas direcciones que pueden tener las olas y los efectos de cada una de éstas?
3. ¿Cuál es la altura máxima que han alcanzado las olas?
4. ¿Cuál es su opinión del funcionamiento de los rompeolas?

Con esta información se pudieron sacar conclusiones interesantes sobre la historia de la línea de costa en Holbox.

Estudio de Fotos Aéreas

Las fotos fueron tomadas el 16 de diciembre del 2003 en una avioneta proporcionada por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). La avioneta no volaba a una altura constante, la luz en las fotos es distinta, hay zonas sombreadas por nubes, la resolución de las fotos es baja y el ángulo de la cámara no es fijo. Sin embargo, gracias a la medición de los espigones que se realizó en enero del 2005, es posible determinar la escala de las fotografías y tener una idea clara del estado de la playa y su evolución en el período de diciembre de 2003 a enero de 2005. En la visita del 28 de enero del 2005 se realizó un registro del estado de los espigones. Para este registro se hicieron mediciones minuciosas del largo y ancho de los espigones, así como la cantidad de arena depositada junto a éstos. De esta manera el estudio se divide en un análisis cualitativo y otro cuantitativo. En el estudio cualitativo se observa el efecto de los espigones, incluyendo aquellos que se colocaron hace tiempo y que hoy están sumergidos (recuadro número tres de la Figura 14). En el estudio cuantitativo se realiza un cálculo aproximado de la cantidad de arena depositada y erosionada en cada uno de los espigones, con base en las mediciones de las fotografías y considerando un factor de escala. El factor de escala se obtiene con los valores del tamaño real de los espigones, que se midieron en 2005. Lo que se obtiene de las fotografías aéreas del año 2003 se compara con las mediciones que se realizaron en el 2005. Con esto se observa la evolución de la línea de costa en un período de un año dos meses, y se analiza cualitativamente el efecto de los espigones en la erosión.

La costa de Holbox se muestra en la (Figura 14), donde se puede ver toda la zona de la playa en la que se han colocado espigones. Se han seleccionado siete zonas de la foto para su estudio como se indica en la fotografía. El orden que se seleccionó es la dirección del transporte, por lo tanto se estudiará la foto de derecha a izquierda. En estas distintas fracciones de la fotografía se podrán observar los aspectos más importantes del comportamiento de la playa.

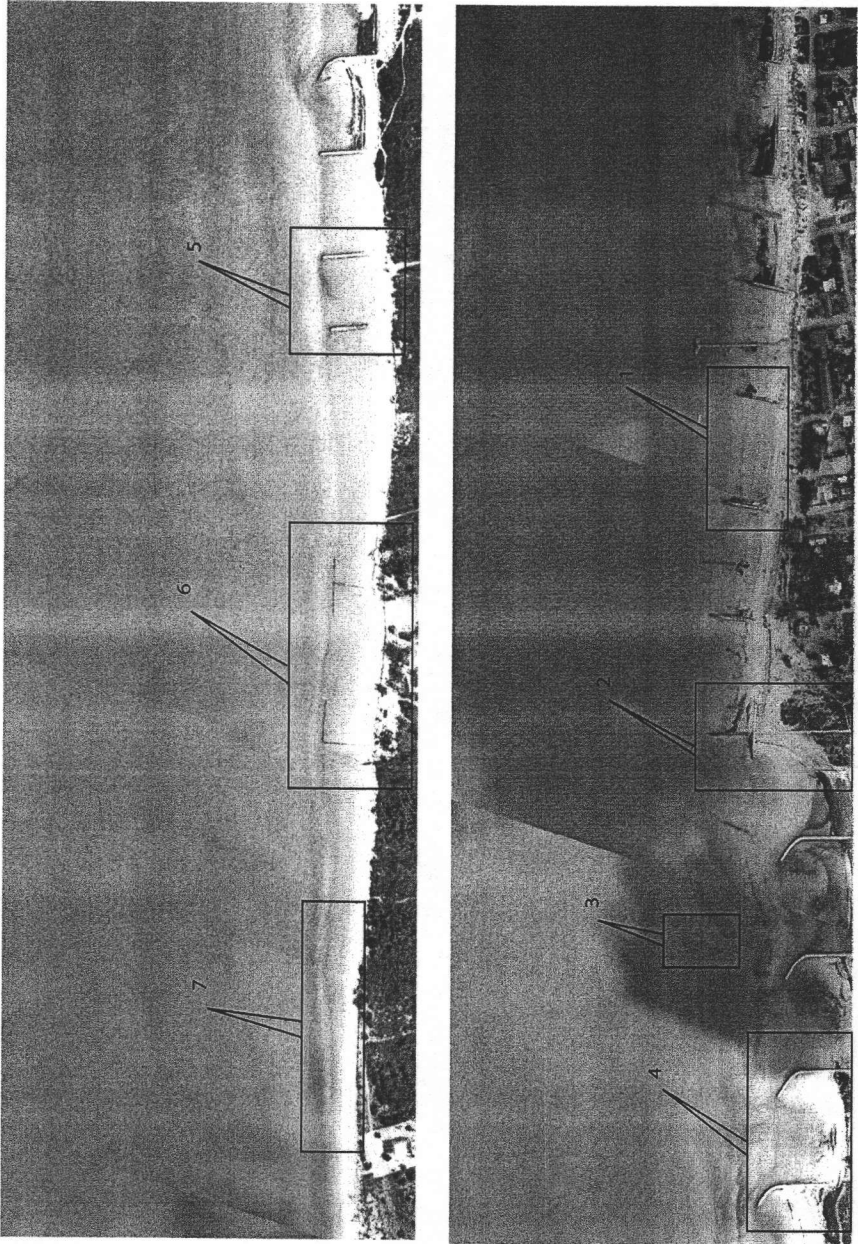


Figura 14 Foto aérea de la playa de Holbox, dividida en dos secciones. La foto de la derecha es continuación de la foto de la izquierda.

Análisis Granulométrico

Para este análisis se tomaron muestras en seis puntos. La distribución se realizó de la manera siguiente. Se escogieron dos zonas en la playa, Faro Viejo y Punta Chimay. Se seleccionaron estos dos sitios porque en Faro Viejo se ha logrado frenar la erosión con éxito, mientras que Chimay es la zona que mayor erosión sufre. En estas dos zonas se tomaron muestras a tres distancias de la costa, en la pleamar, a cinco metros de la pleamar en dirección al mar y a diez metros en la misma dirección. Posteriormente se procesaron los datos para obtener una distribución representativa tamaño de partícula de la zona. Al conocer la granulometría que predomina en la zona, es posible determinar el tipo de ola que se debe formar para lograr erosionar la playa.

En la ingeniería de costas existen varios métodos para clasificar el tipo de sedimento. Los dos más utilizados se idearon por otras ramas de la ciencia. El primero es la Clasificación Modificada *Wenworth* (*Modified Wenworth Classification*) (Blatt, Middleton, and Murria 1980) (Tabla 4), utilizada por los geólogos. En este método el intervalo que abarca cada una de las definiciones es pequeño, por lo que se obtiene una clasificación detallada.

Tabla 4 Clasificación Modificada *Wenworth*

Tamaño (mm)	Clasificación <i>Wenworth</i>
4.00 - 2.00	gránulo
2.00 - 1.00	Arena muy gruesa
1.00 - 0.50	Arena gruesa
0.5 - 0.25	Arena media
0.25 - 0.125	Arena fina
0.125 - 0.062	Arena muy fina
0.062 - 0.031	lodo grueso

El segundo sistema que se utiliza para la clasificación (Tabla 5), es la Clasificación de Sólidos Unificada ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Fue desarrollada por ingenieros con el fin de estandarizar un método para obtener resultados reproducibles, es decir, obtener resultados similares y comparables en pruebas distintas. La clasificación se encuentra en la publicación del ASTM (ASTM 1994).

Tabla 5 Clasificación ASTM

Tamaño (mm)	ASTM
4.76 – 2.00	Arena gruesa
2.00 – 0.425	Arena media
0.425 – 0.075	Arena fina
0.075 – 0.00	Suelo fino

El único tratamiento que se aplicó en las muestras fue el secado al sol. Para determinar la calidad de la arena se utilizaron seis tamices. Las mallas, ordenadas de mayor diámetro a menor, tienen las siguientes dimensiones.

Maya #	Maya (mm)
16	1.18
35	0.5
70	0.21
190	0.105
200	0.074
300	0.00432

Análisis de Oleaje

Los datos del oleaje en Holbox con los que se cuenta están reportados a grandes profundidades (más de 20 metros). Sin embargo, para entender lo que sucede en la costa es necesario calcular las características de las olas al llegar a ésta. Para tener un valor aproximado del tamaño que tienen las olas en la isla de Holbox, y de esta manera poder determinar qué proyectos

se pueden llevar a cabo, se utilizó el modelo de ola lineal. Este modelo fue desarrollado por Airy (1845). A pesar de tener una alta precisión a grandes profundidades, presenta errores cuando la profundidad disminuye. Sin embargo, se considera que este modelo es suficiente para dar un aproximado de la altura que tienen las olas en la costa de Holbox.

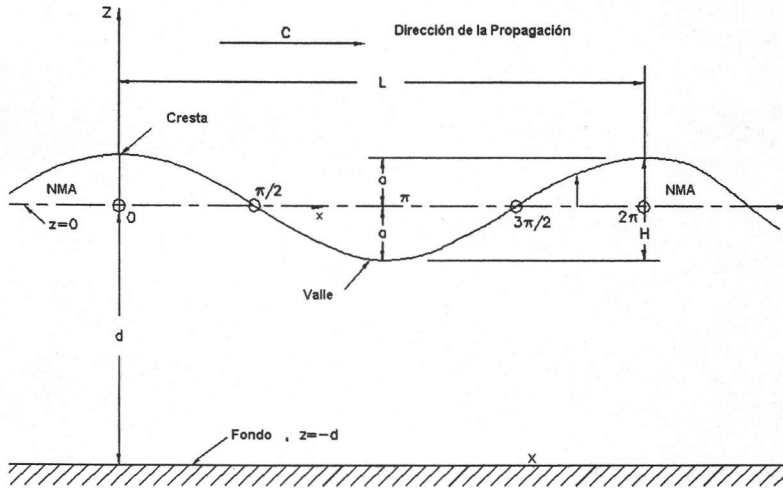


Figura 15 Modelo de ola lineal, NMA (Nivel Medio del Mar), L (longitud), a (altura de la ola sobre o debajo del NMA), H (altura de la cresta $H=2*a$).

En la Figura 15 es posible observar el sentido de las distintas variables. El **NMA** es el nivel medio del agua. La cresta es el punto más alto que alcanza la ola, mientras que el punto más bajo es el valle. En este modelo, **a** es la distancia que existe entre la cresta o el valle y el Nivel Medio del Agua (NMA), **H** es la distancia entre la cresta y el valle, por lo tanto $a = H/2$. La longitud de la ola se determina como la distancia que existe entre dos crestas o dos valles. Este método también se utiliza para determinar el período, que es el tiempo necesario para que dos crestas o dos valles crucen por un punto determinado.

Otros parámetros que se utilizan son la frecuencia angular o en radianes: $\omega = 2\pi/T$; la velocidad de fase: $C = L/T = \omega/k$; la pendiente de la ola:

$\varepsilon = H/L$; la profundidad relativa: d/L ; y por último, la altura relativa de la ola: H/d .

Los datos de la ola que se necesitan son la altura, la longitud, la dirección y el período. La altura y el período se obtienen a través de información satelital (*Buoyweather*) y deben procesarse para utilizarlos en este estudio. Estos valores representan las características de la ola en zona profundas. Sin embargo, al acercarse a la costa, la ola cambia, tanto su dirección como su altura. El período se mantiene constante independientemente de la profundidad a la que se encuentre (Ippen, 1966). Por otra parte, una profundidad relativa d/L (donde d es la profundidad y L es la longitud) mayor a 0.5 significa que la longitud de la ola es menor que el doble de la profundidad. En estas condiciones, la longitud de la ola se comporta de forma independiente a la profundidad. En la costa, la profundidad relativa es menor a 0.5, por lo que la longitud de la ola en la costa depende de la profundidad.

Los datos de la ola que se encuentran del registro de satélites son a profundidades grandes. Estos valores pueden transformarse por medio de modelos para tener valores de altura y dirección de la ola en la playa, que es donde ocurre la erosión que queremos analizar.

La transformación de la altura y dirección de la ola se realizó con el método indicado por (Dean and Dalrymple, 1991). Para este método basta conocer la altura de la ola H_0 , el período T , el ángulo de incidencia Θ y la profundidad a la cual se quiere conocer la altura de la ola. Con estas variables es posible obtener resultados como los presentados en la Tabla 8. Con este método el resultado es aproximado, ya que se están despreciando muchas variables que suelen afectar la forma, la dirección y el tamaño de la ola. Sin embargo, la información obtenida es suficiente para determinar si se puede o no resolver el problema, y que proyecto es el más apropiado.

Para determinar el ángulo de incidencia de la ola, primero se determina el ángulo de la playa con respecto a los puntos cardinales (Figura 16)

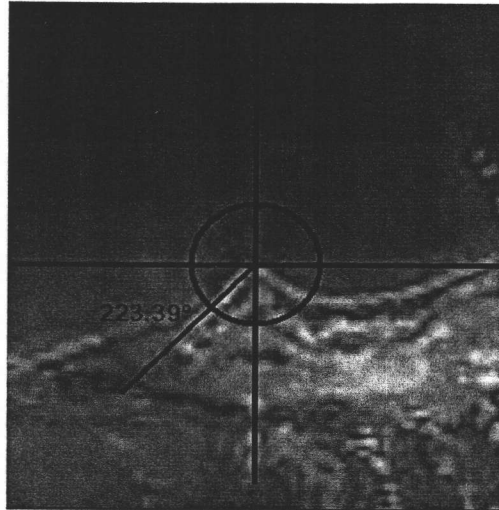


Figura 16 Ángulo del perfil de playa de Holbox con respecto a los puntos cardinales

De esta manera $223.39^\circ - 90^\circ$, es el ángulo en el que la ola no sufre ninguna refracción. Este es el valor para $\Theta_0 = 0$, y de ahí se parte para determinar el ángulo de la ola con respecto a la playa.

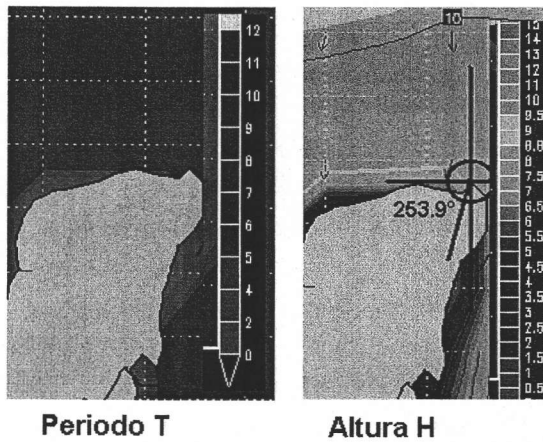


Figura 17 Ejemplo de la información satelital (*Buoyweather*)

Los datos satelitales se obtienen como se muestra en la Figura 17. De estos gráficos se obtienen la altura, la dirección y el período a profundidades grandes

por lo que el modelo de ola lineal es muy preciso. A continuación se muestra un ejemplo de cómo se obtuvieron los valores de la ola a profundidades menores.

Los valores medidos de los gráficos son los siguientes:

$$T = 15 \text{ s}; H_0 = 1 \text{ m}; d = \text{profundo}; g = 9.8; \Theta_0 = 45^\circ$$

Con estos valores y el modelo de ola lineal se calculan la longitud inicial (L_0), la longitud en la costa (L), las distintas velocidades de la onda (C_0 , C_1 y C_g , que corresponden a la velocidad de la ola en la zona profunda, la velocidad en la costa y la alterada debida a la gravedad) Con los valores de la velocidad se calcula la variable de la pendiente (K_s) y con el ángulo se calcula la variable de la refracción (K_r). Estos últimos factores de conversión nos permiten calcular la altura de la hola (H_1) a bajas profundidades como se indica a continuación.

$$L_0 = 1.56 * (T^2) = 351 \text{ m}$$

$$L = \frac{g * T^2}{2 * \pi} \tanh \left(\frac{2 * \pi * d}{L_s} \right)$$

$$L = 144.05 \text{ m}$$

$$C_0 = 1.56 * T = 23.4 \text{ m/s}$$

$$C_1 = \frac{L}{T} = 9.6 \text{ m/s}$$

$$C_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi d / L}{\operatorname{snh} \left(\frac{4\pi d}{L} \right)} \right) \frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) = 9.04 \text{ m/s}$$

$$K_s = \sqrt{\left(\frac{C_0}{C_g} \right)} = 1.14$$

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{C_1 \operatorname{sen} \theta_0}{C_0} = 0.29$$

$$K_r = \left(\frac{1 - \operatorname{sen}^2 \theta_0}{1 - \operatorname{sen}^2 \theta} \right)^{1/4} = 0.86$$

$$H_1 = H_0 K_r K_s = 0.98 \text{ m}$$

Conociendo la altura y el período de la ola, es posible obtener todas las demás variables que se necesitan. Por medio de cálculos sencillos se pueden conocer las propiedades que tienen las olas en la costa de Holbox.

Análisis de resultados

Entrevistas

Las entrevistas se ordenaron de acuerdo a su realización, con el fin de presentar la evolución de la información obtenida que refleja el pasado de la isla. Para futuros proyectos sería útil repetir las entrevistas ahora que ya se ha procesado la información. Existen nuevas preguntas que resultaron del estudio, además de que se podrían confirmar las versiones que los distintos entrevistados tienen. La información que se recolectó resultó de gran ayuda para el diagnóstico de la zona.

Francisco Betancourt Sabatini

“El Chino” es pescador de profesión, conoce bien la isla y ha escuchado desde pequeño las historias de sus antepasados. Es una persona consiente de los problemas ecológicos de la isla y se preocupa por el futuro de ésta. Piensa que la gente no considera los efectos de sus acciones. Como ejemplo cuenta un suceso que sucedió hace poco tiempo. El Chino platica como hace poco abrieron nuevos caminos, esto con el objeto de permitir el paso a terrenos que no tenían acceso. Una vez que la excavadora se encontraba en la isla, decidieron abrir unos caminos, que no estaban planeados, que llegaran hasta la playa por casco viejo. Para construir estos caminos, lo que hacen en la isla es arrancar toda la vegetación y luego aplanar la zona de tal manera que se forma un camino de arena firme. Al subir la marea cuando hay mal tiempo, el mar entra por estos caminos, que se encuentran a una altura menor que la vegetación de su alrededor. Cuando la marea baja, estos caminos se vuelven ríos por los cuales sale el agua que se encontraba inundando la isla, junto con

Conociendo la altura y el período de la ola, es posible obtener todas las demás variables que se necesitan. Por medio de cálculos sencillos se pueden conocer las propiedades que tienen las olas en la costa de Holbox.

Análisis de resultados

Entrevistas

Las entrevistas se ordenaron de acuerdo a su realización, con el fin de presentar la evolución de la información obtenida que refleja el pasado de la isla. Para futuros proyectos sería útil repetir las entrevistas ahora que ya se ha procesado la información. Existen nuevas preguntas que resultaron del estudio, además de que se podrían confirmar las versiones que los distintos entrevistados tienen. La información que se recolectó resultó de gran ayuda para el diagnóstico de la zona.

Francisco Betancourt Sabatini

“El Chino” es pescador de profesión, conoce bien la isla y ha escuchado desde pequeño las historias de sus antepasados. Es una persona consiente de los problemas ecológicos de la isla y se preocupa por el futuro de ésta. Piensa que la gente no considera los efectos de sus acciones. Como ejemplo cuenta un suceso que sucedió hace poco tiempo. El Chino platica como hace poco abrieron nuevos caminos, esto con el objeto de permitir el paso a terrenos que no tenían acceso. Una vez que la excavadora se encontraba en la isla, decidieron abrir unos caminos, que no estaban planeados, que llegaran hasta la playa por casco viejo. Para construir estos caminos, lo que hacen en la isla es arrancar toda la vegetación y luego aplanar la zona de tal manera que se forma un camino de arena firme. Al subir la marea cuando hay mal tiempo, el mar entra por estos caminos, que se encuentran a una altura menor que la vegetación de su alrededor. Cuando la marea baja, estos caminos se vuelven ríos por los cuales sale el agua que se encontraba inundando la isla, junto con

la arena que ya no cuenta con la protección de la vegetación. Con esto los caminos se vuelven intransitables a causa de la erosión. El resultado son caminos inservibles y canales ideales para que la isla se inunde con mayor facilidad. Aunque se debe enfatizar que esta no era la intención de quienes construyeron las vías de acceso, es importante entender que al encontrarse en sistemas con equilibrios tan frágiles, es indispensable considerar todos los posibles efectos de los cambios que se van a realizar.

Manuel Betancourt Cetina

Don Manuel es un pescador que ahora tiene una tienda de abarrotes. El día durante la entrevista mencionó una frase muy interesante "No se preocupe usted, Holbox tiene para todos." Esta frase logra plasmar la antigua concepción de la naturaleza. La gente en esta isla ha vivido durante toda su historia en abundancia de recursos naturales. Es comprensible que les resulte difícil creer en conceptos como la extinción y la necesidad de cuidar el medio ambiente. Este es uno de los principales problemas que tienen los proyectos en estas zonas. La gente de la isla, que es por lo general parte fundamental para cualquier proyecto que se lleve a cabo en su propio hábitat, no coopera por dos razones principales. La primera, que relacionan a los investigadores con el gobierno al cual no le tienen confianza y la segunda es que no están convencidos de las soluciones a los problemas que los investigadores plantean. Sin embargo, la disminución del perfil de playa les preocupa, ya que además de rápido es un fenómeno que afecta directamente a la población. Resolverlo podría, además de lograr todos los objetivos antes mencionados, disminuir esa brecha que existe entre los pobladores y los investigadores.

Regresando al tema de la erosión, Don Manuel fue el primero en revelar un posible factor para el aceleramiento de la erosión. Según él cuenta, cuando se empezaron a construir casas con cemento en la isla, un problema era la obtención de grava. Para resolver este problema, los pobladores recogían las pequeñas conchas (conchuela) que abundaban en la orilla de la playa. Menciona que se pagaba un peso por lata de conchuela, y que la gente llegó al grado de escarbar para conseguirla. Como se explica con mayor detalle en la

sección de granulometría, esta capa de conchuela, además de tardar un largo tiempo en formarse, presenta una mayor resistencia a la erosión.

Carmelo Sabatini Gomez

Don Carmelo platicó con gran detalle acerca de los espigones. Explicó cada uno de los proyectos de colocación de espigones, así como las razones por las que él creía que habían fracasado. A su parecer se debió haber detenido el proyecto de los espigones después de que se comprobó que no funcionaban. Mencionó que con base en lo que él había observado, estaba convencido de que si se colocaban los espigones con una inclinación de 45° en contra de la corriente, el resultado iba a ser positivo. También recordó que en alguna ocasión se colocaron rompeolas con sacos de arena. Por desgracia estos no resistieron mucho tiempo antes de deshacerse.

Saturnino Coral Torres

Don Saturnino fue pescador toda su vida y su casa se encuentra cerca del mar, por lo que conoce bien su comportamiento. Al preguntarle acerca de los rompeolas mencionó que cree que podrían funcionar y relató un acontecimiento que le hacía creer de esa manera. Hace varios años, un barco encalló en la playa. A pesar de haber encallado de frente, al día siguiente a este suceso el mar ya lo había colocado de forma horizontal a la playa. Pasó un mes aproximadamente antes de que fuera remolcado. En este tiempo se formó una acumulación de arena en la parte de la playa que se encontraba frente al barco. Considerando que el barco tuvo un efecto similar al que tendría un rompeolas, éste es un buen ejemplo de que los rompeolas podrían disminuir la erosión en la isla.

Andrés Jacobo Limón

Andrés es una persona joven. Nació en Morelos, y se mudó a Holbox hace cuatro años. A pesar de que parece ser un candidato poco indicado para la entrevista, Andrés trabajó durante tres años como administrador del Hotel "Villas Chimay" por lo que conoce bien el comportamiento de esta parte de la playa que es una de las más afectadas por la erosión. En esta zona la erosión es de 8 metros por año según el aproximado de Andrés. Además fue él quien tuvo la iniciativa de colocar unas pequeñas estructuras construidas a base de palos en Punta Chimay. Utilizando una bomba de agua para con ella escarbar los huecos y así colocar los palos que formarían los espigones y los rompeolas, construyó un espigón en forma de T y otro en forma de L, como se observa en la Figura 18.

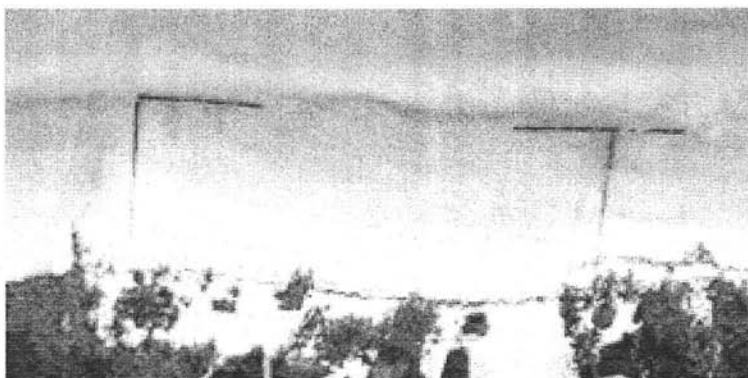


Figura 18 Fotografía aérea de Punta Chimay

Andrés menciona que después de haber colocado estas pequeñas estructuras, la deposición era positiva y que los palos habían quedado prácticamente sepultados. Más tarde la erosión comenzó de nuevo y ahora amenaza con llegar hasta la puerta del hotel. Existen varios factores que pueden ser responsables de este comportamiento. Entre ellos que la erosión en las zonas aledañas influye de manera negativa. Sin embargo y a pesar de esto, el análisis aéreo que se realiza más adelante muestra que el efecto del proyecto realizado por Andrés fue positivo.

El proyecto de Andrés muestra dos puntos muy importantes. El primero es que realizar un proyecto piloto en la isla resultaría económico. ya que estas estructuras pueden representar los efectos de rompeolas. El otro es que el efecto positivo que tienen las estructuras colocadas por Andrés puede deberse a dos razones. Una es que el comportamiento es similar al de rompeolas con tomboles. La otra, es que la sección transversal funciona como otro tipo de estructura utilizada en la ingeniería de costas, los espigones permeables (Kraus, Hanson, Blomgren 1994). El agua es capaz de filtrarse entre el espacio que existe entre palo y palo. De esta manera el transporte de sedimento no se detiene totalmente, sin embargo al disminuirse, por medio de la fricción, la fuerza de la corriente, aumenta la deposición de arena.

Alberto Coral Santana

Alberto es el encargado de realizar las mediciones del cambio en el perfil de playa de la isla de Holbox. También realizó durante largo tiempo las mediciones de calidad de agua en la zona. Es sin duda uno de los habitantes que más se preocupa por el futuro de la isla. Alberto está convencido de que los espigones no funcionan y deberían ser cambiados.

Antonio Noh Olivar

Antonio "Chus" fue seleccionado por ser un pescador joven. Ha vivido el cambio de Holbox, de un pueblo sencillo sin visitantes, a una isla turística. Pertenece a una generación más globalizada, donde las tradiciones y la modernidad chocan y luchan entre sí. Platica del problema conociendo varios puntos de vista y muestra especial preocupación por el cambio en la pendiente de la playa, que aunque ya había sido mencionado en otras ocasiones, no había sido considerado por los demás entrevistados. Según él recuerda, la pendiente solía ser mucho más pronunciada. También opina que es el cambio en la dirección de la corriente el que causa la erosión. Menciona que la corriente cambia con la marea. En la punta de la laguna se da un fenómeno

que los pescadores llaman "vaciante". Al bajar la marea se forma un cuello de botella en la boca de la laguna. Al disminuir el diámetro del canal, aumenta la velocidad de la corriente. Durante el vaciante, la corriente tiene dirección contraria a la que normalmente tiene. Sin embargo, esto sólo sucede en la punta de la isla que se encuentra en la boca de la laguna. Este cambio no explica la erosión en todo el perfil de la playa, aunque podría ser la causa por la cual la isla está perdiendo mayor arena cerca de Casco Viejo, que se encuentra en la boca de la laguna.

Acerca de los rompeolas, su opinión es que podrían funcionar. Por desgracia en esta entrevista el entrevistador cometió el error de mencionar, antes de realizar la pregunta, que son las olas las principales causantes de la erosión. Esto pudo influir en la opinión de Chus, quien mencionó que los rompeolas podrían funcionar al evitar que las olas erosionaran la isla después de haber mencionado que la principal causa de la erosión era el cambio de corriente.

Tomás Jiménez Sabatini

Tomás o "Don Huach", como se le conoce en la isla, es la persona con mayor edad en la Holbox. A sus ochenta y siete años, ha escrito un libro acerca de las especies de la zona. "Yo solo lo conté, el señor Salazar se encargó de escribirlo" comenta con modestia. Debido a su edad, confiesa no visitar la playa con tanta frecuencia. Sin embargo, la mayor aportación de su parte fue acerca del clima. Según él explica, el clima ha cambiado mucho en los últimos años. Explica como fechas fijas en las que se solía presentar el primer huracán, temporadas únicas identificadas por sus marcadas diferencias con las demás del año, ya no son tan fáciles de predecir. Menciona como la temporada de huracanes es cada vez más larga y temprana en el año y que el acostumbrado *Mahaché* (mal clima con vientos muy fuertes que llega sin previo aviso y dura una hora aproximadamente) del 30 de abril ya no es tan frecuente. Es de conocimiento general que el calentamiento de la Tierra está causando cambios en el clima. Estos cambios pueden afectar la dinámica de la playa, ya que al aumentar el número de huracanes, por dar un ejemplo, la playa sufre mayor

erosión y cuenta con menor tiempo para recuperarse. Es importante considerar el cambio climático para la realización de proyectos futuros.

Los aspectos más importantes en los cuales todos los entrevistados coincidieron son:

- La erosión aumentó de manera significativa a causa de la muerte de los cocoteros.

Como ya se ha mencionado, las palmeras ayudan a detener la erosión ya que soportan una alta salinidad y sus raíces fijan la arena. Su muerte dejó grandes secciones de arena sin protección contra los embates del oleaje.

- Los espigones promueven la erosión en lugar de detenerla
Todos los entrevistados estuvieron de acuerdo en que los espigones han detenido la erosión en la zona alejada de la laguna. Sin embargo, el problema se ha acelerado de manera preocupante en la parte que se encuentra cerca de la boca de la laguna. Esto significa que, en dirección de la corriente, los primeros espigones han promovido la deposición y los últimos han acelerado la erosión. La teoría explica esto con el hecho de que los primeros espigones son los causantes de que la erosión se acelere en la parte final

- Las condiciones de mayor erosión se dan cuando las olas provienen del Noroeste.

Todos los entrevistados mencionaron que cuando el oleaje viene del Noroeste es cuando la erosión es mayor. Esto es importante ya que los espigones están colocados de tal forma que ofrecen la menor protección cuando las olas tienen precisamente esta dirección. Este es un indicio muy importante de que la erosión es causada por el oleaje, ya que, durante los nortes, la corriente no cambia su dirección de manera importante. Si la erosión aumenta cuando el oleaje es mayor, sin que se presenten cambios en la corriente, es lógico

suponer que las olas son las principales causantes de la erosión. Por lo tanto, los espigones no ayudan a frenarla sino a acelerarla.

- La altura máxima que ha alcanzado el oleaje en la isla es de 2 metros.

La altura máxima es utilizada para determinar las dimensiones de las estructuras. Aunque es claro que no se puede utilizar este dato como definitivo para el diseño, es un acercamiento importante que ofrece una idea aproximada del tamaño de las estructuras. Un acercamiento más preciso de la altura de las olas se obtuvo con el análisis del oleaje.

- Los rompeolas podrían frenar la erosión.

Es difícil asegurar que la repuesta de los entrevistados no se vio afectada debido a la explicación por parte del entrevistador, o simplemente por ser una propuesta hecha por investigadores. No obstante, el argumento de Don Saturnino es muy convincente. El hecho de que el barco haya permitido un pequeño aumento en el perfil de la playa es un buen indicio. La colocación de rompeolas ha producido resultados positivos en casi todos los casos. Contar con el apoyo de la población para realizar este proyecto, es muy importante.

- En ninguno de los proyectos realizados anteriormente se ha tomado en cuenta la opinión del pueblo.

Los pobladores, además de ser parte indispensable para el éxito de cualquier acción que se lleve a cabo en la isla, guardan una cantidad enorme de información que puede ser muy útil para los proyectos que aquí se llevan a cabo. Por otra parte, permitirles formar parte de estos proyectos, ayuda a incrementar su conocimiento y promueve su apoyo. Es indispensable que los habitantes de Holbox tengan la oportunidad de participar en acciones que los afectan directamente.

- La remoción de conchuela es otro factor que aceleró la erosión en la isla.

Antes de que estuviera prohibido, los habitantes construían sus casas con arena y conchas del mar. En lugar de grava para la mezcla, usaban la denominada conchuela (pequeñas conchas de 3 mm de diámetro aproximadamente). La conchuela es sedimento con un tamaño de partícula mucho más grande que el de la arena por lo que se requiere de olas más grandes para ser removido. Al formar una capa delgada en la superficie de la playa, ofrece una mayor protección de la acción de las olas.

De las entrevistas también se obtuvo un pasaje histórico de la isla. Cuentan que la isla fue habitada a mediados del siglo XIX. Los apellidos de las habitantes de la isla proponen que los primeros habitantes provenían de Europa. El poblado original fue devastado por un huracán que no dejó más que un horno para pan. Después de esta catástrofe, los habitantes se mudaron a una zona más adentrada en la selva para protegerse de los vientos del Noroeste, que son los vientos más peligrosos en la región. Aquí es donde se encuentra Holbox actualmente, que también sufrió los embates del mal tiempo incluyendo un terrible huracán en el año de 1963 que inundó toda la isla.

Cuentan que hace cien años era necesario atravesar un tramo de 50 metros de selva y recorrer una playa de otros 50 m aproximadamente para llegar al mar. En los inicios del siglo XX se empezaron a crear ranchos de cocoteros. Para esto se deforestó la zona cercana a la playa y se plantaron palmeras de coco. En esta época se presenta la primera prueba de la presencia de la erosión en la isla. Dicen los entrevistados que los ranchos perdían terreno y sus palmeras se derrumbaban por la erosión en la playa. Otros indicios de la erosión es la desaparición de las saleras (lugar donde se cortaban y salaban los tiburones) por el avance del mar sobre la costa. En la década de los cuarenta el amarillamiento letal acabó con todos los ranchos de cocos de la isla. Los terrenos sin vegetación cerca del mar permitieron que la costa se erosionara con mayor facilidad. Hasta 1970 el perfil de playa se fue erosionando a una velocidad moderada, pero constante.

En la década de los 70 fue cuando se inició la construcción de los espigones. Primero se colocaron unos formados por costales de arena, que no sobrevivieron durante mucho tiempo ya que las bolsas se rompieron y dejaron salir la arena que contenían. Más tarde se colocó la primera serie de seis espigones formados con concreto. De ahí en adelante continuó la construcción de espigones para reponer los que se hundían y colocar nuevos en las zonas en las que los espigones habían acelerado la erosión.

Todos opinan que la colocación de los espigones se debió detener después del fracaso de la primera serie. Sin embargo, por alguna razón el gobierno continuó con su colocación.

Actualmente existe todo un proyecto encargado de eliminar todos los espigones colocados a lo largo de toda la costa de la península, y todo parece indicar que en la isla de Holbox se debe hacer lo mismo.

Estudio de Fotografías Aéreas

Análisis cualitativo

Con las fotografías tomadas en 2003 es posible realizar un análisis de las condiciones del perfil de la playa de Holbox. Las zonas más afectadas por la erosión y el efecto de los espigones, son algunos de los puntos más importantes que se pueden discutir en este análisis. Las secciones que se analizaron se encuentran numeradas en la Figura 19.

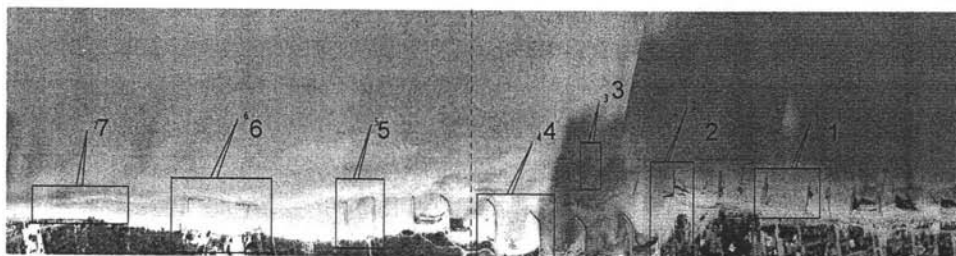


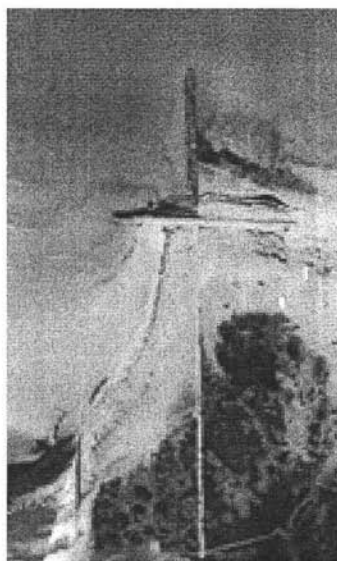
Figura 19 Zona de la playa de Holbox donde se han construido los espigones

Fotografía 1



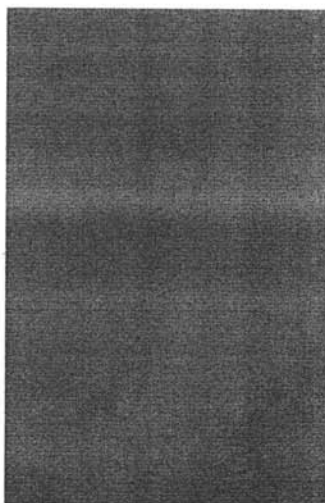
Aquí se pueden observar dos espigones. La dirección de la corriente predominante es bastante clara, ya que, como podemos ver, un lado sufre de mayor erosión que el otro. De esta manera se puede deducir que la corriente predominante tiene una dirección de derecha a izquierda. Las olas tienen una dirección paralela a los espigones, por lo que los espigones no ofrecen ninguna protección. La altura de las olas no se ve afectada por estos espigones.

Fotografía 2



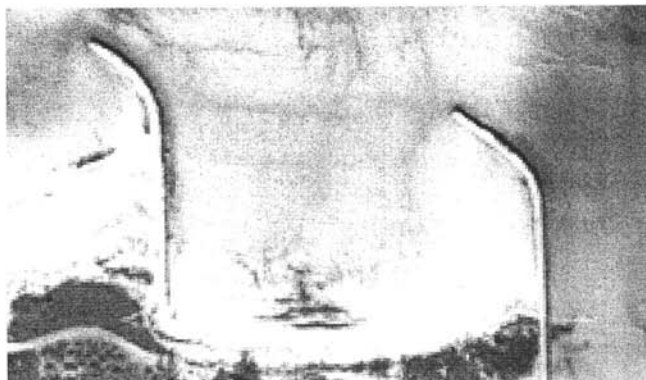
En esta fotografía se puede ver claramente el funcionamiento de lo espigones y por lo tanto su falla. Mientras más efectivo es un espigón, más afecta la parte subsecuente de la playa. Aquí se observa como este espigón, que es el más grande y el único con un rompeolas cruzado, acelera la erosión del otro lado de la playa. Esto se debe a que el espigón atrapa la arena que trae la corriente, pero no detiene la arena que es erosionada por las olas, lo que provoca que los espigones eviten que la corriente rellene con la arena que transporta, los huecos formados por el oleaje alto.

Fotografía 3



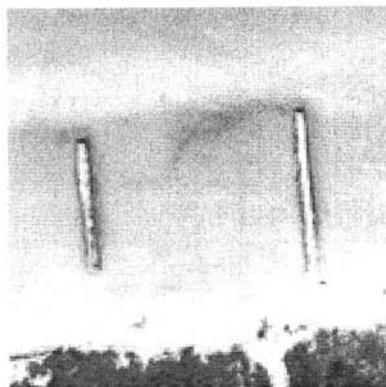
Aquí se puede observar un espigón que fue colocado en la década de los setentas. Este espigón se encuentra hundido a 20 metros de la playa. La erosión no es frenada por esta estructura. Por lo que ahora yace sumergido a 2 metros de profundidad. La situación más preocupante se encuentra en haber continuado con proyectos similares, después de tener pruebas tan contundentes de la poca eficiencia del proyecto. Esta es una de las pruebas más claras de que los espigones no son adecuados para las características de esta zona.

Fotografía 4



Estas estructuras que se encuentran en la zona más afectada de la isla, muestran la gama de soluciones que se pueden proponer. En el mundo se han utilizado espigones con diversas formas. Sin embargo, mientras más irregular es su forma, más impredecible es su comportamiento. Aquí puede distinguirse que la mayor deposición se encuentra en el lado contrario a la dirección de la corriente. Esto se debe a que la curva de estos espigones disminuye la fuerza de las olas deteniendo con esto la erosión. Por desgracia este tipo de estructura tampoco ha funcionado. Como podemos ver en la fotografía, el espigón que se encuentra de lado izquierdo está a punto de ser superado por la línea de costa y seguirá el destino de los espigones que se encuentran ya hundidos. La forma del espigón provoca que el lado erosionado sea el contrario al de los espigones rectos. Sin embargo, la erosión persiste.

Fotografía 5



Estos son los dos últimos espigones y se encuentran en una zona de erosión alta donde han sido superados por el perfil de playa. Como podemos ver, el espigón de la derecha se encuentra en mejores condiciones que el de la izquierda. Todos los espigones anteriores han acumulado una fracción de arena que estaba destinada a llegar hasta esta zona, de tal suerte que este último sufre la mayor pérdida de arena. En el análisis de las fotografías se puede demostrar que el número de espigones con los que choca la corriente, antes de llegar al espigón en cuestión, es un factor que induce a una mayor erosión. Si observamos el comportamiento del perfil en la dirección de la corriente, podemos observar que en un espigón se presenta una erosión más aguda cuanto mayor es el número de espigones que se encuentran anteriores a él.

Fotografía 6



Esta construcción realizada con palos de madera por Andrés Limón, fue colocada en la zona más afectada por la erosión. Aquí en Punta Chimay, la erosión amenaza con hundir un hotel. La colocación de esta pequeña estructura ha presentado resultados satisfactorios ya que ha logrado una pequeña deposición de arena. La hipótesis que se plantea es que los palos situados en forma horizontal (paralelo a la línea de la costa) disminuyen la altura de las olas, y los que están situados en forma vertical (perpendicular a la línea de costa) permiten el paso de sedimentos por ser permeables. De esta manera, por un lado las estructuras disminuyen la erosión causada por las olas

y por el otro, permiten el paso de una corriente reducida promoviendo la deposición de sedimentos.

Fotografía 7



Este fragmento fue seleccionado porque muestra un fenómeno peculiar que se presenta en la isla. Como se puede observar en el lado derecho de la foto, se forma un pequeño bajo a unos diez metros de la playa. Este "canal" que se forma entre el bajo y la playa se conoce como "canalizo". El canalizo se encuentra a lo largo de toda la playa, como se puede observar en la foto principal (Figura 14). Los espigones provocan que el canalizo sea más ancho, es decir, desplazan el transporte hacia fuera ya que la corriente encuentra su camino donde los espigones terminan. Aunque no se encontró nada similar en la literatura, se considera que la existencia de este canalizo y su desplazamiento provocado por la presencia de espigones, son un indicador de que el transporte de sedimento que se genera por la corriente es impedido por estas estructuras.

Análisis cuantitativo

Los resultados se encuentran reportados en la Tabla 6. Conociendo el tamaño real del espigón es posible determinar la escala a la que se encuentra cada fotografía. Con las fotografías que fueron tomadas el 16 de diciembre de 2003, y las mediciones realizadas el 28 de enero de 2005, es posible estudiar la evolución del perfil en estos dos años.

En la primera columna de la Tabla 6, se encuentra el número del espigón, de acuerdo con la notación que se utilizó por el grupo del Dr. Euan. Se indica el número de la fotografía correspondiente. En la segunda columna se indica la forma del espigón. La longitud del espigón es la distancia que hay entre sus dos extremos. En el caso de los espigones curvos (Figura 18), R1, R2 y R3 son las tres rectas en las que fueron divididos los espigones para poder medir su longitud. Para todos los espigones se midió el largo L, el ancho A y lo alto H de los costales que los formaban. Los valores están reportados dentro de la Tabla 6, en la sección de las columnas de costal. Por último se midió la sección del espigón que se encontraba cubierta por arena en ambos lados, y en el caso de espigones hundidos (que no tienen arena a los lados), se midió la distancia a la que se encontraban de la pleamar. Estos datos se reportaron en las dos últimas columnas de la Tabla 6.

Tabla 6 medidas de los distintos espigones

Espigón	Forma	Longitud	R1	R2	R3	costal				línea de playa	
						L	A	H	#	de corriente	en corriente
0 (Foto 5)	recto	35.1				2.7	1.85		15	-15.2	-
1 (Foto 5)	recto	45 (42.3)				2.74	1.85	0.6	17	-8.9	-
2	recto	50.8				2.8	1.75	0.55	18	-1.5	-
3	curvo	63.3	13.2	12.5	42.5	2.8	2	0.5	26	23.5	16.2
4 (Foto 4)	curvo	73.3	11.3	10.5	53.3	2.6	1.85	0.5	30	44.6	10.2
5 (Foto 4)	curvo	77.4	16.3	14.9	52.9	2.65	1.8	0.56	32	42.4	5.6
6	curvo	81.05	17.5	11.6	63.8	2.75	1.8	0.63	35	37	9
7	curvo	83.8	13.9	13.2	59.2	2.65	1.8	0.6	35	24.8	52
8 (Foto 2)	en cruz *	-----				-----	-----	-----	---	-----	-
9	recto	52.9				3.3	1.84	0.48	15	-11.3	-
10	recto	57.3				3.1	1.8	0.54	18	12.5	19.86
11	recto	56.5				3.4	2.05	0.45		12.1	32.5
12 (Foto 1)	recto	49.2				3.2	2	0.47	14	21.3	31.7
13 (Foto 1)	recto	45.3				3.3	1.9	0.48	13	24.3	34.7
14	recto	40.1				3.3	2	0.46	12	25.8	31.4

*dimensiones del espigón en forma de cruz reportadas en la Figura 21.

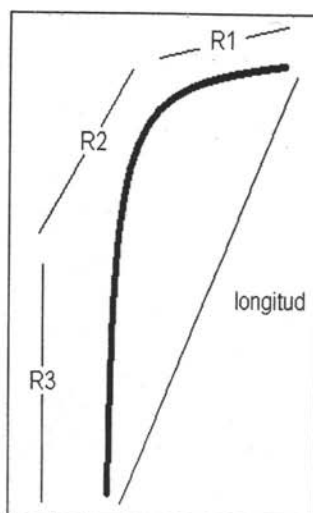


Figura 20 Espigón curvo

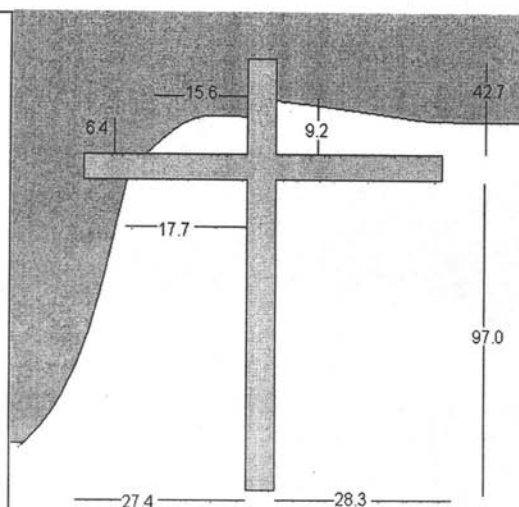


Figura 21 Dimensiones del espigón en cruz

Con base en estos datos se acotaron las siguientes fotografías, y se compararon los datos obtenidos en 2005 con los datos representados en las fotografías. El resultado de esta comparación se presenta en la Tabla 7. Aquí se encuentran reportados el perfil de playa en 2005, el perfil de playa en 2003 obtenido de las fotografías, y la comparación entre ambos. Con esta comparación se puede obtener la evolución de la línea de costa en el lado corriente arriba y en el lado corriente abajo. Un valor negativo de estos factores indica que la playa ha perdido terreno frente al mar. Ya que los espigones se encuentran sumergidos en su totalidad, y se sabe que originalmente fueron colocados sobre arena.

Para determinar la escala de las fotografías se delimitó el tamaño de los espigones y se comparó con el tamaño real medido en 2005. Conociendo la longitud real y la longitud en las fotografías, se calculó un factor de conversión. Este factor se utilizó para conocer las dimensiones reales de la distribución de arena que es posible observar en las fotografías.

Tabla 7 Comparación del perfil de playa en la isla de Holbox

Espigón	forma	línea de playa 12.01.05		línea de playa 16.12.03		Evolución (metros)	
		de corriente	en corriente	de corriente	en corriente	de corriente	en corriente
0 (Foto 5)	recto	-15.2	-	-14.62	0.00	-0.58	-
1 (Foto 5)	recto	-8.9	-	-9.50	0.00	0.60	-
2	recto	-1.5	-	2.92	14.62	-4.42	-
3	curvo	23.5	16.2	35.09	20.47	-11.59	-4.27
4 (Foto 4)	curvo	44.6	10.2	49.71	8.77	-5.11	1.43
5 (Foto 4)	curvo	42.4	5.6	41.60	-6.75	0.80	12.35
6	curvo	37	9	22.53	7.29	14.47	1.71
7	curvo	24.8	52	18.56	27.83	6.24	24.17
8* (Foto 2)	en cruz	-----	-				
9	recto	-11.3	-	5.30	5.30	-16.60	-
10	recto	12.5	19.86	-8.66	9.33	21.16	10.53
11	recto	12.1	32.5	2.67	10.66	9.43	21.84

* El espigón en forma de cruz presenta una ligera deposición. Una vez alcanzada la zona transversal, el acelerado crecimiento del perfil de la playa en este espigón se detuvo. La explicación es que la deposición era causada por el rompeolas que ya está enterrado.

En la comparación es posible observar que la zona donde se encuentran los primeros espigones sufre una erosión rápida de manera generalizada. Los tres primeros espigones han sido superados por el perfil de la playa por lo que su funcionalidad ha desaparecido. Los espigones con forma curva presentan cierta estabilidad a primera vista. Sin embargo, es posible detectar un patrón en su comportamiento. Los primeros espigones curvos están a punto de ser superados por el perfil de playa, de tal manera que si la evolución de la playa se mantiene constante, la erosión avanzará hasta alcanzar a los espigones que siguen.

El patrón de la evolución del perfil es muy claro en esta zona. El espigón desplaza el transporte de sedimento a tal grado que la erosión en su lado corriente abajo llega a tal punto que provoca el hundimiento del mismo espigón sin importar la deposición que se pueda presentar en el lado corriente arriba. La colocación de un mayor número de espigones sólo logra aplazar temporalmente este destino fatal.

Análisis Granulométrico

El tamaño de grano debe ser homogéneo a lo largo de una zona con características similares. Sin embargo, en el caso de Holbox, la presencia de los espigones genera condiciones diferentes en una misma costa. Los espigones provocan zonas de erosión y zonas de deposición. Las partículas pequeñas son removidas por el oleaje con mayor facilidad que las más grandes, por lo tanto en las zonas donde existe erosión (como es el caso de Chimay) el tamaño de grano que se queda en la playa tiende a ser más grande. En las zonas donde hay deposición pasa lo contrario: los granos pequeños llegan en mayor cantidad hasta la costa. Es por eso que probablemente en este estudio, Chimay que es un sitio de alta erosión, tenga un tamaño de grano más grande que Faro Viejo en donde las condiciones promueven la sedimentación.

Los sitios de muestreo se dividen en dos grupos. Un grupo son los tres sitios que se encuentran en Faro Viejo, que encuentra en la zona del (recuadro 1 Figura 14) a tres distintas profundidades. Faro Viejo es una zona donde la erosión se ha desacelerado, aunque no detenido. El otro grupo se conforma por tres sitios que se encuentran en Punta Chimay (recuadro 4 Figura 14). Esta última es la zona con mayor erosión en la costa de Holbox. El tamaño del sedimento varía ligeramente según las condiciones de erosión. Es por esto que se seleccionaron estos dos grupos con el fin de obtener una muestra representativa de toda la costa. Se utilizaron seis tamices. El diámetro de partícula de la arena llega hasta los 0.004 milímetros. Las muestras se agitaron en el tamizador del laboratorio de Ingeniería de la Facultad de Química durante 20 minutos. Los datos se reportan en una tabla similar a la siguiente:

En la primera columna se describe el sitio donde fue realizado el muestreo. En la segunda se encuentra el número de clasificación comercial de la malla. En la tercera columna se presenta el diámetro de partícula que pasa por cada malla. En la cuarta se encuentra la cantidad de sedimento pesada después de la agitación en cada una de las mallas y en el fondo del tamizador. En la quinta columna se anotó el porcentaje que representa la cantidad pesada en cada malla con respecto al total. Por último, en la parte inferior de la tabla se apuntó

la cantidad de sedimento utilizada para el tamizado, y la cantidad recuperada después del tamizado. Los resultados fueron los siguientes:

Punto 01

Faro Viejo antes de la pleamar

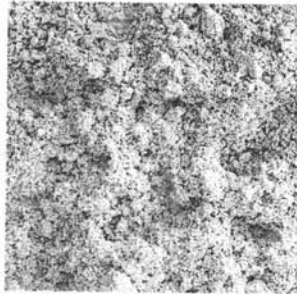


Sitio	Maya #	Maya (mm)	Cantidad de Sedimento (g)	%
Faro Viejo punto 01	16	1.18	0.94	0.94
	35	0.5	3.63	3.63
	70	0.21	6.73	6.73
	190	0.105	72.67	72.67
	200	0.074	15.85	15.85
	300	0.00432	0.17	0.17
	fondo	----	0.001	0.001
Tot inicial	100.04	Tot final:	99.991	

En este punto se encontró arena de tipo fina. Al estar en la pleamar, el mar llega con poca fuerza a mojar la arena. Esto provoca que el sedimento que llega a esta zona, sea muy pequeño. Se encontraron pocas partículas mayores de 1.18 mm que son la conchuela y demás sedimento que resiste mejor el embate del oleaje.

Punto 02

Faro Viejo a 5 metros de la pleamar en dirección al mar.

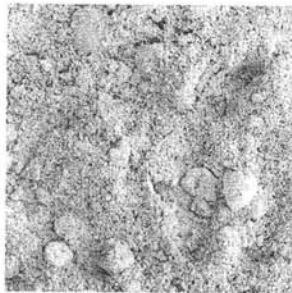


Sitio	Maya #	Maya (mm)	Cantidad de Sedimento (g)	%
Faro Viejo punto02	16	1.18	0	0
	35	0.5	0.08	0.08
	70	0.21	2.06	2.06
	190	0.105	76.66	76.67
	200	0.074	20.51	20.51
	300	0.00432	0.67	0.67
	fondo	----	0.001	0.001
Tot inicial	100	Tot final:	99.981	

En este punto la arena se puede clasificar como fina, con más del 76% con granos entre 0.21 y 0.105 mm, el mayor porcentaje en todo el muestreo. Esta muestra no contiene sedimento mayor a 1.18 mm.

Punto03

Faro Viejo a 10 metros de la pleamar en dirección al mar.



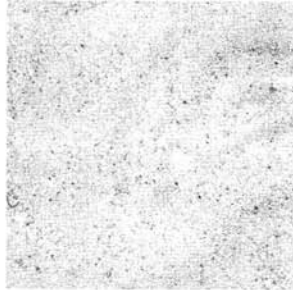
Sitio	maya #	maya (mm)	Cantidad de	%
-------	--------	-----------	-------------	---

			sedimento (g)	
Faro Viejo punto 03	16	1.18	22.87	22.90
	35	0.5	9.77	9.78
	70	0.21	4.479	4.48
	190	0.105	42.32	42.37
	200	0.074	19.57	19.59
	300	0.00432	0.81	0.81
	fondo	-----	0.04	0.04
Tot inicial	100.09	Tot final:	99.859	

Este punto es más profundo y por lo tanto las olas que aquí rompen, son de mayor altura. Esto provoca que la cantidad de sedimento con tamaño de grano grande sea superior a la de los sitios más cercanos a la playa. La ola llega a esta zona con turbulencia lo que provoca que mantenga en suspensión partículas grandes. Aquí se pueden encontrar muchas conchas de 2 ó 3 cm.

Punto 04

Chimay antes de la pleamar



Sitio	Maya #	Maya (mm)	Cantidad de sedimento (g)	%
Chimay punto 04	16	1.18	0.943	0.94
	35	0.5	15.83	15.83
	70	0.21	21.17	21.17
	190	0.105	56.5	56.50
	200	0.074	5.43	5.43
	300	0.00432	0.07	0.07
	fondo	-----	0.01	0.01
Tot inicial		Tot final:	99.953	

En Chimay existe más sedimento con diámetros de partícula entre 0.5 y 0.21mm, incluso que en la zona más profunda de Faro Viejo. Al ser una zona

que sufre de mucha erosión, las partículas que conforman la arena son mayores debido a lo que se explicó anteriormente.

Punto 05

Chimay a 5 metros de la pleamar en dirección al mar.



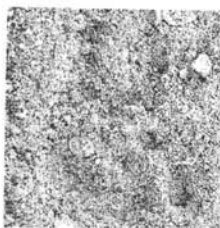
Sitio	Maya #	Maya (mm)	Cantidad de sedimento (g)	%
Chimay punto 05	16	1.18	2.08	2.08
	35	0.5	5.66	5.66
	70	0.21	14.12	14.12
	190	0.105	71.95	71.95
	200	0.074	5.9	5.90
	300	0.00432	0.08	0.08
fondo	----	0.01	0.01	
Tot inicial	100.02	Tot final:	99.8	

En esta zona existe una gran cantidad de sedimento entre 0.105 y 0.21 mm. Esta zona está más profunda que el mismo punto en Faro Viejo. La diferencia se debe a que la pendiente aquí es más pronunciada.

Punto 06

Chimay a 10 metros de la pleamar en dirección al mar.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

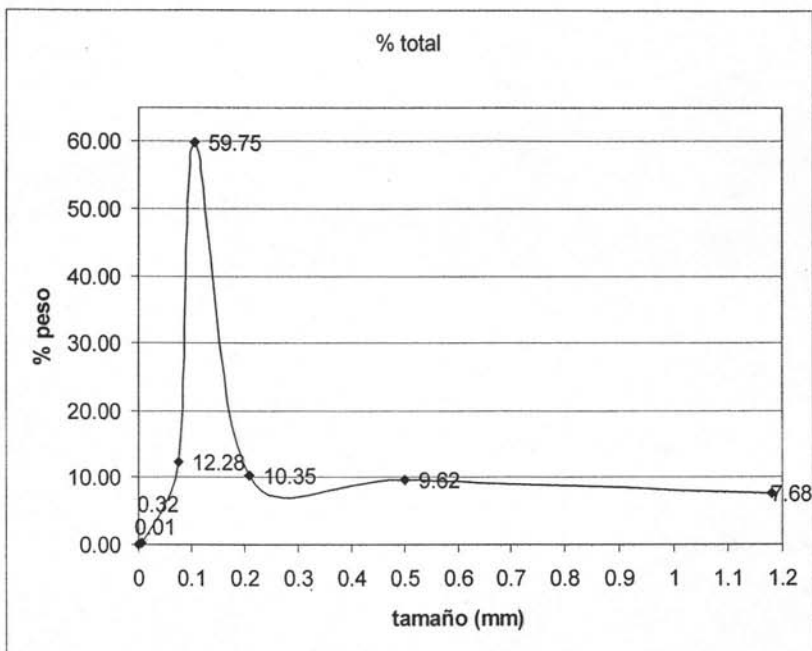


Sitio	maya #	maya (mm)	Cantidad de sedimento (g)	%
Chimay punto 06	16	1.18	19.15	19.15
	35	0.5	22.65	22.65
	70	0.21	13.45	13.45
	190	0.105	37.83	37.83
	200	0.074	6.28	6.28
	300	0.00432	0.11	0.11
	fondo	----	0.01	0.01
Tot inicial	100.06	Tot final:	99.48	

Este punto es el más profundo de todos los realizados. Esto provoca que la cantidad de sedimento con tamaño de grano grande sea superior a la de los sitios más cercanos a la playa. La ola llega a esta zona con gran turbulencia provocando la suspensión aún de partículas grandes. Aquí se pueden encontrar muchas conchas de 2 ó 3 cm.

En general, podemos decir que el sedimento en la isla de Holbox es principalmente catalogado como arena fina, como se observa en la siguiente tabla donde se reporta el resultado global del estudio de granulometría. En la gráfica se muestra la tendencia de estos valores con mayor claridad.

Promedio	Maya #	Maya (mm)	Sedimento (gr)	%
total de puntos	16	1.18	45.983	7.68
	35	0.5	57.62	9.62
	70	0.21	62.009	10.35
	190	0.105	357.93	59.75
	200	0.074	73.54	12.28
	300	0.00432	1.91	0.32
	fondo	0	0.072	0.01
Tot inicial	600	Tot final:	599.064	



De la grafica se deduce que el 60% del sedimento de Holbox tiene un diámetro de partícula entre 0.210 y 0.105 mm. Por lo tanto su clasificación en los dos sistemas es de arena muy fina (*Wenworth*) y fina (ASTM). Esto concuerda con los resultados esperados, y comprueba la hipótesis de que el tamaño de sedimento permite que aunque el oleaje sea moderado exista erosión.

Oleaje

Los resultados de los cálculos con el modelo de ola lineal se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de la altura de la ola en la costa de Holbox obtenidos por medio del cálculo de Kr y Ks.

AÑO	MES	H0 (m)	T (s)	Θ_0	L0 (m)	L (m)	C0 (m/s)	C1 (m/s)	Cg (m/s)	Ks	Seno Θ_1	Kr	H1 (m)
ejem	-	1	15	45	351	144.05	23.4	9.60	9.04	1.14	0.29	0.86	0.98
1998	2	1.83	5	157	39	20.94	7.8	4.19	4.68	0.91	0.22	0.98	1.63
1998	3	1.52	5	202	39	20.94	7.8	4.19	4.68	0.91	0.50	0.62	0.86
1998	4	0.91	5	180	39	20.94	7.8	4.19	4.68	0.91	0.39	0.85	0.71
1998	5	0.76	2	180	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.70	0.85	0.64
1998	6	0.46	2	157	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.39	0.98	0.45
1998	7	0.3	2	157	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.39	0.98	0.30
1998	8	0.3	2	157	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.39	0.98	0.30
1998	9	1.52	4	157	24.96	16.22	6.24	4.05	3.65	0.92	0.26	0.98	1.38
1998	10	0.61	2	180	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.70	0.85	0.52
1998	11	0.91	5	180	39	20.94	7.8	4.19	4.68	0.91	0.39	0.85	0.71
1998	12	1.98	5	315	39	20.94	7.8	4.19	4.68	0.91	-0.02	1.02	1.85
1999	1	0.91	6	180	56.16	25.57	9.36	4.26	5.51	0.92	0.33	0.85	0.71
1999	2	1.83	6	270	56.16	25.57	9.36	4.26	5.51	0.92	0.31	0.87	1.47
1999	3	2.29	8	315	99.84	34.67	12.48	4.33	6.65	0.97	-0.01	1.02	2.26
1999	4	1.07	2	157	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.39	0.98	1.04
1999	5	0.91	2	157	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.39	0.98	0.89
1999	6	0.76	3	180	14.04	11.30	4.68	3.77	2.52	0.96	0.58	0.85	0.62
1999	7	0.61	2	180	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.70	0.85	0.52
1999	8	0.61	2	315	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	-0.03	1.02	0.62
1999	9	1.07	5	202	39	20.94	7.8	4.19	4.68	0.91	0.50	0.62	0.60
1999	10	2.13	4	202	24.96	16.22	6.24	4.05	3.65	0.92	0.60	0.62	1.22
1999	11	1.52	6	202	56.16	25.57	9.36	4.26	5.51	0.92	0.42	0.62	0.87
1999	12	2.59	8	315	99.84	34.67	12.48	4.33	6.65	0.97	-0.01	1.02	2.56
2000	1	2.74	8	225	99.84	34.67	12.48	4.33	6.65	0.97	0.35	0.17	0.45
2000	2	0.91	2	135	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.03	1.02	0.93
2000	3	1.52	6	202	56.16	25.57	9.36	4.26	5.51	0.92	0.42	0.62	0.87
2000	4	0.91	3	157	14.04	11.30	4.68	3.77	2.52	0.96	0.32	0.98	0.86
2000	5	0.91	2	157	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.39	0.98	0.89
2000	6	1.22	5	180	39	20.94	7.8	4.19	4.68	0.91	0.39	0.85	0.94
2000	7	0.46	2	157	6.24	6.05	3.12	3.02	1.57	1.00	0.39	0.98	0.45
2000	8	0.91	4	135	24.96	16.22	6.24	4.05	3.65	0.92	0.02	1.02	0.86
2000	9	1.37	6	157	56.16	25.57	9.36	4.26	5.51	0.92	0.18	0.98	1.24
2000	10	1.68	7	225	76.44	30.14	10.92	4.31	6.16	0.94	0.39	0.17	0.27
2000	11	1.83	6	225	56.16	25.57	9.36	4.26	5.51	0.92	0.46	0.17	0.29

Al obtener la altura aproximada de la ola es posible determinar si la colocación de arrecifes artificiales es suficiente para disminuir su energía de tal forma que se evite la erosión, o es necesario colocar otro tipo de estructura. Conociendo la altura y la longitud de la ola en la costa, es posible determinar el efecto de un arrecife artificial. Por ejemplo, cuando la longitud de la ola es igual a 34.67 m (marcado en negritas en la tabla anterior), la altura resultante en la costa es de 2.56 m. De acuerdo a lo reportado por (Arhens, 1987) es posible construir

arrecifes artificiales que reflejen el 40 % de la energía de la ola que los impacta frontalmente.

Después de realizar cálculos más precisos, será posible optimizar el proyecto y disminuir las dimensiones de los arrecifes. Con esto es posible suponer que los arrecifes artificiales pueden detener la erosión en la isla de Holbox.

Conclusiones

Holbox es una isla de barrera y como tal, se encuentra en una constante dinámica espacial. Actualmente su movimiento se genera por medio de la erosión en su parte que ve al mar y la deposición de sedimento en el interior de la laguna. Por desgracia la presencia humana ha acelerado este proceso con acciones como la destrucción de vegetación, la extracción de gruesos, espigones.

La primera actividad humana que aceleró la erosión en la isla fue la remoción de conchuela y arena de la playa. Como se explica en el análisis granulométrico, esto hizo que la playa fuera más susceptible a la erosión, ya que el tamaño de grano del sedimento expuesto a la energía de las olas disminuyó.

La colocación de palmeras desplazó a la vegetación de la región. Las palmeras, debido a su gran tamaño, evitaban que el viento llegara con la misma fuerza al suelo, y de esta manera protegían a la playa contra la erosión eólica. Además, sus raíces fijaban el sedimento y disminuían con esto su erosión. Sin embargo, después del amarillamiento letal las palmeras murieron y dejaron al suelo totalmente desprotegido.

Con el fin de frenar la erosión que se estaba observando en la playa, se inició el proyecto de colocación de espigones. Estos espigones han alterado la dinámica de la zona desde hace treinta y cinco años. La teoría nos enseña que

arrecifes artificiales que reflejen el 40 % de la energía de la ola que los impacta frontalmente.

Después de realizar cálculos más precisos, será posible optimizar el proyecto y disminuir las dimensiones de los arrecifes. Con esto es posible suponer que los arrecifes artificiales pueden detener la erosión en la isla de Holbox.

Conclusiones

Holbox es una isla de barrera y como tal, se encuentra en una constante dinámica espacial. Actualmente su movimiento se genera por medio de la erosión en su parte que ve al mar y la deposición de sedimento en el interior de la laguna. Por desgracia la presencia humana ha acelerado este proceso con acciones como la destrucción de vegetación, la extracción de gruesos, espigones.

La primera actividad humana que aceleró la erosión en la isla fue la remoción de conchuela y arena de la playa. Como se explica en el análisis granulométrico, esto hizo que la playa fuera más susceptible a la erosión, ya que el tamaño de grano del sedimento expuesto a la energía de las olas disminuyó.

La colocación de palmeras desplazó a la vegetación de la región. Las palmeras, debido a su gran tamaño, evitaban que el viento llegara con la misma fuerza al suelo, y de esta manera protegían a la playa contra la erosión eólica. Además, sus raíces fijaban el sedimento y disminuían con esto su erosión. Sin embargo, después del amarillamiento letal las palmeras murieron y dejaron al suelo totalmente desprotegido.

Con el fin de frenar la erosión que se estaba observando en la playa, se inició el proyecto de colocación de espigones. Estos espigones han alterado la dinámica de la zona desde hace treinta y cinco años. La teoría nos enseña que

tratar de evitar el transporte de sedimento a lo largo de la playa por medio de los espigones no funciona en todo los casos, por el contrario, en muchas ocasiones acelera la erosión.

Holbox se caracteriza por un oleaje moderado, que en principio no tiene la energía necesaria para efectuar el transporte de sedimentos de sílice. Sin embargo, la arena de la zona esta constituida por material calcáreo lo que explica oleaje tan pequeño presente erosión. Toda la costa de Holbox es propensa a la erosión debido a las características de su sedimento.

La desaparición de los espigones es indispensable para poder controlar la erosión. De las entrevistas, el cálculo de oleaje y el estudio granulométrico se puede afirmar que incluso los arrecifes artificiales pueden moderarla. Los rompeolas son capaces de disminuir la energía de las olas en tal magnitud, que la erosión se vea disminuida drásticamente.

Bibliografía

- Airy, G. B. 1845. *Tides and Waves*, Encyc. Metrop, Art. 192, 241-396.
- American Society for Testing Materials 1994
American Society for Testing Materials. 1994. Volume 04.08, Soil and Rock (1): D420 – D4914, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Capurro 2003
Capurro, Luis, 2003, Un Gran Ecosistema Costero: LA península de Yucatán, Avance y Perspectiva, vol. 22, pp. 69-75
- Crapper 1984
Crapper, G. D. 1984. *Introduction to Water Waves*, John Wiley & Sons, New York.
- CRUPY
Centro Regional Universitario de la Península de Yucatán
<http://www.chapingo.mx/crupy/?s=maszona>
- Dalrymple 1974a
Dalrymple, R. A. 1974. "A Finite Amplitude Wave on a Linear Shear Current," *Journal of Geophysical Research*, Vol 79, pp 4498-4504.
- Dean 1968
Dean, R. G. 1968. "Relative Validity of Water Wave Theories," *Proc. Civil Engr. in Ocean*, ASCE, Vol 1, pp1-30.
- Dean and Dalrymple 1991
Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific Pub. Co., Teaneck, NJ.

- Demirbilek, Z. 1988. "Forces on Marine Risers in a Coexisting Environment," *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol 114, No. 3, pp 346-362.

- Euan, J. 2004. Información personal.

- S.J. Eden-Green
<http://rds.org.hn/docs/listas/cocos/historia.htm>

- Fenton 1988
 Fenton, J. D. 1988. "The Numerical solution of Steady Water Wave Problem," *Jour. Comp. and Geo.*, Vol 14, pp 357-368.

- Fulford 1985
 Fulford, E. T. 1985. "Reef Type Breakwaters for Shoreline Stabilization," *Proceedings, Coastal Zone 85, ASCE, NY.*

- Ippen 1966
 Ippen, A.T., 1966. *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York.

- Kraus, Hanson, and Blomgren 1994
 Kraus, N. C., Hanson, H., and Blomgren, S. H. 1994. "Modern Functional Design of Groin System," *Proceedings, 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, NY*, pp 1327-1342.

- Leñero y Marín 1986
 Manual de periodismo. Vicente Leñero y Carlos Marín.
 Editorial Grijalbo México, 1986.

- Hardy and Young 1991

Hardy, T. A., and Young, I. R. 1991. "Modeling Spectral Wave Transformation on a Coral Reef Flat," *Proceedings, Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering*," pp 345-350.

- Hasselmann et al. 1973
Hasselmann et al. 1973. "Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joing North Sea Wave Project (JONSWAP)," *Deutsche Hydrograph. Zeit., Ergänzungsheft Reihe A (80), No. 12.*
- Havelock 1918
Havelock, T. H. 1918. "Periodic Irrotational Waves of Finite Height," *Trans. Royal Soc. of London, Vol 95 series A, pp 37-51.*
- Hsu, S. A. 1988
Coastal Meteorology, Academic Press, San Diego, CA.
- Kinsman 1965
Kinsman, B. 1965. *Wind Waves*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Kraus and Bocamazo 2000
Kraus, N. C., and Bocamazo, L. M. 2000. "State of Understanding of Groin Functioning and Recent Promising Innovations," *Proceedings, 3rd Annual Conference, Northeast Shore and Beach Preservation Assoc.*,
- Lesnick 1979
Lesnick, J. R. 1979. "An Annotated Bibliography on Detached Breakwaters and Artificial Headlands," Miscellaneous Report 79-1, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Liu and Dalrymple 1978

- Liu, P.-L. F., and Dalrymple, R. A. 1978. "Bottom Friction Stresses and Longshore Currents due to Waves with Large Angles of Incidence," *Jour. Marine Res.*, Vol 36, pp 357-375.
- Longuet-Higgins 1975a
Longuet-Higgins, M. S. 1975a. "Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves," *Journal of Geophysical Research*, Vol 75, pp 6778-6789.
 - Mohr 1994
Mohr, M. C. 1994. "Presque Isle Shoreline Erosion Control Project," *Shore and Beach*, Vol 62, No. 2, pp 23-28.
 - Sorensen 1990
Sorensen, T. 1990. "Review of Coastal Engineering Works at the Pengkalan Datu Seaworks," Final Report Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark.
 - Stoker 1957
Stoker, J. J. 1957. *Water Waves, The Mathematical Theory with Applications*, Interscience, New York.
 - Tran,2002
Tran, KimChi, Euan Jorge e Isla María Luisa, Public Perception of development Issues: Impact of Water Pollution on a Small Coastal Community, *Ocean and Coastal Management* 45 (2002)405420
 - Pattiaratchi and Bancroft 2000
Pattiaratchi, C., and Bancroft, S. 2000. "Design Studies and Performance Monitoring of an Artificial Surfing Reef: Cable Station,

Western Australia," *Abstracts, 27th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, NY, Paper No. 123.

- Pope 1997
Pope, J. 1997. "Responding to Coastal Erosion and Flooding Damages," *Journal of Coastal Research* Vol 13, No. 3, pp 704-710.

- SEMARNAT
<http://www.semarnat.gob.mx/groo/zofemat/www/erosion/erosion1.shtml>

- Turner et al. 2000
Turner, I., Leyden, V., Symonds, G., McGrath, J., Jackson, A., Jancar, T., Aarninkhorf, S., and Elshoff, I. 2000. "Comparison of Observed and Predicted Coastline Changes at the Gold Coast Artificial (Surfing) Reef," *Abstracts, 27th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, NY, Paper No. 125.

- (USACE)
U.S. Army Corps of Engineers. 1993. "Wave Attenuation Over Reefs," Coastal Engineering Technical Note, CETNI-56, U.S. Army Engineer, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

- (USACE)
EM 1110-2-1204
Environmental Engineering for Coastal Shore Protection

- Wu and Liu 1984
Wu, C-S., and Liu, P.-L. F. 1984. "Effects of Nonlinear Inertial Forces on Nearshore Currents," *Coastal Engr.*, Vol 8, pp 15-32.