



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**“Sedimentología y Dinámica Costera del Transecto Comprendido
Entre Punta Maroma y Tulum, Estado de Quintana Roo en el
Caribe Mexicano”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
JUAN JOSÉ MEDINA ÁVILA**

**TUTOR PRINCIPAL: DR. ANTONIO ZOILO MÁRQUEZ GARCÍA
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM.)**

COMITÉ TUTOR:

**DRA. MARÍA LUISA MACHAÍN CASTILLO
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM.)
DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM.)
DRA. BLANCA ESTELA BUITRÓN SÁNCHEZ
(INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM.)
DRA. ISABEL ROCÍO LÓPEZ DE JUAMBELZ
(FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM.)**

MÉXICO, CD. MX., MES (agosto), 2023



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.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**“Sedimentología y Dinámica Costera del Transecto Comprendido
Entre Punta Maroma y Tulum, Estado de Quintana Roo en el
Caribe Mexicano”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
JUAN JOSÉ MEDINA ÁVILA**

**TUTOR PRINCIPAL: DR. ANTONIO ZOILO MÁRQUEZ GARCÍA
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM.)**

COMITÉ TUTOR:

**DRA. MARÍA LUISA MACHAÍN CASTILLO
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM.)
DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM.)
DRA. BLANCA ESTELA BUITRÓN SÁNCHEZ
(INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM.)
DRA. ISABEL ROCÍO LÓPEZ DE JUAMBELZ
(FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM.)**

MÉXICO, CD. MX., Octubre de 2023

AGRADECIMIENTOS

A MI ALMA MATER

“UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO”

“Por mi raza hablará el Espíritu”

Al comité tutor por las observaciones, los comentarios y consejos aportados en la revisión del presente proyecto de maestría, muchas gracias.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Antonio Zoilo Márquez García por su valioso apoyo y dirección para la conclusión del presente proyecto, muchas gracias.

“A mi familia y a mis seres queridos, a mis amigos (que afortunadamente son muchos y siempre están conmigo), a todos los que están hoy en día, pero ante todo y de manera muy especial, a todos aquellos que están en mi mente, y que ya partieron antes de poder compartir este importante momento con ellos” .

¡ A todos muchas gracias !

Índice

1. Introducción

1.1 Antecedentes

1.2 Localización del área de estudio

1.3 Características geológicas

1.3.1 Fisiografía

1.3.2 Estratigrafía

1.3.3 Geología y Tectónica

2. Objetivos

3. Metodología

3.1 Descripción del trabajo

3.2 Trabajo cartográfico (gabinete)

3.3 Trabajo de campo

3.4 Trabajo de laboratorio

4. Resultados y discusión

4.1 Perfiles de playa:

4.1.1 playacar

4.1.2 Paa-mul

4.1.3 Bahía de Tankah

4.1.4 Tulum

4.1.5 Discusión general de resultados

5. Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

1. Introducción

En la actualidad, la mayoría de las playas del mundo se ven afectadas por procesos antropogénicos como son: actividades turísticas, pesqueras, náuticas recreativas, construcción de obras civiles (diques, espigones, rompeolas, ductos submarinos, etc.), y por procesos naturales, tales como: huracanes, tormentas, marejadas y oleaje. (Chávez e Hidalgo, 1988; Salazar-Vallejo, 1998).

En los bordes continentales y de islas, es común encontrar zonas de acumulación de sedimentos arenosos que han sido transportados por la acción de las olas, las mareas y del viento, lo que se manifiesta por la formación de líneas de playas muy extensas las que por lo general presentan pendientes más suaves, acompañadas por la formación de estructuras en forma de montículos alargados y distribuidos de manera paralela a la línea de costa denominadas dunas de arena; aunado a lo anterior, se presentan también estructuras en forma de lengüetas y de barras arenosas. Por otra parte, las líneas costeras también se ven afectadas por procesos de erosión y remoción de sedimentos, lo que provoca la exposición de formaciones rocosas y la formación de cavernas, así como también el desarrollo de farallones y de salientes en forma de puntas las que se asocian regularmente a playas angostas con pendientes fuertes y que contienen sedimentos del tipo de arenas gruesas y gravas de tamaños variables. Es importante mencionar que, dichos bordes continentales (zona litoral) presentan en general una morfología cambiante como resultado de la energía asociada a la dinámica marina (olas, mareas, corrientes marinas y patrones de viento), y de manera más íntima con la morfología costera y de las playas, sobre todo en éstas en cuanto al tamaño, la forma y la composición de las arenas que las conforman (Márquez-García, A.Z. y Pérez-Aguilar, V, 2000).

Curry *et al.* (1969) y Krumbein y Sloss (1963) mencionan que los procesos que gobiernan la dinámica litoral están relacionados con los cambios en el nivel del mar, la variación de aporte de sedimentos y los cambios de energía causados por el oleaje y corrientes que causan diferencias en el ancho, profundidad, pendiente y forma de las playas, los cuales varían durante las diferentes épocas del año, en la época de lluvias se presentan los cambios más intensos principalmente por la frecuencia e intensidad de las tormentas. Los procesos costeros que afectan a la zona litoral, ocurren en escalas muy variables de tiempo (desde horas hasta miles de años). En la comprensión de la dinámica costera es necesario considerar todas las escalas, a fin de identificar la combinación de los procesos más importantes que se presentan (Marquez-García, 2000).

Hoy en día, las acciones emprendidas por la civilización humana han impactado de manera importante la morfología y el relieve de la zona costera, sobre todo con los asentamientos humanos y su desarrollo urbano (construcción de hoteles, casas, restaurantes, etc.) y de forma muy importante lo relacionado con la construcción de infraestructura costera-marina (muelles, espigones, escolleras, rompeolas, etc.) lo que modifica de manera directa el transporte litoral de los sedimentos y cambia la morfología de la playa.

En nuestro país, la mayor parte de la zona litoral ha sufrido importantes cambios y modificaciones debido al proceso de erosión, éste proceso se incrementa conforme pasa el tiempo, lo anterior se debe principalmente al incremento en el número e intensidad de los huracanes y tormentas tropicales, asimismo, en otros lugares se lleva a cabo la acumulación y el depósito de los materiales erosionados lo cual modifica la morfología y el relieve de las playas. Todo lo anterior tal vez sea el resultado del calentamiento global que sufre nuestro planeta (Salazar-Vallejo, S. I., 1998)

En la actualidad, una buena parte de la comunidad científica relacionada con las ciencias del mar (especialistas en geomorfología, oceanografía, micro-paleontología, geología marina, biología marina, etc.), se han dado a la tarea de estudiar de forma sistemática los procesos que tienen que ver con el comportamiento de las condiciones oceanográficas y de las actividades antropogénicas que intervienen de forma directa en el transporte de los sedimentos en las zonas costeras y litorales de nuestro país, con el propósito de encontrar soluciones para remediar el problema de la pérdida de playas, lo anterior debido a los procesos de erosión y al calentamiento global que tienden a incrementar el nivel del mar.

Los estudios sobre la dinámica costera de la zona, aportarán información fundamental para formular el desarrollo de proyectos adecuados y funcionales con el objetivo de lograr la recuperación de playas en la zona (Sylvatica, S.C., 2003) y (Sylvatica, S.C., 2003 Bis).

El año de 2005, fue muy especial en cuanto a la cantidad y categoría de los huracanes (Katrina, Rita, Stan, etc.), por mencionar alguno de ellos, cabe destacar al huracán Wilma, que alcanzó la categoría 5 en la escala Saffir-Simpson (vientos mayores a 270 kilómetros por hora, lento paso de entre dos y cinco kilómetros por hora) y que impactó a la península de Yucatán cuando tenía categoría 4 en dicha escala, y que provocó una gran destrucción en la zona turística de Cancún, Cozumel y la Riviera Maya. El paso de éste meteoro, causó la desaparición de grandes extensiones de playa y manglar, así como grandes daños materiales y varios cientos de muertos (fig. 1).

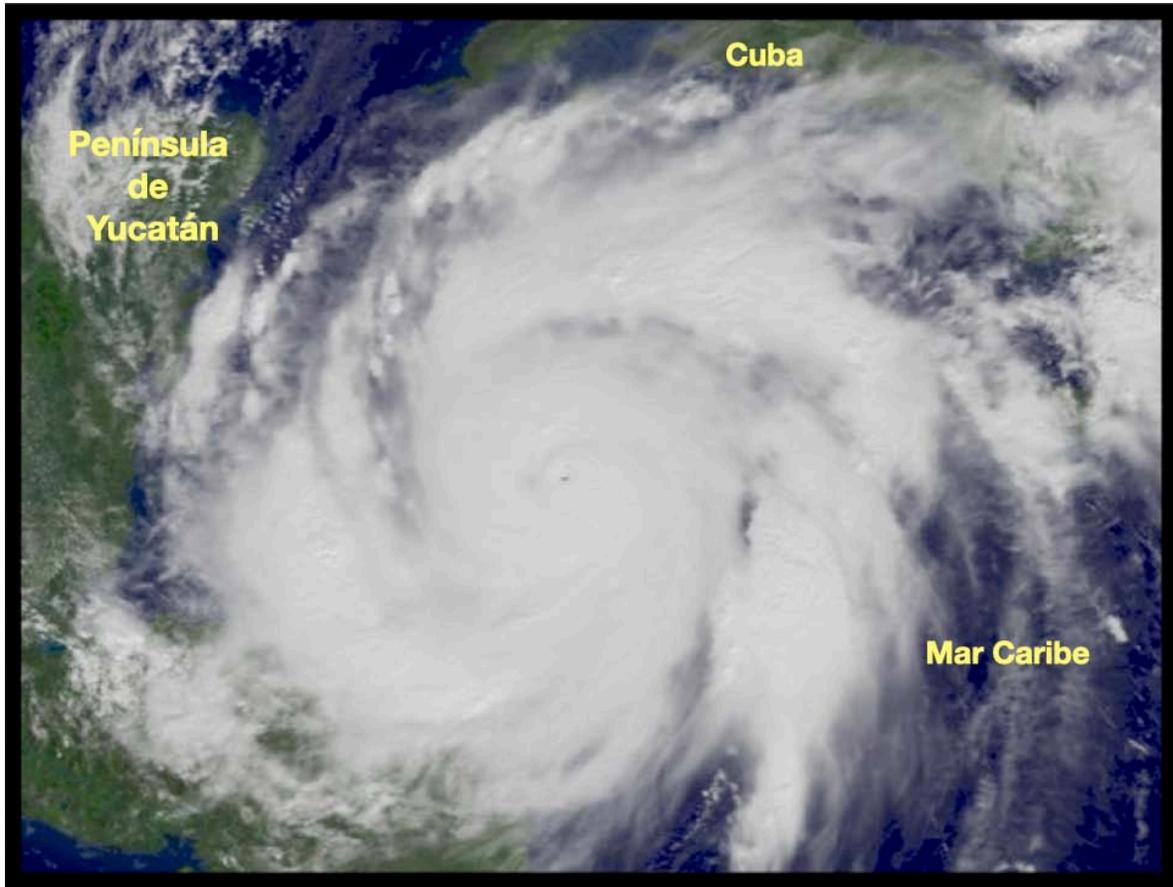


Figura 1. Vista satelital del huracán Wilma en el año 2004, (tomado de alamy.es)

Por otra parte, en Cancún, los bosques de manglar han sufrido un proceso paulatino de degradación, como consecuencia de la expansión de las actividades humanas como son: la ganadería, la agricultura, las pesquerías y, principalmente, del asentamiento de centros de población y el desarrollo de complejos turísticos, aunado a lo anterior cabe mencionar que hacia Punta Venado en el municipio de Solidaridad, la explotación indiscriminada de las rocas calizas, de la selva maya, los sistemas de manglares y dunas, así como de los sistemas de agua subterránea (ríos subterráneos y cenotes) por la empresa estadounidense Vulcan Materials Company en la cantera denominada “Calizas Industriales del Carmen” (CALICA) ha acelerado en buena medida los procesos de erosión y con ello ha contribuido notablemente con el cambio de la morfología del terreno y con la evolución de los sistemas sedimentológicos, biológicos y ambientales de la zona de estudio. (información obtenida en visita al sitio señalado)

En el Caribe mexicano se registra la tasa anual de deforestación de manglares más alta del país con casi 12%, principalmente por la construcción de centros turísticos. Hay que destacar que los bosques de manglar favorecen la retención de los sedimentos y funcionan como protección natural de la zona litoral ante los fenómenos meteorológicos. (inegi.org.mx),

En la década de los años ochenta del siglo pasado se registró un importante incremento en la actividad antropogénica en la zona de estudio y con ello una gran demanda de servicios turísticos en las principales ciudades de Quintana Roo, en el caso particular del área de estudio, las ciudades de Tulum y de Playa del Carmen tuvieron un crecimiento poblacional muy importante ya que el municipio de Solidaridad, en el cual se ubica el área de estudio alcanzó una tasa de crecimiento poblacional de las más altas del estado (7.9%) (inegi.org.mx), por lo que se vislumbra que dicha actividad antropogénica, seguirá en aumento, debido a las obras de infraestructura que aún se implementan como son: el sistema ferroviario del Tren Maya y del aeropuerto de Tulum con propósitos turísticos y de desarrollo económico (qroo.gob.mx), por lo que el panorama luce bastante sombrío en lo que respecta a la sedimentación y dinámica costera del litoral de la mundialmente conocida “Riviera Maya del Caribe Mexicano”.

“La geomorfología costera para Hsu y Silvester (1997) la definen como el estudio de las formas de las costas, su evolución, los procesos que se dan en ellas y los cambios que toman lugar dentro de las mismas”. “Clayton (1979) implícitamente la define como el estudio de los procesos involucrados en la formación de la línea de costa debidos a fuerzas que causan el cambio en ella y que pueden ser fácilmente identificadas”. “Serra Peris (1992) propone definirla como el estudio de las formas costeras, que permite reconocer los procesos actuantes a los cuales se encuentra sometido el medio costero”. Las definiciones anteriores, aún con sus diferencias, coinciden en señalar que la geomorfología costera tiene como objetivo estudiar la forma de las costas y los procesos que actúan en ellas.” (Ruiz-Martínez. G., Silva-Casarín. R., Mendoza-Baldwin. E. 2006).

“El análisis de la forma y los procesos que existen en una costa puede realizarse empleando el concepto de sistema litoral, el cual se integra por tres zonas diferentes: la zona terrestre, la zona litoral y la zona oceánica (Short, 1999); y que se encuentra delimitado por salientes naturales o artificiales.” (Ruiz-Martínez. G., Silva-Casarín. R., Mendoza-Baldwin. E. 2006).

“Se determinan las tres zonas en las que está constituida la playa como se menciona a continuación: la parte expuesta o sub-aérea (supraplaya o infralitoral), la zona de lavado o de rompiente (mesoplaya o mesolitoral) y la zona sumergida o saturada con agua (infraplaya o infralitoral)” (Nolasco Montero y Carranza Edwards, 1989).

1.1 Antecedentes

Las playas de Quintana Roo, durante las dos últimas décadas han sido afectadas por eventos climáticos severos, resultando en una disminución drástica de su superficie, la costa presenta una dinámica costera muy intensa, ya que, las aguas del mar Caribe en su trayectoria hacia el golfo de México generan un proceso erosivo permanente, al que periódicamente se unen los movimientos de arena originados por las mareas de tormenta. Estos procesos producen cambios en la morfología costera y en la ubicación de los bancos de arena (Sylvatica, S.C., 2003 B). Con respecto a los trabajos y proyectos realizados en esta región costera, a continuación se mencionan los siguientes:

Castro (1976); Descripción de las arenas carbonatadas y de su ámbito submarino al noreste de la Península de Yucatán.

Nolasco Montero y Carranza Edwards (1989), Estudio sedimentológico regional de las playas de Yucatán y Quintana Roo.

R. Bello M., J.E. Aguayo C., M.A. Bazañez, M.A. Del Vecchio, Juan Araujo Mendieta, Tomo 41, No. 3-4, 1980, Estudio sedimentológico en el Área Tulum–Cancún–Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo.

Merino-Ibarra y Otero-Dávalos (1991), Atlas Ambiental Costero. Puerto-Morelos, presentan la Geología superficial de la Península de Yucatán.

Jordan-Dahlgren (1993), “Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe mexicano”. Parte I. En la cual hace una caracterización ecológica y sedimentológica de la barrera arrecifal incluyendo el área de Akumal.

Márquez-García, A.Z. y Pérez-Aguilar, V, 2000, Geomorfología y Sedimentología de la zona arrecifal de la Bahía de Akumal, Quintana Roo. XII Congreso Nacional de Oceanografía, 22-26 de mayo del 2000, Huatulco, Oaxaca, Méx. Pág. 245.

En Cancún se originó el proyecto integral de recuperación y protección de playas con estructuras prefabricadas de concreto EPC' KANAAB, el cual será monitoreado para verificar que el objetivo sea cumplido. Esto se realizará mediante la evaluación de transporte litoral. (Sylvatica, S. 2003 a)

Guerrero-Herrejón (2004), Estudio de la ecología y distribución de foraminíferos bentónicos recientes en la playa y zona litoral de la Bahía de Akumal.

Carranza-Edwards A., Márquez-García, AZ, Tapia-Gonzalez, CI, Leticia Rosales-Hoz, L., Alatorre-Mendieta, MA (2015); Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del

sur del Golfo de México y del Caribe noroeste., Bol. Soc. Geol. Mex., vol.67 no.1 Ciudad de México, abr. 2015.

Márquez-García, A.Z., Márquez-García, Bolongaro-Crevenna, A., Torres-Rodríguez, V., 2011, Cambio en la línea de costa en la Riviera Maya debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos: ¿Consecuencia del cambio global climático?, en Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J., Rojas-Galaviz J.L. (eds.), Vulnerabilidad de las Zonas Costeras Mexicanas ante el Cambio Climático (segunda edición): Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, 433–446

Merino-Ibarra, M., 1986, Aspectos de la circulación costera superficial del caribe mexicano con base en observaciones utilizando tarjetas de deriva: Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 13 (2), 31–46.

Márquez-García, A.Z., 2010, Procesos de erosión y depositación en el litoral sur del Golfo de México: México, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Doctoral, 187 p.

Recientemente el “Centro Ecológico Akumal” ha promovido proyectos de investigación en la zona, a fin de conocer los recursos naturales, monitoreo del área, y manejo sustentable de sus recursos naturales y su conservación. Además de la UNAM y la UAM otras instituciones extranjeras se involucraron en el estudio de la región.

Finalmente la SEMARNAT realizó una recopilación bibliográfica de la Península de Yucatán, así como, una evaluación sobre la erosión de la costa, manejo costero y otros estudios en la Península. (www.semarnat.gob.mx/yucatan)

1.2 Localización del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la provincia fisiográfica de la Península de Yucatán al sureste de la República Mexicana, en la porción septentrional de Mesoamérica en el estado de Quintana Roo. La Provincia constituye una llanura costera karstificada, que no sobrepasa los 25 metros de altitud, desarrollada principalmente en rocas calcáreas de edad terciaria hacia el interior de la Península, mientras que hacia la costa predominan las rocas calcáreas de edad cuaternaria, recubiertas en parte por depósitos recientes, principalmente arcillosos, correspondientes a ambientes pantanosos en las zonas bajas de lagunas y humedales circundantes, y por arenas en los sectores de playas y dunas (SNIB-CONABIO, 2006).

Las principales vías de acceso a las playas de la zona de estudio son: por vía aérea el Aeropuerto Internacional de Cancún, que es el principal acceso a la Riviera Maya. Es el segundo más importante de México, el más grande para pasajeros internacionales en Latinoamérica. Se encuentra a 50 km de la ciudad de Playa del Carmen, se cuenta también con el Aeropuerto Internacional de Cozumel que es el segundo acceso internacional por vía aérea, y próximamente se contará con el Aeropuerto Internacional de Tulum.

La carretera costera 307 que une las ciudades de Cancún y Tulum es la principal vía de comunicación terrestre y cruza toda la Riviera Maya.

El área de estudio comprende localidades como la ciudad de Playa del Carmen, y hacia el litoral sur se localizan la caleta de Paa-Mul, la bahía de Tankah, y las playas de Tulum, lo que representa aproximadamente unos 80 kilómetros de línea de costa.

La zona antes mencionada es conocida internacionalmente como la Riviera Maya en el Caribe Mexicano, y que comprende aproximadamente unos 115 kilómetros de línea de costa, y es uno de los destinos turísticos más importantes de México y de todo el Caribe (UAMI, 2003). (fig. 2)

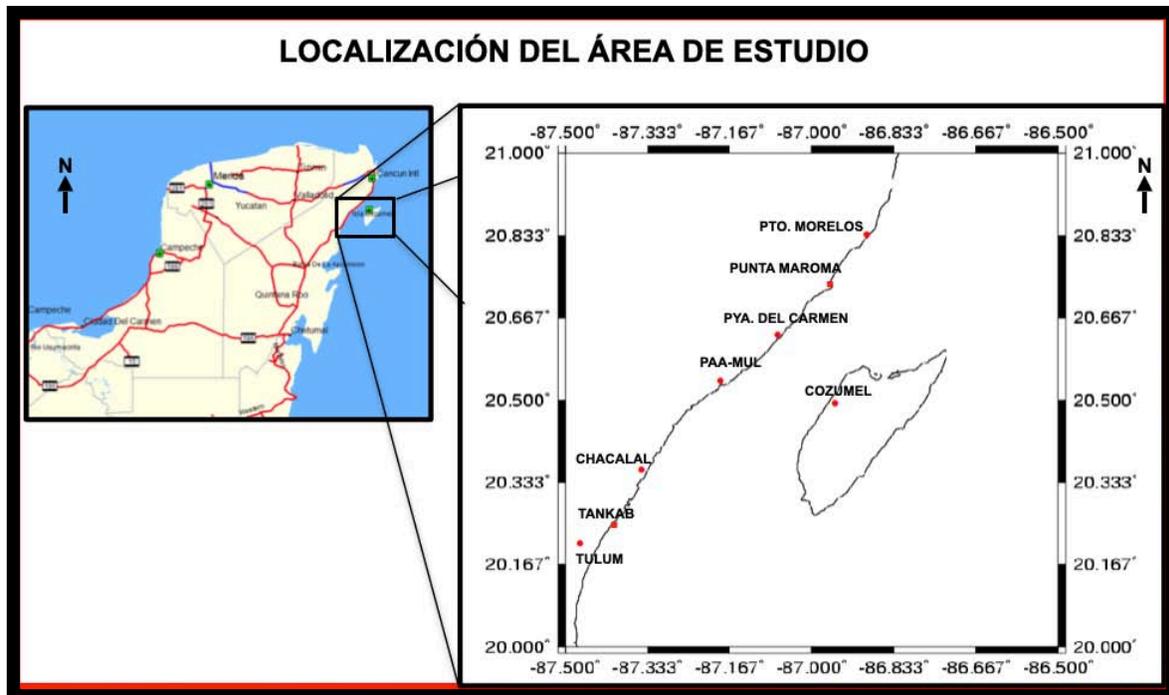


Figura 2. Mapa de localización del área de estudio que comprende el transecto de Punta Maroma hasta Tulum, Quintana Roo, México.

En relación con el área de estudio, ésta se ve afectada por fenómenos meteorológicos que se registran todos los años entre los meses de junio y noviembre (temporada de tormentas tropicales y de huracanes); ahí se asientan más de un millón de personas, las cuales en su mayoría están relacionadas con la industria del turismo (Cancún, Cozumel y la Riviera Maya). Además de que ésta región se caracteriza por su paisaje y por poseer playas de arena blanca y agua de color azul turquesa, selvas vírgenes, manglares, ruinas precolombinas, lujosos hoteles, pero también zonas pobres, marginadas y contaminadas.

1.3. Características geológicas

1.3.1 Fisiografía

La península de Yucatán es una estructura en forma de plataforma que consiste en un conjunto de rocas sedimentarias de espesores de 2,500 a 3,500 m, de acuerdo con López-Ramos (1979), las cuales descansan sobre un basamento Paleozoico. Limita con las montañas de Chiapas y se extiende al Golfo de México como una amplia plataforma continental, que prácticamente está ausente hacia el oriente, en el Mar Caribe. Es la provincia más joven de la República Mexicana y abarca los estados de Yucatán, Quintana Roo y la mayor parte del estado de Campeche (Raisz, E., 1964) (fig. 3).

En general, la topografía es llana con una altitud promedio menor a los 50 m.s.n.m, con elevaciones en la zona centro-sur de hasta 350 m. Es posible distinguir 2 tipos de relieve submarino en las márgenes del Golfo y el Caribe; por un lado, una gran plataforma continental, mientras que a pocos kilómetros de la costa profundidades de hasta 4000 m.

La morfología de la península de Yucatán consiste en tres unidades principales:

- 1) La planicie costera, una franja estrecha de depósitos marinos recientes y un litoral de acumulación;
- 2) La planicie interior de plataforma, en la porción septentrional, en estructura escalonada;
- 3) La porción meridional, predominantemente de lomeríos de 200-400 m.s.n.m. (Lugo-Hubp, J., 1990)

El relieve kárstico es una notable característica fisiográfica de la Provincia de la Península de Yucatán, tiene su origen en el ascenso gradual del agua subterránea; este proceso, ha tenido como resultado el desarrollo de dolinas que crean en su interior formaciones de lagos interiores denominados cenotes. Éstos se concentran en la parte norte, y se encuentran alineados entre las zonas de Tulum, Quintana Roo y Campeche y su presencia disminuye hacia el sur de la península.

La Península de Yucatán ha presentado en el pasado dos etapas de generación del karst: la primera en el periodo Paleógeno de la era Cenozóica, correspondiente a una superficie elevada con formas propias de clima tropical (conos kársticos); la segunda corresponde a la planicie, con alturas de 25 a 30 m.s.n.m., y las formas kársticas fueron originadas por un ascenso gradual de las aguas subterráneas de entre 20 a 100 m. de acuerdo con Gerstenhauer (1969).

Además, la Península de Yucatán tiene una gran plataforma sumergida limitada por escarpes hacia el Caribe. Se encuentra inclinada de norte a sur (Velázquez et al., 2007) y limitada sobre sus tres lados, por pendientes continentales escalonadas que se inclinan hacia

las profundidades abisales del Golfo de México, y en sus bordes se encuentran distribuidos sistemas de arrecifes de coral, con terrazas sumergidas relacionadas con antiguas líneas de costa.

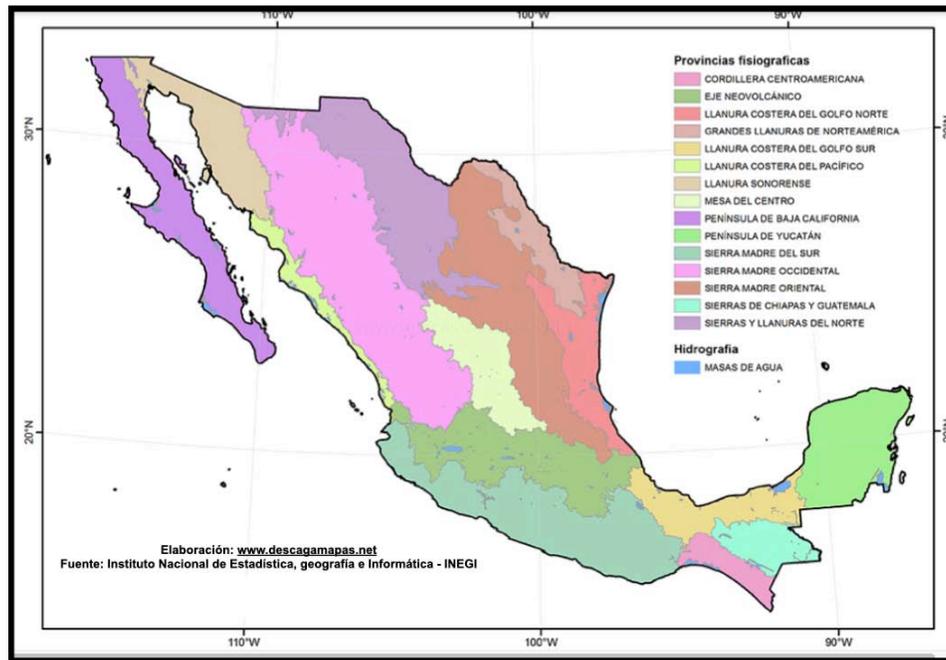


Figura 3. Mapa Regiones o Provincias Fisiográficas de México (inegi.org.mx)

En relación con la hidrografía y la circulación costera, cabe mencionar que de acuerdo con la geomorfología de la Península de Yucatán, en su superficie afloran rocas calcáreas constituidas principalmente por rocas de tipo caliza biogénica la que se acumuló durante la Era Cenozoica (Ward et al., 1985). Estas rocas presentan una alta permeabilidad y porosidad (Bauer-Gottwein et al., 2011), y el agua de la lluvia se filtra a través de la capa porosa hacia los sustratos rocosos subyacentes en el acuífero costero no confinado, donde ésta agua meteórica forma una masa de agua distinta (WM) que se posiciona en la parte superior de la intromisión marina (WM) de la costa, debido a la diferencia de densidades de las aguas meteóricas y marinas, éstas están separadas por una haloclina (o picnoclina) que es una zona de transición nítida entre los cuerpos de agua (Kambesis y Coke, 2013; Perry y otros, 2003).

Con respecto a la naturaleza del drenaje subterráneo, así como la escasa elevación de su geomorfología, la Península de Yucatán, no presenta una red fluvial definida, los cuerpos de agua superficial y las corrientes están ausentes o muy limitadas en la región (Metcalf et al., 2000), con excepción del Río Hondo (longitud aproximada de 180 Km, una profundidad media de 10 metros y una anchura media de 50 metros) que hace frontera con el país de Belice. Por esta razón la principal fuente de agua dulce para el consumo humano además del uso industrial y agrícola se obtiene del agua subterránea (Escolero et al., 2002).

Por otro lado, el conocimiento de los patrones de circulación costera en esta región del litoral mexicano cobra una gran importancia ya que existe una multitud de procesos y fenómenos que están íntimamente relacionados con estos patrones (Merino et al., 1980). Entre los más evidentes están la dispersión y distribución de las larvas plantónicas de organismos (Johnson y Brinton, 1963), que viven asociados a la barrera arrecifal.

Martín Merino Ibarra en 1984 publicó un estudio relacionado con la circulación costera superficial en el Caribe Mexicano, en dicho estudio presentó un esquema tentativo de la circulación superficial para la época de octubre de 1983, en el cual se resalta la influencia de la corriente de Yucatán y la existencia de pequeñas contracorrientes cerca de la costa, menciona que este efecto es muy probable hasta una distancia de 5 millas náuticas de la costa. Además, dentro de la zona costera la deriva será hacia el norte excepto ya muy cerca de la costa en que podrá ser hacia el sur y agrega que al norte de Cabo Catoche la deriva será hacia el oeste en dirección paralela a la costa. (Merino et al. 1984) (Fig. 4)

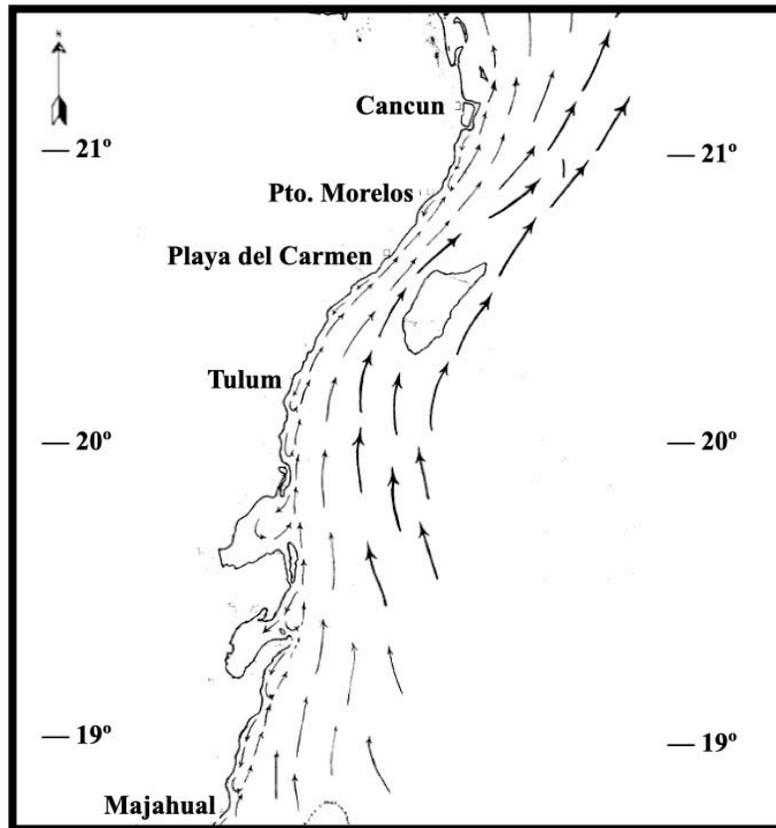


Figura 4, Esquema tentativo de la circulación superficial en el Caribe Mexicano para la época estudiada, Merino Ibarra M, 1984.

Los patrones de circulación costera en la región tienen una fuerte influencia sobre la distribución y estructura comunitaria de los constructores arrecifales, y por tanto sobre el desarrollo arrecifal mismo (Jordan et al., 1982), lo anterior influye de manera importante en la gran diversidad de especies asociadas. Otro fenómeno que se relaciona con la circulación costera es la dispersión de contaminantes en la región que evidencian las direcciones del transporte y distribución de los sedimentos a lo largo de la línea de costa. (fig. 5)

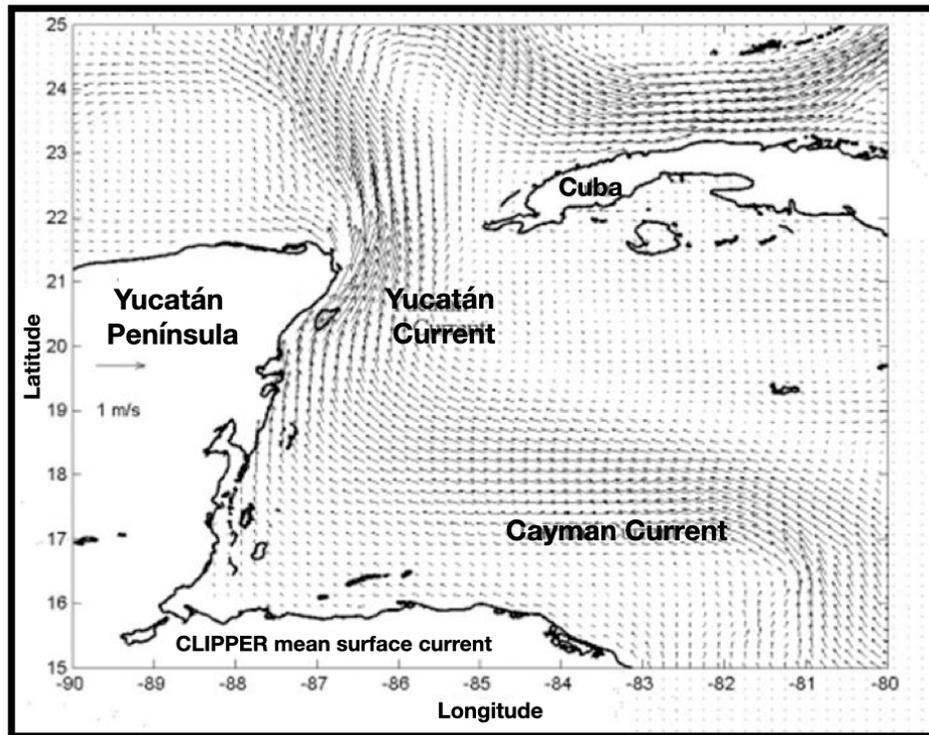


Figura 5. Circulación promedio a lo largo del Mar Caribe a partir de CLIPPER ATL6, “los vectores representan el promedio de 5 años”. (tomado de Habib Galindo, D.A., 2017)

1.3.2 Estratigrafía

El origen de la Península de Yucatán está relacionado con la evolución de una plataforma continental somera durante toda la era Cenozoica, en ella se realizó una sedimentación de materiales carbonatados lo que provocó la formación de rocas calizas de diferentes tipos, éstas representan espesores muy importantes que van de los 3,000 a 3,500 metros, en la figura 6, se encuentra representada la columna estratigráfica de toda la Península de Yucatán. No obstante, en el área de estudio que va de Punta Maroma en el norte y hasta el litoral de Tulum en el sur (110 Km aproximadamente), sólo se pudo constatar la presencia de areniscas calcáreas poco consolidadas, constituidas por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita de edad Plioceno-Holoceno las que cubren de manera concordante a calizas pertenecientes a la Formación Carrillo Puerto de edad Mioceno-Pleistoceno, y que son las unidades crono-estratigráficas que se describen a continuación.

C	Holoceno	Calizas con moluscos
E	Pleistoceno	Fm. Carrillo Puerto
N	Plioceno	
O		
Z	Mioceno	Fm. Bacalar
O	Oligoceno	Margas con intercalaciones de arcilla y caliza
I	Eoceno	Miembro Chumbec
C		Miembro Pisté
O		Miembro Xbacal
O	Paleoceno	Fm. Icaiché

Figura 6. Unidades estratigráficas de la Península de Yucatán (Habib Galindo, D.A., 2017).

Mioceno Superior-Plioceno

Formación Carrillo Puerto: Los niveles superficiales están representados por calizas blancas, duras y masivas; los intermedios por calizas arcillosas, duras, de color amarillento a rojizo y los inferiores por coquinas constituidas por materiales fosilíferos blandos de color blanco. Ésta formación es la unidad hidrogeológica más importante debido a su gran distribución y a la poca profundidad del agua subterránea.

Contenido fosilífero: Esta unidad contiene abundante contenido fosilífero; el cual está representado por gasterópodo, foraminíferos bentónicos así como Hexacorarios (cnidarios), moluscos, del género *Archaias* (Butterlin y Bonet, 1963) y ostrácodos (López-Ramos, 1972).

Espesor: En su descripción original, Butterlin (1958) únicamente menciona que puede alcanzar centenas de metros; mientras que personal de PEMEX (1988) consideran que varía entre 5 y 25 m.

Distribución geográfica: La unidad constituye toda la parte oriental y central del territorio de Quintana Roo, se extiende ampliamente en la región central del estado de Yucatán y al noroeste del estado de Campeche (Butterlin y Bonet, 1963)

Ambiente de depósito: Puede corresponder a un período de sedimentación bastante largo, en donde el mar debió de cubrir una gran parte de la península (Bonet y Butterlin, 1959); depositándose en un ambiente nerítico interno con influencia del nerítico medio (PEMEX, 1988), en un ambiente de plataforma somera.

La Formación Carrillo Puerto (TmplCz-Cq) es la unidad más antigua que aflora en el área de estudio (desde Punta Fátima hasta Playa Aventuras), la cual está constituida por una secuencia de rocas calizas tipo boundstone (coquina) de edad Mioceno–Plioceno.

Pleistoceno-Holoceno

Calizas de Moluscos. Son calizas coquiníferas masivas con tonalidades de blanco a crema. Su microfauna comprende sobre todo moluscos de aspecto moderno. Probablemente las calizas consolidadas pertenecen al Pleistoceno y las capas superiores más blandas y costeras pertenezcan al Reciente. Esta formación tiene una gran permeabilidad y porosidad debido a la presencia de fracturas y cavidades por disolución.

Depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada (Qpl(?)Ar), constituida por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita; ésta unidad se presenta en la parte centro-noroeste del área de estudio (desde Punta Fátima hasta el poblado de San José Maroma).

En las instalaciones de la empresa Calizas Industriales del Carmen (CALICA), se llevo a cabo la verificación de las anteriores unidades litológicas las cuales aparecen a continuación (fig. 7).

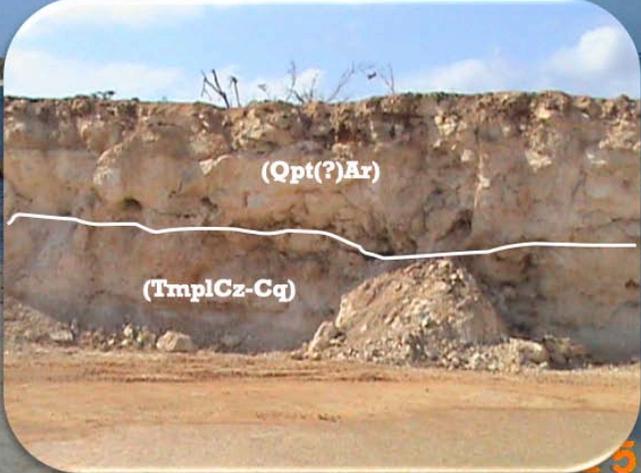
Sedimentología y Dinámica Costera del Caribe Mexicano

1) Verificación de las unidades litológicas, así como de su disposición en la columna estratigráfica en el área de estudio.

En las instalaciones de la empresa Calizas Industriales del Carmen (CALICA) se logró la verificación de las siguientes litologías:

(TmplCz-Cq), La Formación Carrillo Puerto es la unidad más antigua que aflora en el área de estudio, la cual está constituida por una secuencia de rocas calizas tipo boundstone (coquina) de edad Mioceno-Plioceno.

(Qpt(?)Ar), depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada, constituida por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita; ésta unidad se presenta en la parte centro-noroeste del área de estudio.



jjmedinaa@yahoo.com.mx

Figura 7. Verificación de las unidades litológicas que afloran en el área de estudio, Instalaciones de la empresa Calizas Industriales del Carmen. (CALICA) (SGM, F16-11 COZUMEL, 2006 e información obtenida en visita al sitio señalado)

Geología 1.3.3 y Tectónica

Desde el punto de vista geológico la Península Yucatán está constituida principalmente por sedimentos calcáreos marinos del la era Cenozoica, ésta representa una extensa planicie que forma parte de la provincia geográfica de la Llanura del Golfo y del Caribe, con características morfológicas y estructurales bastante uniformes.

La geología superficial de la Península de Yucatán se caracteriza por la carencia de suelos espesos, y los que existen, apenas alcanzan los 20 cm de espesor, la delgada capa de suelo cubre de manera casi horizontal a las rocas sedimentarias formadas por sedimentos calcáreos de origen marino que fueron depositados desde el inicio del periodo Cretácico Inferior y hasta el periodo Holoceno de la era Cenozoica. A partir de los 200 m. de profundidad, las rocas están conformadas por capas impermeables de margas y calizas cuyos espesores son de varios centenares de metros (Butterlin y Bonet. 1960: Bonet y Butterlin, 1962). como resultado de lo anterior, no existen cursos de aguas superficiales, entonces las lluvias saturan el terreno, lo que provoca la formación de estructuras de disolución como son: las grutas, las cavernas y los sumideros por los cuales circula el agua subterránea.

La región estuvo emergida desde el inicio de periodo Paleoceno, por lo que el basamento está constituido por una gruesa capa de sedimentos marinos del Paleozoico tardío el que subyace a una secuencia sedimentaria continental de edad Jurásica proveniente del Bloque de Yucatán y el Macizo Granítico de Chiapas. La cuenca marina en que se depositaron estos sedimentos ha sido relacionada con la falla transformante que dio origen a la apertura del Golfo de México (Tucker. 1985).

En la línea de costa afloran calizas recristalizadas con abundantes microfósiles de pelecípodos, así como una variedad de miliólidos (Fm. Carrillo Puerto de edad Mioceno-plioceno). Además, la unidad litológica presenta algunos horizontes calcáreo-arcillosos y margas de color blanco (coquinas, suelos residuales, arenas, arcillas y turbas), y se relaciona con las playas de tipo barrera y lagunas de inundación, así como una serie de bahías someras en las que se presenta el fenómeno de intrusión salina.

La península de Yucatán ha constituido un elemento tectónicamente estable durante buena parte de las eras Mesozoica y Cenozoica, y está relacionada con la apertura y formación del Golfo de México en el Jurásico Medio.

La evidencia en las rocas sedimentarias marinas terciarias, muestran un levantamiento gradual a partir del periodo Oligoceno. La zona de estudio ha estado sujeta a transgresiones y regresiones, uno de los más significativos se ubica al final del periodo Pleistoceno, donde el ascenso del nivel del mar transgredió aproximadamente los 130 m (Emery, 1977), cubriendo extensiones de tierras emergidas pertenecientes a la Florida y a Yucatán;

resultado de ello es la plataforma continental de aproximadamente 180 km localizada en la parte occidental de Yucatán.

Un evento importante en la evolución tectónica de la Península de Yucatán ocurre en el límite entre el período Cretácico y el período Paleógeno, cuando se ha postulado que en el área de Chicxulub, en la costa norte de Yucatán, ocurrió el impacto de una meteorita a la que se le considera responsable de la extinción de numerosas especies animales y vegetales, entre las que destacan los dinosaurios y las amonitas.

Principales estructuras geológicas

El paisaje kárstico es característico en el área de estudio, está conformado principalmente por abundantes estructuras de disolución como son los cenotes y las dolinas, éstas permiten la percolación e infiltración de las aguas meteóricas lo que facilita la disolución de la roca caliza, y que da lugar a la formación y desarrollo de sistemas de ríos subterráneos; los cenotes y las dolinas pueden quedar intercomunicados por procesos de colapso y de esa manera originar una estructura de mayor tamaño denominada una Uvala que cuando su fondo se tapiza de lodos y arcillas entonces puede formar una laguna conocida en la región Maya como un “peten”

Además, se encuentra una zona denominada anillo de cenotes de Chicxulub, los cuales presentan una alineación semicircular en la Península de Yucatán y que se relaciona con la existencia de un cráter de impacto de un gran meteorito a la cual se le adjudica la extinción masiva de casi el 65% de las especies de la vida en el planeta Tierra, y con ello el fin de la Era Mesozoica.

Esta provincia es famosa por el mito de no padecer de sismos, aunque la frecuencia es mucho menor comparada a otros lugares del país, en la siguiente imagen se pueden ver las fallas tectónicas y las estructuras plegadas que atestiguan la acción de la tectónica de placas en el pasado remoto. (fig. 8)

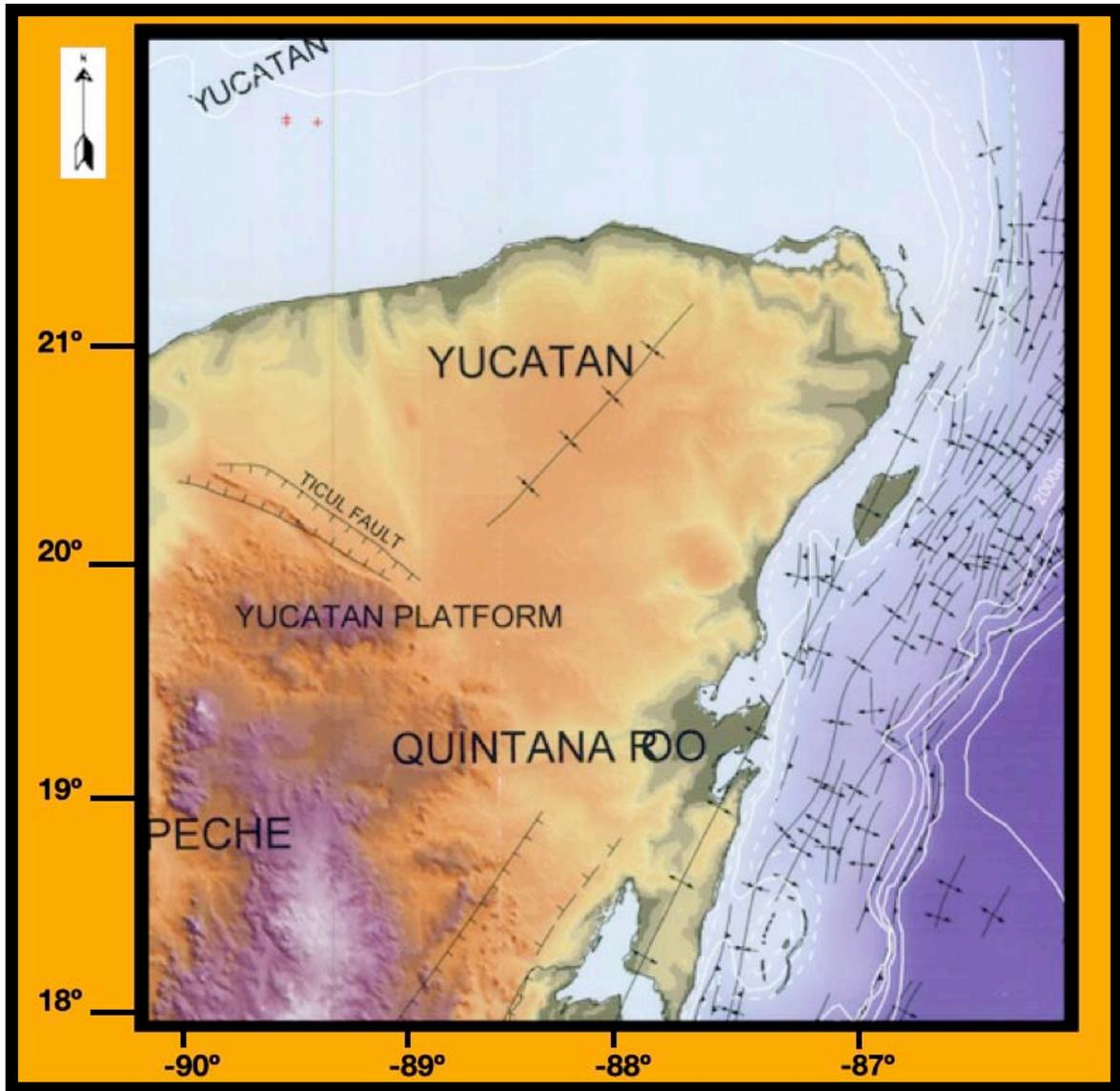


Figura 8. Imagen de satélite (escala 1:5,000,000) donde se observan las principales estructuras geológicas de la Península de Yucatán. (Tomado de CNP, 2001)

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Conocer la dinámica costera de la zona de estudio con base en el transporte de los sedimentos y el análisis de la morfología de la costa, con la finalidad de determinar zonas de erosión, de no depósito (equilibrio) y de depósito.

2.2 Objetivos específicos

1. Analizar las variaciones morfológicas de la línea de costa.
2. Determinar las áreas con procesos de erosión y de acumulación o depósito.
3. Conocer las características energéticas de los sedimentos que las constituyen.
4. Identificar las tendencias del transporte de los sedimentos.
5. Determinar la procedencia de los sedimentos.

3. Metodología

El trabajo en Playa del Carmen se desarrolló en playas públicas y privadas como son: el conjunto turístico de PLAYACAR (dos perfiles de playa) y la playa cercana al muelle Fiscal (un perfil de playa). Hacia el Suroeste de la ciudad de Playa del Carmen, a unos 25 Km de distancia se encuentra la desviación a la caleta de PAA - MUL (un perfil de playa). Aproximadamente a 3 Km de distancia hacia el Noreste de la ciudad de Tulum, se localiza la zona arqueológica de Tulum (3 perfiles de playa), y con el mismo rumbo, pero como a 5 Km de Tulum se encuentra la Bahía de TAN-KAB (5 perfiles de playa), todas las localidades pertenecen al municipio de Solidaridad, en el estado de Quintana Roo.

3.1 Descripción del trabajo

Con el propósito de obtener un mejor conocimiento de la dinámica costera del área de estudio (transecto comprendido entre Punta Maroma y Tulum), se programaron actividades relacionadas con el trabajo de gabinete (análisis: cartográficos, imágenes de satélite, orto-fotografías digitales, y de fotografías aéreas de diversas épocas a diferentes escalas de vuelo) y de laboratorio (análisis granulométricos con fines sedimentológicos, acompañados de estudios petrográficos). Asimismo, el trabajo de campo consistió en el levantamiento de 12 perfiles de playa de algunas localidades (playas, caletas y bahías) representativas del área de estudio. Además, se realizó la verificación de las litologías que afloran en la línea de costa, y que constituyen el basamento por debajo de los depósitos de arenas de las playas estudiadas.

3.2 Trabajo cartográfico (gabinete)

Las variaciones en la línea de costa están directamente relacionadas con los cambios en la morfología del área de estudio, éstos pueden ser estudiados y analizados mediante técnicas de percepción remota como son la foto-interpretación y la utilización de imágenes de satélite, fotografías aéreas, cartas topográficas, orto-fotografías de alta resolución. Todo el material cartográfico disponible se geo-referenció y digitalizó con la finalidad de analizar de manera digital los rasgos topográficos relacionados con el relieve y la geomorfología de la zona de estudio. Además, se utilizó un sistema de información geográfica (GPS - Arc View Gis versión 3.3) para el análisis de la dinámica y evolución morfológica de la costa. Lo anterior permitió contar con una cartografía actualizada la cual proveyó una mejor información con el propósito de ubicar los sitios relacionados con el trabajo de campo (perfiles de playa, comprobación de la litología, etc.) El análisis de la geomorfología costera mediante éstos estudios permitió contar con un mejor diagnóstico de como se encuentra actualmente la línea de costa en relación con el transporte de los sedimentos, en otras palabras, si existen zonas de depósito (acumulación), de no depósito (equilibrio) y de

erosión (críticas), lo anterior aportará información actualizada de como serán las tendencias en cuanto a la evolución morfológica del área de estudio en el futuro.

Durante esta etapa del proyecto, se adquirieron y analizaron los siguientes materiales relacionados con el trabajo de cartografía.

Cartografía temática:

INEGI, 2002, Carta topográfica F16-C79 AKUMAL Quintana Roo, escala 1:50,000, 2da. Edición.

INEGI, 2002, Carta topográfica F16-D71 COZUMEL Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 2002, Carta topográfica F16-D61 SAN JOSÉ Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 1986, Carta topográfica F16-C88 TULUM Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 2004, Carta topográfica F16-C78 XEL - HA Quintana Roo, escala 1:50,000, 2da. Edición.

INEGI, 2002, Carta topográfica F16-11 COZUMEL, Quintana Roo y Yucatán, escala 1:250,000, 2da. Edición.

INEGI, 1986, Carta topográfica F16-C69 PLAYA DEL CARMEN, Quintana Roo y Yucatán, escala 1:250,000, 2da. Edición.

INEGI, 2004, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C69C, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2004. (f16c69c_orto_r15_i92)

INEGI, 2004, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C69E, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2004. (f16c69e_orto_r15_i92)

INEGI, 2001, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C78F, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2001. (f16c78f_orto_r15_i92)

INEGI, 2004, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C69F, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2004. (f16c69f_orto_r15_i92)

INEGI, 2004, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C79A, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2004. (f16c79a_orto_r15_i92)

INEGI, 1988, Carta topográfica F16-D41 CANCUN, Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 1987, Carta topográfica F16-D51 PUERTO MORELOS, Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 1998, Carta Condensado Estatal QUINTANA ROO, escala 1:700,000, 1ra. Edición.

INEGI, 1998, Carta Condensado Estatal YUCATAN, escala 1:500,000, 1ra. Edición.

CONABIO, 2002, “MÉXICO, Imagen Desde el Espacio”, Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, Mosaico 2002 de imágenes Modis sin nubes del satélite Terra , bandas 1, 4, 3, (RGB), resolución espacial 250 metros, sobre un modelo digital del terreno.

SGM, 2006, Carta Geológico-Minera, F16-11 COZUMEL, Quintana Roo y Yucatán, Secretaría de Economía.

CNP, 2000, GULF OF MEXICO EXPLORATION MAP, Escala 1: 5,000,000

DETENAL, 1982, Fotos Aéreas de “PLAYA DEL CARMEN”, Quintana Roo (R-5 L-1 F-1 al 7) Mayo de 1982.

INEGI, 1991, V. E. COSTA PUERTO MORELOS - TULUM, Quintana Roo, (R-6 / 3 / 91) Escala 1:75,000 D.F. 151.96 MAR/91 L -1 No. 13 al 27 (14 fotos)

Con el material anterior se realizaron los estudios de percepción remota y tele-detección, y se obtuvo un mapa geológico a escala 1:50,000 (fig. 9) el cual permitió seleccionar los sitios para llevar a cabo el trabajo de campo, como por ejemplo la bahía de Tankah (fig. 10)

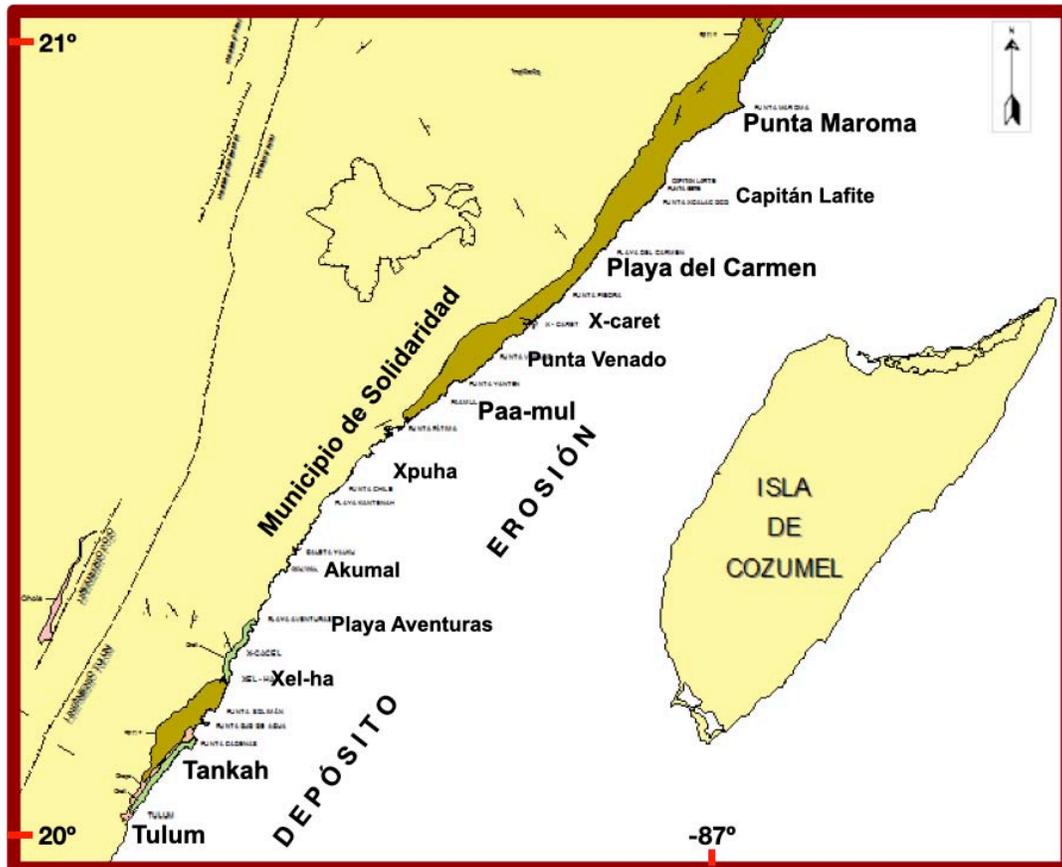


Figura 9. Mapa geológico del área de estudio con el cual se realizó el trabajo de campo.

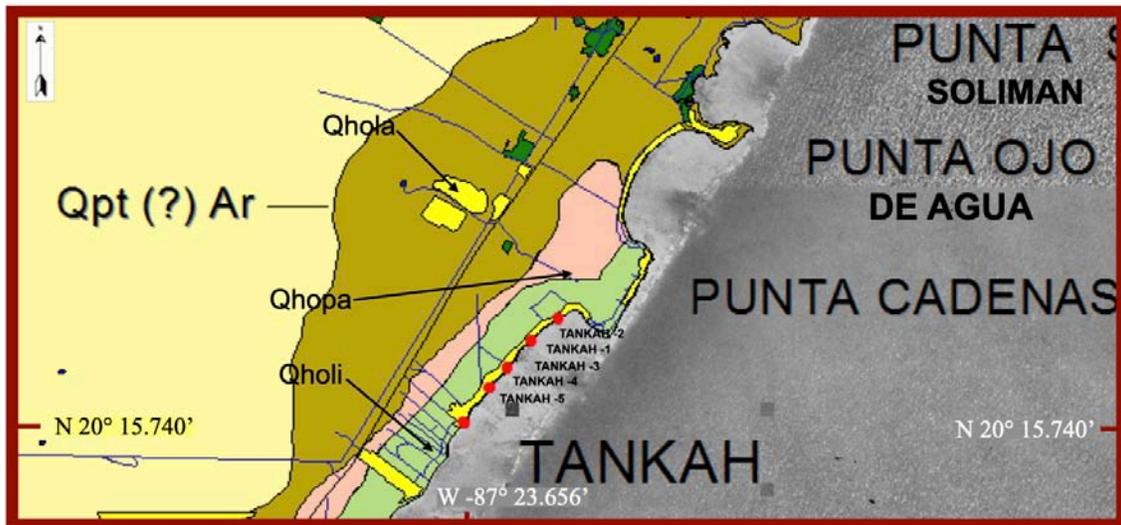


Figura 10. Bahía de TANKAH escala 1:50,000 de INEGI, en ella se ubican los sitios de trabajo de cinco perfiles de playa.

Para la realización del trabajo cartográfico y de gabinete relacionado con el análisis e interpretación del material antes mencionado se utilizó el siguiente equipo y software:

1. Estereoscopio de espejos marca WILD, modelo HEERBRUGG fabricado en Suiza, ST4-17710. (fig. 11)
2. Pocket stereo viewer, model PS2a, made in Taiwán.
3. Escaner de imágenes modelo CanoScan Pide-110, marca Canon
4. Lap top, marca Compaq Presario V2000
5. Software ArcView GIS, Versión 3.3 (fig. 12)
6. ENVI, versión 4.0, software para geo-refernciar imágenes digitales



Figura 11. El trabajo de gabinete relacionado con la utilización de fotografías aéreas (pares fotográficos) del área de estudio y la utilización de un estereoscopio de espejos marca Wild.

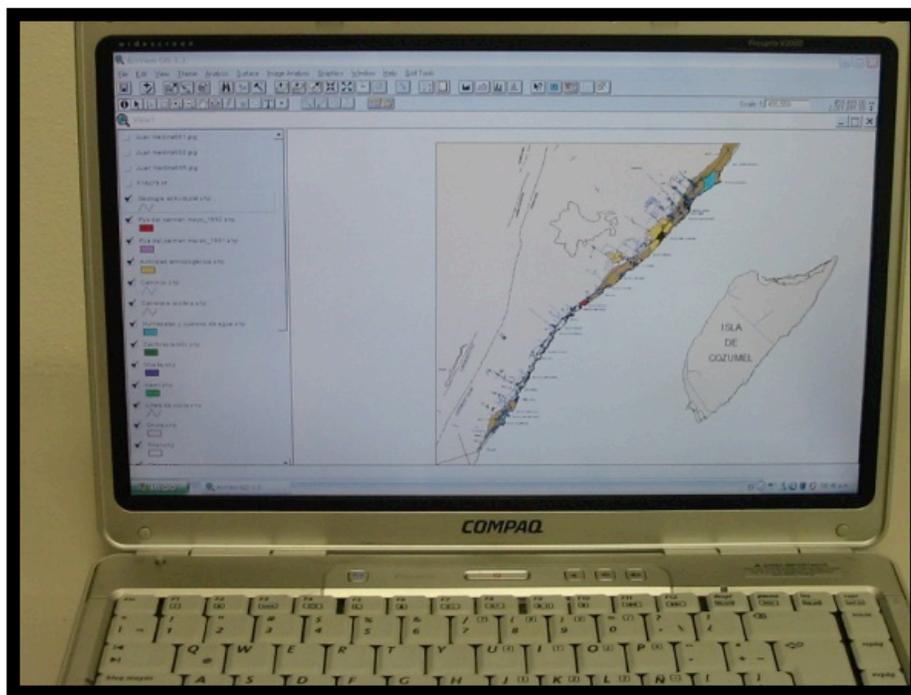


Figura 12. En esta imagen se observa la utilización del equipo de computo y del software Arc View Gis versión 3.3

3.3 Trabajo de campo

El trabajo de campo se llevo a cabo durante el periodo comprendido del 13 al 20 de diciembre del año 2007, y representa el final del periodo de lluvia y el inicio del periodo de sequía en la región de la península de Yucatán.

Se realizaron 36 muestreos de sedimentos relacionados con 12 perfiles de playa en las localidades de Playa del Carmen (conjunto Playacar), la caleta de Paamul, la Bahía de Tankah y las playas de la zona de Tulum, todas ellas en el municipio de Solidaridad, Quintana Roo.

Durante el proceso de la toma de las muestras, también se realizó un análisis de la textura y de la composición de los sedimentos, lo que permitió tener un conocimiento previo al trabajo de laboratorio con respecto a las características textuales relacionadas con el transporte de los sedimentos, los aspectos geomorfológicos y su relación con la dinámica costera en el área de estudio.

A partir del análisis de los pares fotográficos (foto-interpretación), así como el de las imágenes de satélite y del material digital (orto-fotos), se obtuvo un mapa geológico digital (fig. 9) con el cual se hizo la planificación del trabajo de campo, en dicho mapa se eligieron los sitios para el levantamiento de los perfiles de playa y de muestreo de sedimentos, así como también de la comprobación de las litologías relacionadas con el área de estudio.

El trabajo de levantamiento de los perfiles de playa se hizo de la siguiente manera, una vez que se pudo acceder a la línea de costa (playas públicas), se procedió a orientar el perfil mediante la utilización de una brújula Brunton, de tal manera que, éste quedara normal (perpendicular) a la línea de costa, y para la obtención del desnivel (método de nivelación, Montes de Oca, M. 2015) (fig. 13) del perfil de playa se utilizó un clisímetro marca Hope, la distancia entre puntos, se consiguió por medio de una cinta métrica de 30 m de longitud. Aunado a lo anterior, la georeferenciación de cada punto de muestreo se obtuvo con un receptor GPS Sistema Global de Posicionamiento, (Global Position System; GPS, por su nombre y siglas en inglés) marca GARMIN modelo Etrex Legend Gx. el cual provee un margen de error (precisión) de hasta 1 metro. (fig. 14)

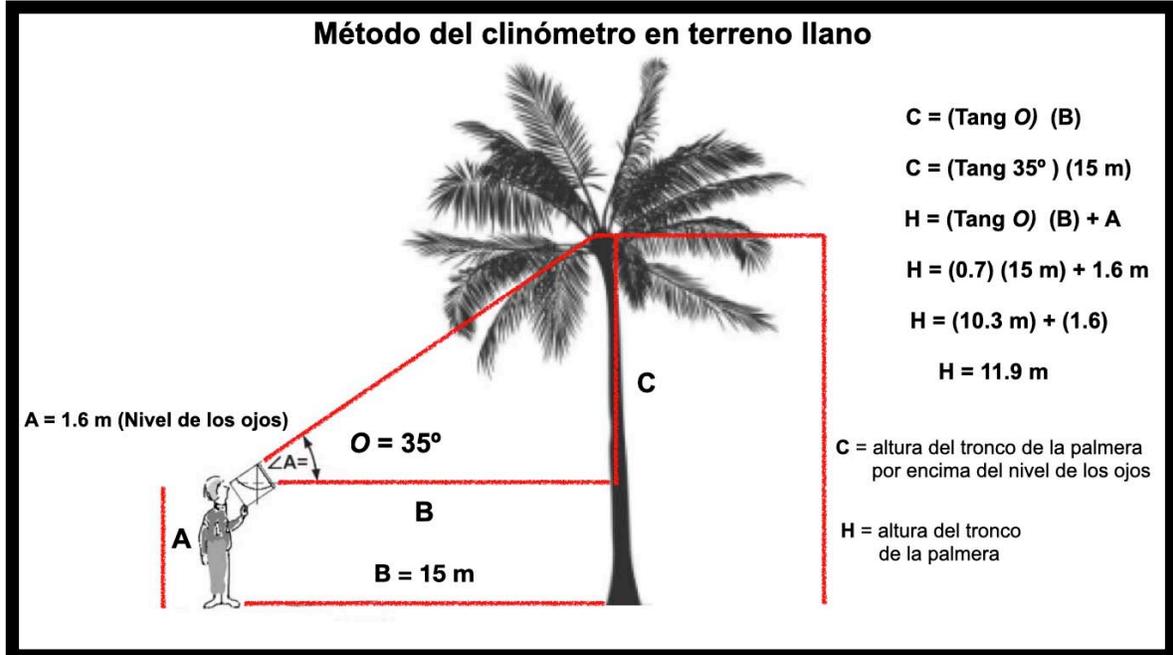


Figura 13. Se muestra de manera gráfica el método para la obtención del desnivel del perfil de playa.



Figura 14. En esta imagen se muestra parte del equipo utilizado en el levantamiento de los perfiles de playa del área de estudio.

En el presente trabajo se realizó el levantamiento de 12 perfiles de playa relacionados con algunos sitios importantes de la Riviera Maya como son: Bahía de Tankah, Caleta de Paamul, playas de Tulum y playas del conjunto Playacar en la ciudad de Playa del Carmen, Quintana -Roo, México. los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de las estaciones de playa y sus estaciones de muestreo.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
TANKAH - 1	1	I (Infralitoral)	N20° 15.993'	W -87° 23.409'
	2	M (Mesolitoral)	N20° 15.995'	W -87° 23.411'
	3	S (Supralitoral)	N20° 15.998'	W -87° 23.412'
TANKAH - 2	4	I	N20° 16.115'	W -87° 23.246'
	5	M	N20° 16.119'	W -87° 23.248'
	6	S	N20° 16.122'	W -87° 23.252'
TANKAH - 3	7	I	N20° 15.844'	W -87° 23.544'
	8	M	N20° 15.848'	W -87° 23.550'
	9	S	N20° 15.851'	W -87° 23.552'
TANKAH - 4	10	I	N20° 15.541'	W -87° 23.791'
	11	M	N20° 15.544'	W -87° 23.796'
	12	S	N20° 15.549'	W -87° 23.804'
TANKAH - 5	13	I	N20° 15.734'	W -87° 23.647'
	14	M	N20° 15.735'	W -87° 23.651'
	15	S	N20° 15.740'	W -87° 23.656'
PLAYA PARAISO - 1	16	I	N20° 12.104'	W -87° 25.972'
	17	M	N20° 12.116'	W -87° 25.983'
	18	S	N20° 12.115'	W -87° 25.992'
PLAYA PARAISO - 2	19	I	N20° 12.227'	W -87° 25.855'
	20	M	N20° 12.229'	W -87° 25.857'
	21	S	N20° 12.240'	W -87° 25.884'
PLAYA CAFETO	22	I	N20° 12.433'	W -87° 25.824'
	23	M	N20° 12.434'	W -87° 25.829'
	24	S	N20° 12.435'	W -87° 25.855'
REEF - 1	25	I	N20° 36.663'	W -87° 05.001'
	26	M	N20° 36.670'	W -87° 05.004'
	27	S	N20° 36.677'	W -87° 05.012'
REEF - 2 (ROCA)	28	I	N20° 36.828'	W -87° 04.784'
	29	M	N20° 36.841'	W -87° 04.784'
	30	S	N20° 36.839'	W -87° 04.793'
RUINAS - 1	31	I	N20° 37.095'	W -87° 04.645'
	32	M	N20° 37.098'	W -87° 04.648'
	33	S	N20° 37.101'	W -87° 04.652'
PAA - MUL	34	I	N20° 31.213'	W -87° 11.629'
	35	M	N20° 31.213'	W -87° 11.633'
	36	S	N20° 31.214'	W -87° 11.638'

Posteriormente, se determinaron las tres zonas en las que está constituida la playa como se menciona a continuación: la parte expuesta o sub-aérea (supraplaya), la zona de lavado o de rompiente (mesoplaya) y la zona sumergida o saturada con agua (infraplaya). para llevar a cabo en ellas la colecta de las muestras de sedimentos, a continuación en cada zona de la playa se realizó una excavación también denominada en el campo como una pequeña cala con las siguientes dimensiones: 30 x 30 cm por lado y 25 cm de profundidad, como acto seguido se procedió a raspar las paredes de la cala con la finalidad de formar un montículo al cual se le aplicó el método del cuarteo (fig. 15) (<http://www.unsj.edu.ar/2020/04/>) con el propósito de delimitar y reducir la muestra para que ésta sea considerada como aleatoria y representativa, a continuación se colectó en una bolsa de plástico de 5 x 7 cm por lado, y fue rotulada con una clave de identificación única (fig. 16) (para ser analizada en el laboratorio), después con el material sedimentario sobrante, se le realizó una caracterización preliminar de manera práctica in situ con la finalidad de contar con una idea más clara sobre la textura del sedimento, para tal fin se utilizó una “Mica Sedimentológica” (fig. 17) diseñada previamente para dicho propósito, además de una lupa 10X y 20X (X aumento), dichos datos fueron colectados en una libreta de campo, así como los datos de localización (coordenadas UTM).



Figura 15. En esta imagen se puede observar la aplicación del método del cuartil en un punto de muestreo del área de estudio.



Figura 16. En la presente imagen se presenta el trabajo de la colecta de la muestra y su respectivo rotulado con una clave de identificación única.

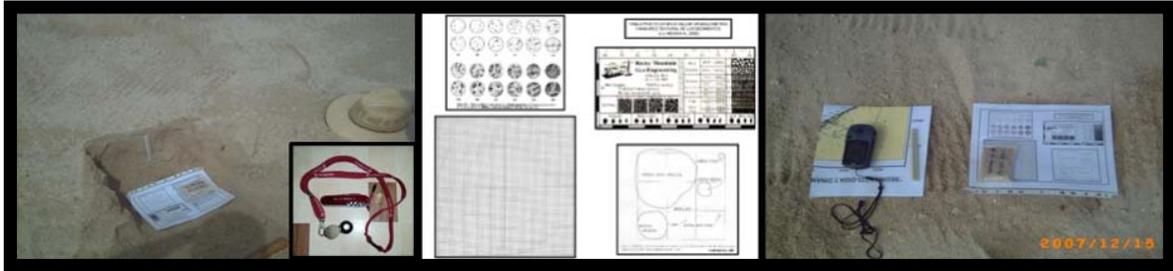


Figura 17. En la imagen se aprecian aspectos relacionados con la toma de sedimentos, la mica sedimentológica, y el mapa geológico base utilizado en el trabajo de campo.

Para la caracterización de las rocas calizas se utilizó la metodología de descripción de rocas en el campo (Apuntes de la Asignatura de Petrología, Medina-Avila, JJ. 2007) y del siguiente material: un martillo de geólogo (pica), una lupa 10x y 20X (aumentos), un gotero de ácido clorhídrico, una libreta de campo (fig. 18) y de las tablas de clasificación de rocas calizas según Dunham (1962) y Folk (1958)



Figura 18. En la imagen se observa el equipo de geología de campo que se utilizó para realizar la descripción de las muestras de roca en el campo.

Con relación en las litologías que afloran y están relacionadas con las formas geomorfológicas, tanto en el interior del continente (Instalaciones de Calizas Industriales del Carmen, CALICA) como en la zona litoral (sitios relacionados con los perfiles de playa), se pudo comprobar que en la zona de CALICA (cantera que explota las calizas de la Fm. Carrillo Puerto con fines económicos) se encuentra la Fm. Carrillo Puerto (TmplCz-Cq), que es la unidad más antigua que aflora en el área de estudio, la cual está constituida por una secuencia de rocas calizas tipo Boundstone (Coquina) de edad Mioceno, de la Era Cenozoica (fig. 19), la cual se encuentra cubierta por sedimentos (Qpt(?)Ar), y que se corresponde con depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada, constituida por fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita; (fig. 20) ésta unidad se encuentra distribuida en la zona litoral en algunas localidades como depósitos palustres y en otras como depósitos lacustres. (fig. 21)

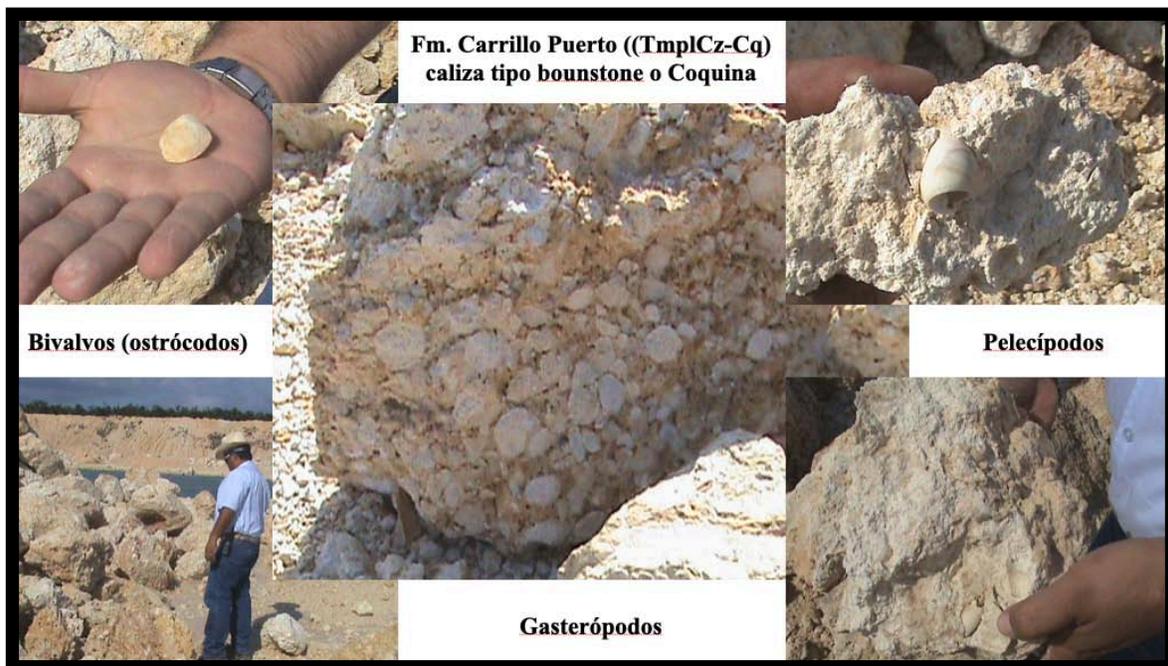


Figura 19. En esta imagen se observan algunas características de macro fósiles relacionados con la Fm. Carrillo Puerto en la cantera de CALICA. (visita al sitio señalado)



Figura 20. En esta imagen se observan algunas características de corales de la Fm. Carrillo Puerto y la presencia de estructuras de disolución en las calizas localizadas en la zona litoral propiedad de CALICA. (visita al sitio señalado)



Figura 21. Contactos litológicos de la Fm. Carrillo puerto (TmplCz-Cg) y los depósitos cuaternarios de arenisca poco consolidada (Qpt(?)Ar), dentro de las instalaciones de la empresa Calizas Industriales de Playa del Carmen (CALICA) (visita al sitio señalado)

En el proceso de obtención de material fotográfico y fílmico, en los cuales se hizo énfasis en resaltar las características geomorfológicas de los sitios visitados en el trabajo de campo, se utilizaron los siguientes equipos: una cámara de video marca SONY modelo Handycam DCR-DVD108, una cámara fotográfica y de video marca Digilife modelo DDW-C330, así como de una cámara fotográfica marca CANON modelo PowerShot A10. (fig. 22).



Figura 22. En esta imagen se muestra el equipo de fotografía y de video utilizado en la recopilación de material gráfico en el área de estudio.

3.4 Trabajo de laboratorio

Con las muestras colectadas en el trabajo de campo, se realizó un estudio granulométrico y de composición mineralógica y de procedencia con la finalidad de obtener la textura, y con el análisis de los parámetros estadísticos, poder conocer el ambiente energético en el cual se depositaron o acumularon los sedimentos (Márquez-García, A.Z. y Pérez-Aguilar, V, 2000). El estudio granulométrico se llevó a cabo como se indica a continuación:

1. Primero se secaron las muestras en un horno (mufla) marca FELISA durante un periodo de 8 horas.
2. Con las muestras perfectamente secas, fueron pesadas mediante una balanza digital de precisión (con un decimal) con la finalidad de obtener el peso total en estado seco
3. A continuación, se realizó el proceso de tamizado, que en el caso de las arenas, el análisis se realizó a cada 0.25 phi en un ROT-TAP durante un periodo de 10 minutos con el propósito de que no se dañarán las muestras. (Laboratorio de sedimentología, Facultad de Ingeniería, UNAM) (fig. 23)

Las muestras fueron separadas (0.25 phi) y pesadas, y con los datos obtenidos se realizó el cálculo estadístico para la obtención de los 4 parámetros granulométricos mediante la utilización de las fórmulas y escalas verbales de acuerdo con Folk (1973), y en Folk y Ward 1957. (Tamaño gráfico promedio, Desviación estándar gráfica inclusiva, Asimetría gráfica inclusiva y Curtosis) (fig. 24).



Figura 23, Es esta imagen se observa el equipo y los materiales utilizados en el Laboratorio de Sedimentología de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

FÓRMULAS Y ESCALAS VERBALES PARA FOLK Y WARD (1957)

TAMAÑO GRÁFICO PROMEDIO (Mz)

$$Mz = \frac{\phi 16 + \phi 50 + \phi 84}{3}$$

DESVIACIÓN ESTANDAR GRÁFICA INCLUSIVA ($\sigma 1$)

$$\sigma 1 = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} + \frac{\phi 95 - \phi 5}{6.6}$$

GRADO DE ASIMETRÍA GRÁFICA INCLUSIVA (Sk1)

$$Sk1 = \frac{\phi 16 + \phi 84 - 2\phi 50}{2(\phi 84 - \phi 16)} + \frac{\phi 5 + \phi 95 - 2\phi 50}{2(\phi 95 - \phi 5)}$$

CURTOSIS (KG)

$$KG = \frac{\phi 95 - \phi 5}{2.44 (\phi 75 - \phi 25)}$$

Figura 24, Fórmulas y escalas verbales para la realización de los cálculos de los cuatro parámetros granulométricos de acuerdo con Folk y Ward (1957)

Para la obtención de la textura de los sedimentos se tomó en cuenta a los parámetros granulométricos, éstos consideran características con tendencia central y son definidos de la siguiente manera: (Marquéz-García. AZ, 2006)

- a) El Tamaño Gráfico Promedio, considera el tamaño de grano promedio y se clasifica en arena muy fina, fina, media, gruesa y muy gruesa.
- b) La Desviación Estándar Gráfica Inclusiva que muestra el grado de clasificación de los diferentes tamaños de grano y se dividen en bien clasificada (tamaño de sedimentos homogéneo), moderadamente clasificada (con poca variación en el tamaño de grano) y mal clasificada (presencia de varios tamaños de arena).
- c) La Simetría Gráfica Inclusiva considera la predominancia del tamaño de los sedimentos definiendo sedimentos asimétricos hacia finos (con una mayor predominancia de tamaños finos), asimétrica hacia tamaños gruesos (predominancia de tamaños gruesos) y simétrica (sin preferencia de tamaños)
- d) La Curtosis indica la concentración de los sedimentos en ciertos tamaños, siendo los sedimentos leptocúrticos (predominan los tamaños en una clase de tamaño), mesocúrticos (los tamaños se presentan en 2 o 3 clases de tamaño) y platicúrticos (los tamaños se presentan en varios tamaños).

Para la descripción de los parámetros granulométricos y nomenclatura del sedimento se utilizó la siguiente tabla. (Habib Galindo,D.A., 2017) (Tabla 2)

Tabla 2, parámetros granulométricos

TABLA DE PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS	
<p>Tamaño gráfico promedio</p> <p>Arena muy gruesa: -1 phi a 0 phi (2 a 1 mm) Arena gruesa: 0 phi a 1 phi (1 a 0.5 mm) Arena media: 1 phi a 2 phi (0.5 a 0.25 mm) Arena fina: 2 phi a 3 phi (0.25 a 0.125 mm) Arena muy fina: 3 phi a 4 phi (0.125 a 0.625 mm) Limo grueso: 4 phi a 5 phi Limo medio: 5 phi a 6 phi Limo fino: 6 phi a 7 phi Limo muy fino: 7 phi a 8 phi Arcilla: > 8 phi</p>	<p>Desviación estándar gráfica inclusiva</p> <p>Muy bien clasificado: menor de 0.35 phi Bien clasificado: 0.35 phi a 0.50 phi Moderadamente bien clasificado: 0.50 phi a 0.71 phi Moderadamente clasificado: 0.71 phi a 1.00 phi Mal clasificado: 1.00 phi a 2.00 phi Muy mal clasificado: 2.00 phi a 4.00 phi Extremadamente mal clasificado: mayor de 4.00 phi</p>
<p>Grado de asimetría gráfica inclusiva</p> <p>Muy asimétrico hacia finos: +1.00 a +0.30 Asimétrico hacia finos: +0.30 a +0.10 Simétrico: +0.10 a -0.10 Asimétrico hacia gruesos: -0.10 a -0.30 Muy asimétrico hacia gruesos: -0.30 a -1.00</p>	<p><u>Curtosis</u></p> <p>Muy <u>platicúrtico</u>: menor de 0.67 <u>Platicúrtico</u>: 0.67 a 0.90 <u>Mesocúrtico</u>: 0.90 a 1.11 <u>Leptocúrtico</u>: 1.11 a 1.50 Muy leptocúrtico: 1.50 a 3.00 Extremadamente leptocúrtico: mayor de 3.00</p>

Para el análisis mineralógico y de procedencia se utilizó un microscopio petrográfico y otro estereoscópico con la finalidad de conocer la composición mineralógica y de contenido biológico de los sedimentos, estos estudios permitieron conocer las posibles fuentes de procedencia de los sedimentos los cuales resultaron contener materiales biogénicos, fragmentos líticos, calcita, etc. (fig. 25)



Figura 25. Las láminas delgadas utilizadas en los estudios petrográficos y el microscopio estereoscópico.

4. Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados de la presente investigación, los que consisten en la descripción y análisis de cada uno de los perfiles de playa (12 perfiles), de las zonas o áreas de la línea de costa en la que se obtuvieron (geomorfología), la nomenclatura granulométrica, la composición química y/o mineralógica, así como la tendencia relacionada con el transporte de los sedimentos, y para ello, se siguió el siguiente protocolo de análisis:

- a) **Desnivel topográfico del perfil de playa**
- b) **Nomenclatura granulométrica de los sedimentos**
- c) **Textura del sedimento**
- d) **Composición del sedimento**
- e) **Transporte de sedimentos y su relación con la morfología de la línea de costa.**

a) **Desnivel topográfico del perfil de playa**

En cuanto a el **desnivel topográfico (perfil de playa)**, éste considera la relación entre la longitud y la altura, lo que se traduce como la pendiente del terreno o el ángulo de inclinación del mismo. A lo largo del perfil de playa se ubican tres zonas las cuales están relacionadas con la energía y la dinámica que transporta a los sedimentos de un lugar a otro, en ellas se realizaron los muestreos que después se analizaron en el laboratorio.

Estas tres zonas son las siguientes: a) **Infralitoral**, la cual se ubica entre el límite inferior de la playa y la mesoplaya, y por lo general siempre está cubierta por agua marina b) **Mesolitoral**, ésta se localiza entre la infraplaya y la supraplaya, y se caracteriza por estar cubierta por agua y estar expuesta al aire de forma rítmica y alternada, en otras palabras, es el límite de vaivén producido por el máximo retroceso y el máximo avance del agua marina (lavado de los sedimentos) por los efectos de la marea (la marea baja y la marea alta). c) **Supralitoral**, ésta se encuentra localizada entre la mesoplaya y el límite superior de la playa, y que en condiciones normales se encuentra seca, por lo que la dinámica de los sedimentos está relacionada con los efectos del viento, no obstante, en algunos casos, ésta zona se ve afectada por eventos de tormenta combinados con mareas altas o tsunamis. En ella generalmente se encuentran bermas de tormentas. (Márquez-García, A.Z., 2001)

En la línea de costa las pendientes con baja inclinación por lo general se extienden con la misma tendencia hacia mar adentro y podrían implicar la acumulación de sedimentos, por lo contrario, las pendientes con alta inclinación se relacionan con extensiones cortas y con

tendencia con una baja acumulación de sedimentos y a la erosión de la playa. Por otra parte, se puede considerar que la pendiente de la playa está directamente relacionada con las geoformas de la línea de costa, lo que podría ser de gran apoyo en la determinación de zonas de erosión, de depósito o acumulación y de equilibrio sedimentológico.

b) Nomenclatura granulométrica de los sedimentos.

En relación con la **nomenclatura de los sedimentos**, ésta es el resultado del análisis de los parámetros granulométricos, y es una valiosa herramienta para la realización de análisis paleoambientales y geomorfológicos. Además, de que brindan una información muy útil acerca del comportamiento de los sedimentos y de la energía existente en el medio ambiente sedimentario y geomórfico.

En el presente trabajo se utilizaron los coeficientes estadísticos utilizados por Folk y Ward (1957) los cuales se mencionan a continuación. (Tablas 3 y 4)

El Tamaño Gráfico Promedio, considera el tamaño de grano promedio y se clasifica en arena muy fina, fina, media, gruesa y muy gruesa, es además, un buen indicador de la energía cinética media del agente de transporte e influye en los siguientes parámetros: la velocidad del agente de transporte, la forma, la gravedad específica, la composición y la resistencia de los sedimentos durante el transporte.

La desviación estándar gráfica inclusiva es la medida de dispersión más útil para clasificar arenas de acuerdo a los diferentes ambientes de depósito, e incluye parámetros como son: la velocidad del agente de transporte, el grado de turbulencia, las propiedades hidrodinámicas, la naturaleza de los sedimentos provistos al ambiente de depósito, y el índice de materiales detríticos o fragmentados (Mckinney y Friedman, 1970). Con respecto al grado de clasificación granulométrica, ésta es más baja cuando los intervalos de grados involucrados son más variados, y reflejan el tipo del medio conductor y la medida del grado de fluidez o viscosidad del agente de transporte.

El grado de asimetría gráfica inclusiva lo que permite es mostrar la distribución del sedimento, es simétrica o asimétrica con respecto a la moda y la media. Las distribuciones con asimetría positiva poseen una acumulación de *materiales finos*, mientras que las de asimetría negativa tienden a una acumulación de *materiales gruesos*.

La curtosis es una medida comparativa entre la selección en el centro de la distribución y en los extremos. La gráfica de curtosis es una forma de comparar cualitativamente a los sedimentos ya clasificados, con alta energía, con el posterior transporte y la modificación por otro tipo de ambiente (Folk y Ward, 1957).

Tablas 3. Parámetros granulométricos de las muestras de sedimentos Playa del Carmen - Tulum.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	PARÁMETROS TEXTURALES DE SEDIMENTOS			
			TAMAÑO (Phi)	DESVIACIÓN (Phi)	SIMETRÍA	CURTOSIS
TANKAH - 1	1	I (Infralitoral)	-1.00	0.76	0.09	1.13
	2	M (Mesolitoral)	1.01	0.66	-0.18	1.25
	3	S (Supralitoral)	0.59	0.82	-0.21	1.46
TANKAH - 2	4	I	1.58	0.65	-0.08	0.97
	5	M	0.33	0.92	-0.04	0.93
	6	S	0.54	0.75	-0.13	1.19
TANKAH - 3	7	I	0.97	1.06	-0.43	1.29
	8	M	0.79	0.68	-0.10	1.22
	9	S	1.02	0.58	0.06	1.25
TANKAH - 4	10	I	1.05	0.94	0.36	0.92
	11	M	0.19	1.06	-0.18	0.98
	12	S	0.91	0.70	0.24	1.21
TANKAH - 5	13	I	1.45	0.57	-0.04	1.04
	14	M	1.00	0.62	-0.10	1.15
	15	S	0.94	0.57	-0.12	1.24
PLAYA PARAÍSO - 1	16	I	2.57	0.46	-0.25	1.22
	17	M	2.26	0.61	-0.30	0.98
	18	S	1.92	0.91	-0.26	0.75
PLAYA PARAÍSO - 2	19	I	2.47	0.53	-0.19	1.08
	20	M	2.31	0.60	-0.09	0.83
	21	S	1.85	0.94	-0.18	1.07
PLAYA CAFETO	22	I	2.51	0.55	-0.32	1.13
	23	M	2.48	0.44	-0.17	1.10
	24	S	2.50	0.60	-0.27	0.70
REEF - 1	25	I	2.37	0.51	-0.28	1.05
	26	M	2.02	0.50	-0.13	0.93
	27	S	1.54	0.56	0.07	1.06
REEF - 2 (ROCA)	28	I	1.98	0.71	-0.01	1.04
	29	M	1.97	0.52	0.07	0.95
	30	S	1.96	0.49	0.12	1.16
RUINAS - 1	31	I	1.41	0.70	-0.01	1.08
	32	M	1.58	0.56	0.10	0.89
	33	S	1.92	0.59	-0.01	0.95
PAA - MUL	34	I	0.15	0.55	-0.21	1.20
	35	M	0.19	1.09	-0.41	1.24
	36	S	-0.48	0.57	0.36	1.41

Tablas 4. Nomenclatura de los sedimentos de Playa del Carmen a Tulum.

Perfil de playa	No. de Estación	Zona de playa	NOMENCLATURA DEL SEDIMENTO			
TANKAH - 1	1	I (Infralitoral)	Arena muy gruesa	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	2	M (Mesolitoral)	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	3	S (Supralitoral)	Arena gruesa	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
TANKAH - 2	4	I	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	5	M	Arena gruesa	Moderadamente clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	6	S	Arena gruesa	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
TANKAH - 3	7	I	Arena gruesa	Mal clasificada	Muy asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	8	M	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Leptocúrtico
	9	S	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Leptocúrtico
TANKAH - 4	10	I	Arena media	Moderadamente clasificado	Muy asimétrico hacia finos	Mesocúrtico
	11	M	Arena gruesa	Mal clasificada	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	12	S	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia finos	Leptocúrtico
TANKAH - 5	13	I	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	14	M	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Leptocúrtico
	15	S	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
PLAYA PARAÍSO - 1	16	I	Arena fina	Bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	17	M	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	18	S	Arena media	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Platicúrtico
PLAYA PARAÍSO - 2	19	I	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	20	M	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia finas	Platicúrtico
	21	S	Arena media	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
PLAYA CAFETO	22	I	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Muy asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	23	M	Arena fina	Bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	24	S	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Platicúrtico
REEF - 1	25	I	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	26	M	Arena fina	Bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	27	S	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico

Perfil de playa	No. de Estación	Zona de playa	NOMENCLATURA DEL SEDIMENTO			
REEF - 2 (ROCA)	28	I	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	29	M	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	30	S	Arena media	Bien clasificado	Asimétrico hacia finos	Leptocúrtico
RUINAS - 1	31	I	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	32	M	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Platicúrtico
	33	S	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
PAA - MUL	34	I	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Muy asimétrico hacia gruesos	Muy leptocúrtico
	35	M	Arena gruesa	Mal clasificada	Muy asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	36	S	Arena muy gruesa	Moderadamente bien clasificado	Muy asimétrico hacia finos	Leptocúrtico

c) Textura del sedimento

Con respecto a **la textura de los sedimentos**, es importante mencionar que las arenas son los principales elementos texturales que se encuentran en los actuales medios ambientes sedimentarios relacionados con la zona litoral de la Riviera Maya.

d) Composición del sedimento

En cuanto a la composición de los sedimentos, éstos están constituidos por materiales carbonatados de origen biogénico como son los fragmentos de: moluscos, corales, esponjas, equinodermos, espículas, algas, la presencia de foraminíferos, etc., los cuales provienen y/o son producidos en las lagunas costeras y en los cuerpos arrecifales de tipo barrera (fuente de proveniencia) que se desarrollan a lo largo de la línea de costa en la Riviera Maya, y que regionalmente están relacionados con el sistema de arrecifes de tipo barrera denominado “Arrecife Mesoamericano” (<https://www.wwfca.org>). Por otra parte, con base en los estudios granulométricos y petrográficos y a los de nomenclatura sedimentológica las arenas producidas en el área de estudio corresponden a biocalcarenitas (arenas calcáreas con alto contenido biogénico) (fig. 26)



Figura 26, La imagen es una microfotografía (20X) en donde se observa una muestra de la Bahía de Tankah la cual se clasifica como una biocalcarenita (Arena calcárea con alto contenido de material biogénico).

e) Transporte de sedimentos y su relación con la morfología de la línea de costa.

En relación con el **transporte de sedimentos y su relación con la morfología de la línea de costa**, es importante hacer la siguiente observación; con base en los análisis de los parámetros granulométricos y en las características sedimentológicas, se dice que las zonas de mayor dinámica costera se asocian con depósitos de arenas medias y gruesas, mientras que, las zonas de menor dinámica se asocian con depósitos de arenas finas (Márquez-García *et al.* 2011). Al respecto, la zona de estudio está relacionada con un ambiente sedimentario transicional marino (ambiente litoral-costero), el cual presenta zonas con amplias variaciones dinámicas, y que son el resultado de la íntima interacción de los fenómenos meteorológicos como son: la marea, las precipitaciones pluviales, los patrones de vientos y la acción antrópica que afectan de manera importante la morfología de la costa en la Riviera Maya.

De acuerdo con Fernández-Eguiarte *et al.* (1992a y 1992b), las masas de agua que se mueven en el Mar Caribe lo hacen de forma dominante hacia el norte, y según Merino-Ibarra (1986), menciona que mediante el uso de las tarjetas de deriva, se encontró que, además de la Corriente de Yucatán que va hacia el norte, se presentan contracorrientes hacia el sur sobre todo en las partes donde el litoral es menos rectilíneo y presenta salientes.

Al respecto, los sedimentos detríticos o fragmentados de origen biológico que son producidos en la zona de estudio, así como los relacionados con la erosión de las rocas calcáreas que afloran en la línea de costa, por lo general son transportados por las corrientes litorales, además, producen en éstos cambios en la forma y en la disminución de tamaño, lo anterior debido a la acción del oleaje. Las corrientes litorales suelen moverse de norte a sur, sobre todo en las zonas que presentan salientes o puntas, en donde las formas cóncavas de las bahías, ensenadas y caletas presentan formas de costas lineales y dentadas, en dichas formas, se presenta una distribución graduada de los tamaños de los sedimentos, hacia el norte de éstas, se localizan depósitos de arenas de medianas a gruesas (mayor dinámica), y hacia la parte sur se ubican depósitos de arenas finas a muy finas (menor dinámica), por lo que el transporte de los sedimentos a lo largo de la línea de costa suele ser también de norte a sur.

4.1.1 Playacar

A continuación se presentan los resultados de los perfiles de playa (desnivel topográfico) en los que se relacionan aspectos importantes como son:

- a) Anchura de la playa
- b) Altura de la playa (desnivel)
- c) Pendiente (ángulo de inclinación)
- d) Observaciones generales con relación a la línea de costa y
- e) Diagnóstico con respecto a los niveles de erosión, de depósito o acumulación y al equilibrio sedimentológico.

a) Desnivel topográfico del perfil de playa

Playas de la zona de Playacar en la costa de Playa del Carmen, municipio de Solidaridad, estado de Quintana Roo. En esta zona se trabajaron 3 perfiles de playa, uno de ellos dentro del complejo turístico de PLAYACAR (REEF-1) y dos más ubicados hacia el límite norte de éste complejo y en donde empieza la zona turística abierta al público (REEF-2 y RUINAS-1). Asimismo, se realizó un caminamiento en las playas de los frentes de algunos hoteles de la cadena hotelera RIU e IBEROSTAR (fig. 27), con la finalidad de constatar el estado que guardan sus playas con respecto a los niveles de erosión en el litoral-marino como el que prevalece en la zona.



Figura 27. Vista aérea del área en donde se ubica el conjunto turístico de PLAYACAR, en el sitio se observa bien delimitada la línea de costa y la ubicación de algunas estructuras arrecifales, también se localizan los sitios de los perfiles de playa REEF-1, REEF-2 (ROCA) y RUINAS-1.

Tabla 5. Datos de localización del perfil de playa REEF-1.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
REEF - 1	25	I	N20° 36.663'	W -87° 05.001'
	26	M	N20° 36.670'	W -87° 05.004'
	27	S	N20° 36.677'	W -87° 05.012'



Figura 28. Vista aérea del área de la ubicación del perfil de playa REEF-1 (I-M-S).

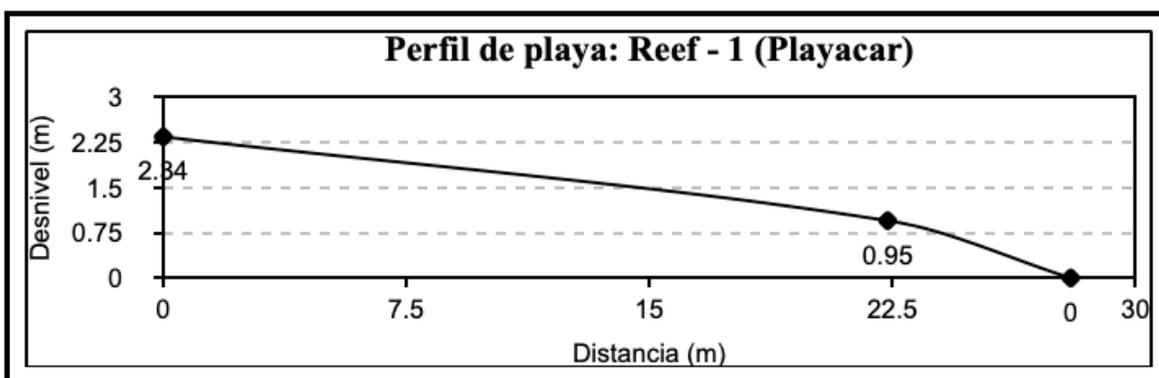


Figura 29. Perfil de playa REEF-1 (I-M-S).

Tabla 6. Descripción general del perfil de playa REEF-1.

Nombre del perfil: REEF -1	
Clave o ID de referencia:	REEF-1 (I-M-S)
Localización:	Se localiza en el club de playa del hotel Reef Sands (N20° 36.677' y W87° 05.012')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 35°
Anchura:	28.0 metros
Altura:	2.34 metros
Pendiente:	4.78° (Tan ⁻¹ de 0.08357)
Relación con respecto a la línea de costa:	En el lugar se pueden apreciar la presencia de diques y rompeolas de forma tubular (geotubos) que son contenedores fabricados con materiales textiles de suelo encapsulado que pueden reemplazar a la roca como material convencional en estructuras de ingeniería marina e hidráulica, y que bordean y protegen a las playa de los hoteles de la erosión producida por el oleaje.
Diagnóstico	Erosión



Figura 30. Imágenes del sitio de donde se levanto el perfil de playa REFF-1 y las condiciones en que se encuentran los sitios localizados al lado de él.

Tabla 7. Datos de localización del perfil de playa REEF-2 (ROCA).

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
REEF - 2 (ROCA)	28	I	N20° 36.828'	W -87° 04.784'
	29	M	N20° 36.841'	W -87° 04.784'
	30	S	N20° 36.839'	W -87° 04.793'

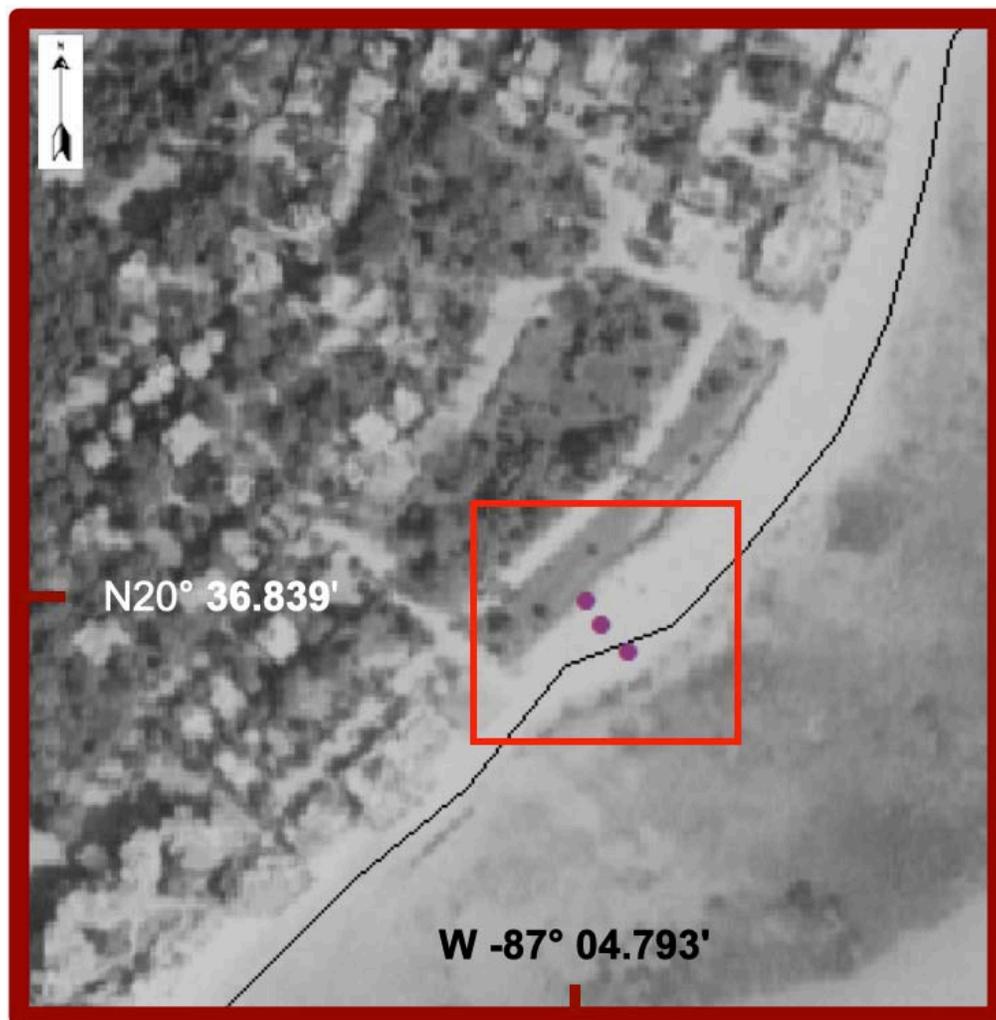


Figura 31. Vista aérea del área en donde se ubica el perfil de playa REEF-2 (ROCA) (I-M-S).

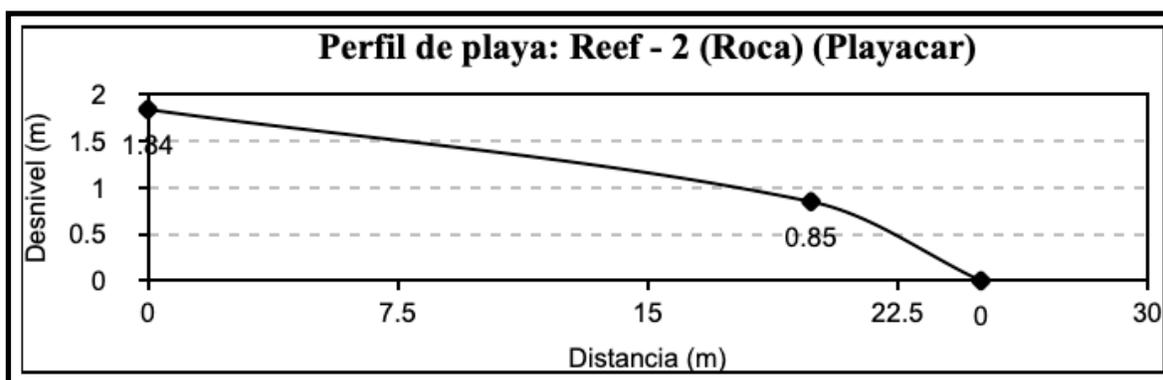


Figura 32. Perfil de playa REEF-2 (ROCA) (I-M-S).

Tabla 8. Descripción general del perfil de playa REEF-2 (ROCA).

Nombre del perfil: REEF-2 (ROCA)	
Clave o ID de referencia:	REEF-2 (ROCA) (I-M-S)
Localización:	Se localiza en el límite del conjunto Playacar y la zona abierta al público (N20° 36.839' y W87° 04.793')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 38°
Anchura:	25.0 metros
Altura:	1.84 metros
Pendiente:	4.2° (Tan ⁻¹ de 0.0736)
Relación con respecto a la línea de costa:	En el lugar se puede apreciar el límite de la arena depositada en la zona de la mesoplaya y la roca caliza que aflora en la zona de la infraplaya, así como geotubos y costales de arena que son estructuras para contener la erosión relacionada con la dinámica de la costa (oleaje, viento, marea, etc.).
Diagnóstico	Erosión



Figura 33. La fotografía del lado derecho muestra el sitio donde se realizó el perfil de playa REFF-2, y en la foto del lado derecho se muestran estructuras en forma de geotubos para detener la erosión de la playa.

Tabla 9. Datos de localización del perfil de playa RUINAS-1.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
RUINAS - 1	31	I	N20° 37.095'	W -87° 04.645'
	32	M	N20° 37.098'	W -87° 04.648'
	33	S	N20° 37.101'	W -87° 04.652'

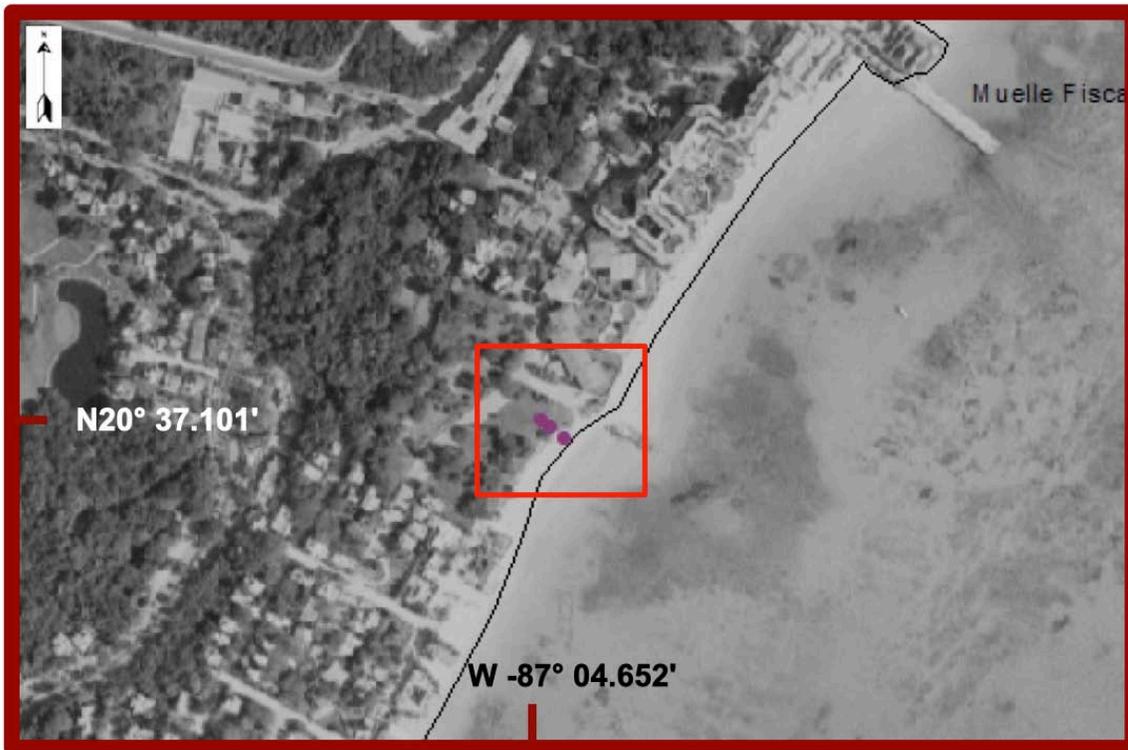


Figura 34. Vista aérea del área en donde se ubica el perfil de playa RUINAS-1 (I-M-S).

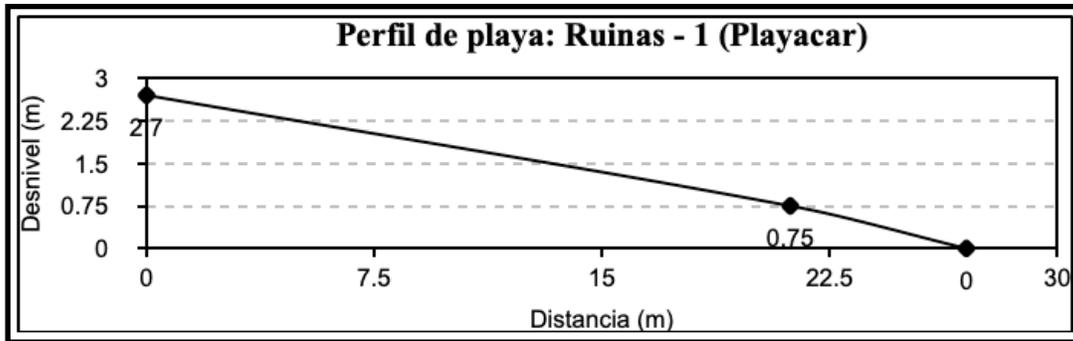


Figura 35. Perfil de playa RUINAS -1 (I-M-S).

Tabla 10. Descripción general del perfil de playa RUINAS -1 (I-M-S).

Nombre del perfil: RUINAS-1	
Clave o ID de referencia:	RUINAS-1 (I-M-S)
Localización:	Se localiza en el club de playa del hotel Reef Sands (N20° 37.101' y W87° 04.652')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 73°
Anchura:	27.0 metros
Altura:	2.70 metros
Pendiente:	5.7° (Tan ⁻¹ de 0.1)
Relación con respecto a la línea de costa:	En el lugar se observan construcciones habitacionales privadas las cuales son golpeadas por la fuerza del oleaje del mar Caribe, así como también, se aprecian afloramientos de la roca caliza lo que evidencia el avance y la acción de los procesos de erosión.
Diagnóstico	Erosión



Figura 36. Fotografía del sitio donde se levanto el perfil de playa RUINAS-1, y en la que se observa el impacto del oleaje en contra de la estructura de una construcción, lo que es indicativo de la acción de la erosión en el lugar.

Discusión

Las playas estudiadas en el área de Playa del Carmen presentan en general ángulos de alrededor de los 5° de inclinación y una anchura promedio de 25 metros, que son pendientes y anchuras de playas relacionadas con procesos de acortamiento por la acción de procesos relacionados con la erosión. Además, en ellas se observan afloramientos de rocas calizas (Fm. Carrillo Puerto) y la implementación de estructuras antropogénicas con el propósito de disminuir la erosión de la línea de costa como son: los geotubos, los sacos rellenos de arena, diques, etc.), asimismo, se observa la acción del oleaje impactándose en estructuras construidas por el hombre.

Es importante mencionar que, los geotubos que inicialmente fueron instalados con la finalidad de proteger a las playas en la línea de costa de los procesos de erosión, éstos fueron colocados sin tomar en cuenta la dirección del transporte de los sedimentos que realiza la corriente litoral de manera local (dirección norte hacia el sur), y los geotubos fueron instalados de manera paralela a la línea de costa y no con un ángulo oblicuo a ella, lo que provoca que la corriente litoral erosione con mayor intensidad a las playas de la zona.

b) Nomenclatura granulométrica de los sedimentos.

A continuación se presentan los resultados de los análisis granulométricos de las muestras colectadas en los sitios de muestreo de cada uno de los perfiles de playa (estaciones de muestreo) de los sitios localizados en la zona de Playa del Carmen, Quintana Roo. éstos contienen la siguiente información:

- a) Parámetros granulométricos
- b) Tamaño grafico promedio Mz (ϕ)
- c) Desviación gráfica inclusiva (ϕ)
- d) Grado de asimetría gráfica inclusiva
- e) Curtosis
- f) Nomenclatura del sedimento

Zona de PLAYACAR (Playa del Carmen)

Perfiles de playa: REEF -1, REEF -2 (ROCA) y RUINAS -1.

Tabla 11. Parámetros granulométricos (Playacar, Ciudad del Carmen).

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	PARÁMETROS TEXTURALES DE SEDIMENTOS			
			TAMAÑO (ϕ)	DESVIACIÓN (ϕ)	SIMETRÍA	CURTOSIS
REEF - 1	25	I	2.37	0.51	-0.28	1.05
	26	M	2.02	0.50	-0.13	0.93
	27	S	1.54	0.56	0.07	1.06
REEF - 2 (ROCA)	28	I	1.98	0.71	-0.01	1.04
	29	M	1.97	0.52	0.07	0.95
	30	S	1.96	0.49	0.12	1.16
RUINAS - 1	31	I	1.41	0.70	-0.01	1.08
	32	M	1.58	0.56	0.10	0.89
	33	S	1.92	0.59	-0.01	0.95

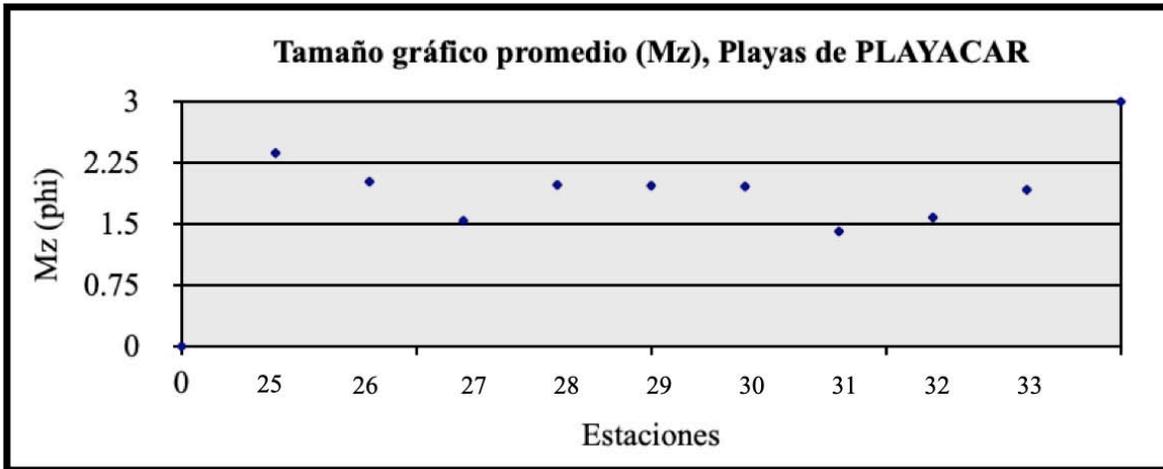


Figura 37. Tamaño gráfico promedio Mz (phi)

En la figura se observa que los sedimentos son principalmente arenas medias.

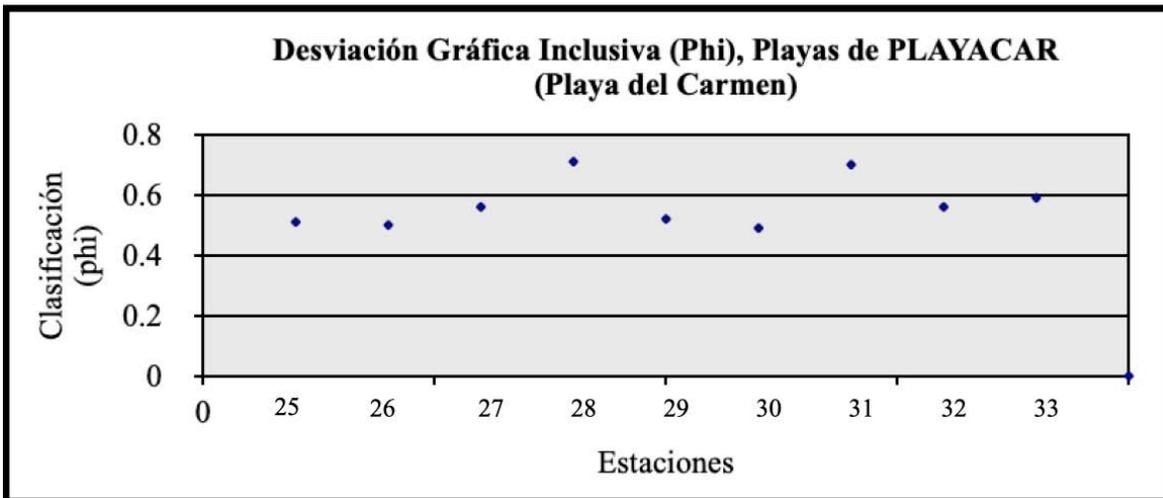


Figura 38. Desviación gráfica inclusiva (phi)

Las arenas medias varían de moderadamente bien clasificadas a moderadamente clasificadas.

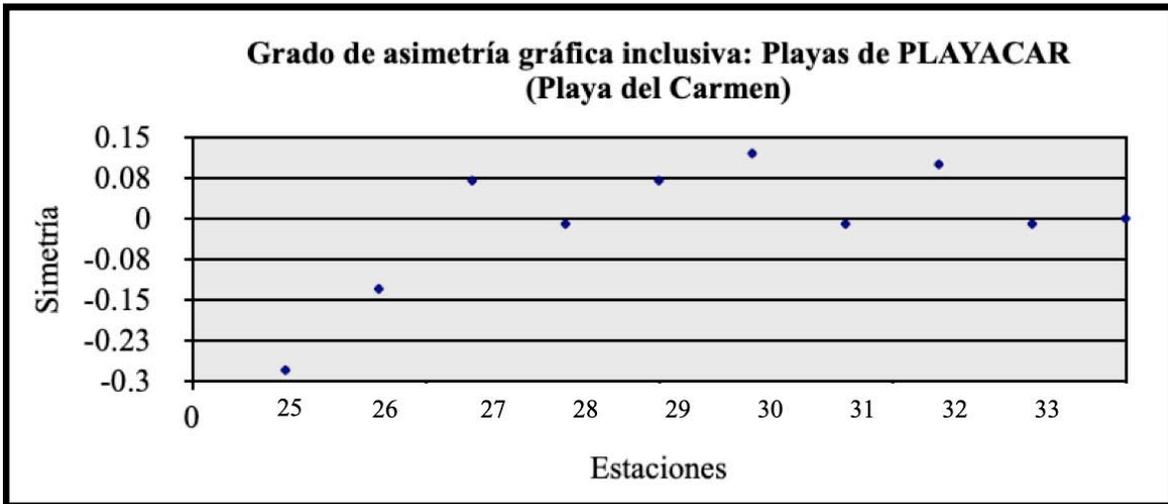


Figura 39. Grado de asimetría gráfica inclusiva

Las arenas medias presentan una asimetría hacia los finos principalmente.

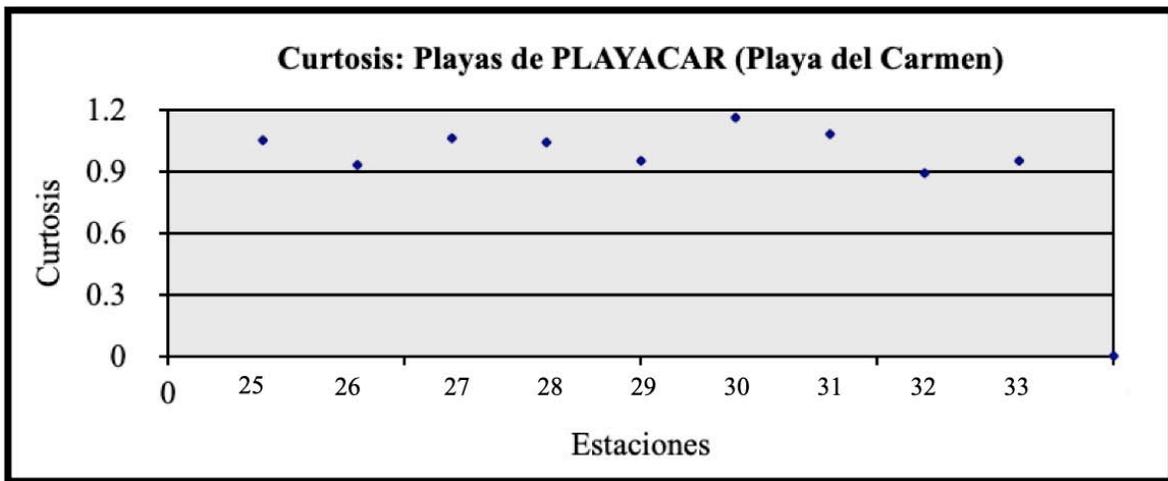


Figura 40. Curtosis.

Las arenas presentan una curtosis mesocúrtica (dos clases de tamaños) (arenas medias y finas).

Tabla 12. Nomenclatura del sedimento (Playacar, Ciudad del Carmen).

Perfil de playa	No. de Estación	Zona de playa	NOMENCLATURA DEL SEDIMENTO			
REEF - 1	25	I	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	26	M	Arena fina	Bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	27	S	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
REEF - 2 (ROCA)	28	I	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	29	M	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	30	S	Arena media	Bien clasificado	Asimétrico hacia finos	Leptocúrtico
RUINAS - 1	31	I	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	32	M	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Platicúrtico
	33	S	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico

Discusión

Con base en los resultados mostrados en las gráficas anteriores, se puede resumir que en la zona de PLAYACAR (perfiles REEF -1, REEF -2 (ROCA) y RUINAS -1), la nomenclatura del sedimento corresponde principalmente con arenas medias a finas, que van de moderadamente clasificadas a bien clasificadas, con una buena distribución simétrica y con una ligera tendencia hacia los sedimentos gruesos y después hacia los finos, y que son transportados dentro de un ambiente de mediana a alta energía. El muestreo se realizó al final del periodo climático de lluvias el cual se relaciona con la presencia de grandes tormentas y huracanes (diciembre de 2007).

c) Textura del sedimento

En cuanto a la textura de los sedimentos en la zona de PLAYACAR, se obtuvo que predominan las arenas de tamaño medio a fino, de moderadamente clasificadas a bien clasificadas y con una asimetría principalmente hacia las arenas gruesas y después hacia los finos, las que se relacionan con un ambiente de media a alta energía en un medio ambiente sedimentario relacionado con una costa de forma lineal abierta.

d) Composición del sedimento

Con respecto a la composición de los sedimentos, éstos están constituidos predominantemente por materiales carbonatados de origen biogénico como son los fragmentos de moluscos, corales, esponjas, equinodermos, espículas, algas, foraminíferos, etc., los cuales provienen y/o son producidos en las zonas de lagunas y cuerpos arrecifales de tipo barrera que se desarrollan a lo largo de la línea costera. Por otra parte, con base en los estudios petrográficos, se observó que las arenas producidas en el área de estudio corresponden a biocalcarenitas. (arenas calcáreas con alto contenido biogénico) (Fig. 40 y 41).

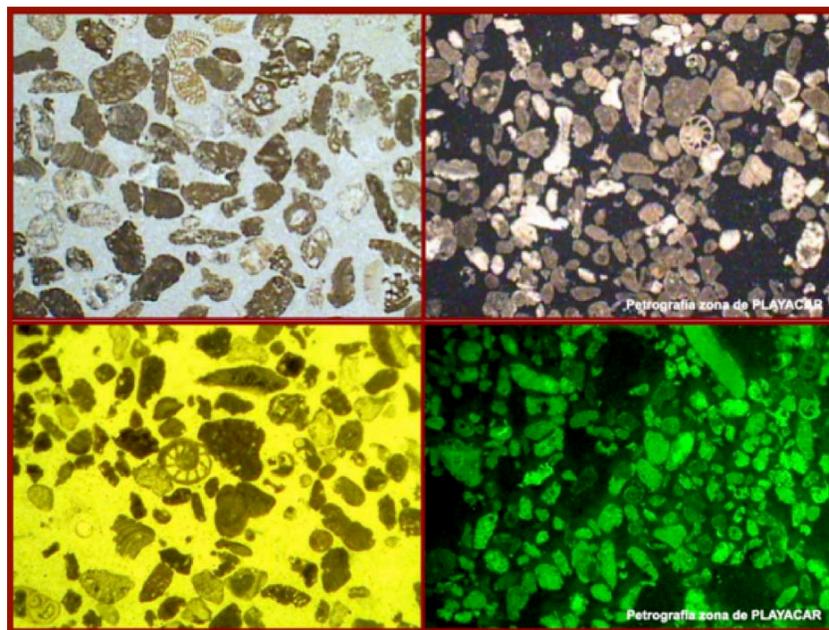


Figura 41. Se presentan cuatro microfotografías de láminas delgadas que fueron analizadas en un microscopio petrográfico marca Leica con objetivos de 20X y 40X, en los que se observan fragmentos de corales, moluscos y foraminíferos.



Figura 42. Se presentan dos microfotografías con muestras de arenas del sitio de REEF -2, analizadas con un microscopio estereoscópico marca Leica con objetivos de 10X y 30X, en los que se observan fragmentos de corales, moluscos y foraminíferos, que constituyen arenas medias y finas moderadamente bien clasificadas y que se ajustan a la clasificación de una biocalcarenita .

e) Transporte de sedimentos y su relación con la morfología de la línea de costa, en cuanto a éste punto la zona de PLAYACAR se encuentra dentro de una zona en donde la forma lineal de una costa abierta debería ajustarse a una zona de depósito o acumulación, o por lo menos a una zona de equilibrio, pero de acuerdo con los estudios obtenidos de los perfiles de playa, éstos presentan anchuras cortas y pendientes ligeramente altas en los que se observan indicios de procesos de erosión, al parecer el transporte de los sedimentos se lleva a cabo de norte a sur como lo refiere Fernández-Eguiarte *et al.* (1992a y 1992b). el transporte de los sedimentos se ve fomentado principalmente por fenómenos meteorológicos (huracanes, tormentas, etc.). Sin embargo, en el área de estudio se observa una mayor dinámica costera que tiende a erosionar las playas debido a los fenómenos naturales, y en particular a la acción antrópica relacionada con un mal manejo de la gestión de la zona litoral (Márquez-García *et al.* 2011).

4.1.2 Caleta de Paa - mul

a) Desnivel topográfico del perfil de playa

La caleta de Paa-mul es en realidad una pequeña ensenada localizada a 18 Km al suroeste de la ciudad de Playa del Carmen, estado de Quintana Roo, ésta ensenada tiene una longitud aproximada de 700 metros y la distancia entre las puntas norte y sur es de 450 metros (fig. 42), a ella se llega por tierra utilizando la carretera Cancun-Chetumal No. 307; es importante señalar que sólo se realizó un levantamiento de perfil de playa, ya que en el momento de la visita ésta estuvo resguardada por personal de seguridad (considerada propiedad privada) y en donde predominan asentamientos de personal extranjero, y no se permite el acceso de personal extraño, por lo que se hizo un recorrido rápido a pie de toda la Caleta con la finalidad de obtener la mayor información posible y que se presenta a continuación.

Perfil de playa PAA-MUL-1

Tabla 13. Datos de localización del perfil de playa PAA-MUL-1.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
PAA - MUL	34	I	N20° 31.213'	W -87° 11.629'
	35	M	N20° 31.213'	W -87° 11.633'
	36	S	N20° 31.214'	W -87° 11.638'



Figura 43. Es una imagen aérea que muestra la forma de la caleta de Paa-mul, así como el sitio en donde se levantó el único perfil de playa.

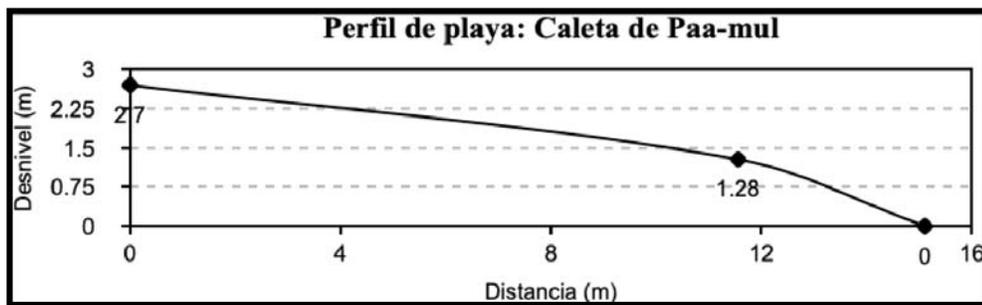


Figura 44. Perfil de playa PAA-MUL -1 (I-M-S).

Tabla 14. Descripción general del perfil de playa PAA-MUL-1 (I-M-S).

Nombre del perfil: PAA-MUL -1	
Clave o ID de referencia:	PAA-MUL -1 (I-M-S)
Localización:	Se localiza muy cerca de la punta sur de la caleta (N20° 31.214' y W87° 11.638')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 79°
Anchura:	15.0 metros
Altura:	2.70 metros
Pendiente:	10.14° (Tan ⁻¹ de 0.17880)
Relación con respecto a la línea de costa:	En el lugar se observan construcciones privadas las cuales son golpeadas por la fuerza del oleaje del mar Caribe, así como también se aprecian afloramientos de la roca caliza lo que evidencia la acción de los procesos de erosión.
Diagnóstico	Erosión



Figura 45. Fotografía del sitio donde se levantó el perfil de playa PAA-MUL -1, y en la que se observa el substrato de rocas calizas (Fm. Carrillo Puerto) parcialmente cubiertas por las arenas holocénicas correspondientes a los depósitos litorales (Qholi), y al fondo la vista de la punta sur de la caleta.



Figura 46. Fotografías del sitio de la caleta de Paamul, la primera es una vista hacia el centro de la caleta y la segunda es una vista tomada en la punta norte en dirección a la punta sur, en ésta se observan afloramientos de la roca caliza (Fm. Carrillo Puerto), que son evidencia de la erosión.



Figura 47. Fotografías de la caleta de Paa-mul, la primera es una vista hacia el centro de la caleta en donde se observan construcciones turísticas propias de la zona (hoteles), y en la segunda es una vista tomada en la punta norte que muestra el substrato rocoso con escasos depósitos de arenas.

Discusión

Las playas en la caleta de PAA-MUL presentan en general ángulos de alrededor de los 10° de inclinación y una anchura promedio de 25 metros, éstas características están relacionadas con procesos de acortamiento relacionados con la erosión. En la caleta se observan amplios afloramientos de rocas calizas (Fm. Carrillo Puerto) y la escasez de depósitos arenosos. Asimismo, las construcciones relacionadas con la industria hotelera, presentan cimentaciones descubiertas o desnudadas por la última tormenta de la temporada (diciembre de 2007). Además, la ausencia de playa hacia la punta norte y la ampliación de la anchura de la playa hacia la punta sur, son signos indicativos de que el transporte de los sedimentos se realiza con esa dirección (norte hacia el sur).

b) Nomenclatura granulométrica de los sedimentos.

A continuación se presentan los resultados de los análisis granulométricos de las muestras colectadas en la caleta de **PAA-MUL**, y que contiene la siguiente información:

- a) Parámetros granulométricos
- b) Tamaño grafico promedio Mz (ϕ)
- c) Desviación gráfica inclusiva (ϕ)
- d) Grado de asimetría gráfica inclusiva
- e) Curtosis
- f) Nomenclatura del sedimento

Zona de PAA-MUL

Perfil de playa: PAA-MUL-1.

Tabla 15. Parámetros granulométricos (Caleta de Paa-mul).

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	PARÁMETROS TEXTURALES DE SEDIMENTOS			
			TAMAÑO (ϕ)	DESVIACIÓN (ϕ)	SIMETRÍA	CURTOSIS
PAA - MUL	34	I	0.15	0.55	-0.21	1.20
	35	M	0.19	1.09	-0.41	1.24
	36	S	-0.48	0.57	0.36	1.41

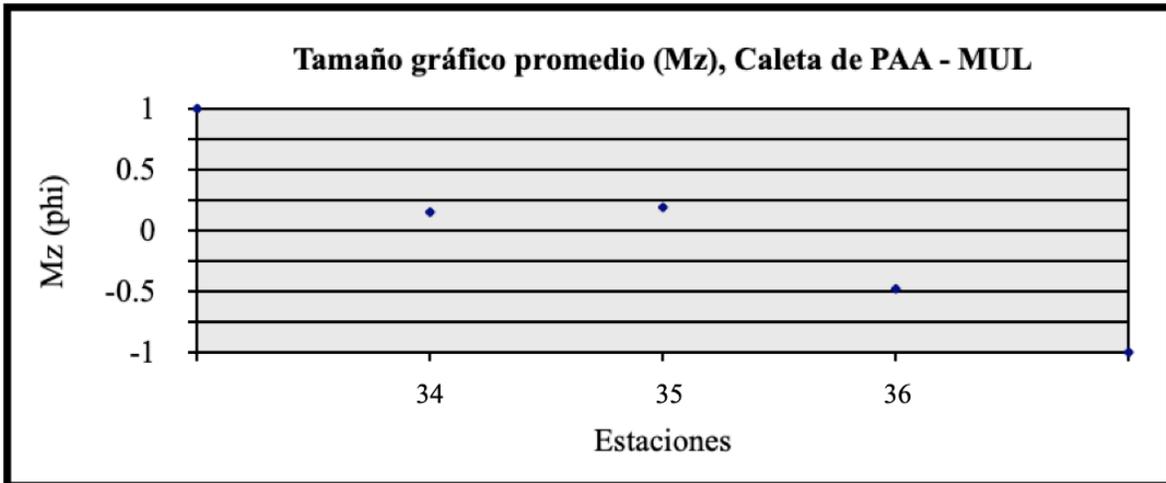


Figura 48. Tamaño gráfico promedio Mz (phi)

En la figura se observa que los sedimentos son principalmente arenas gruesas y muy gruesas.

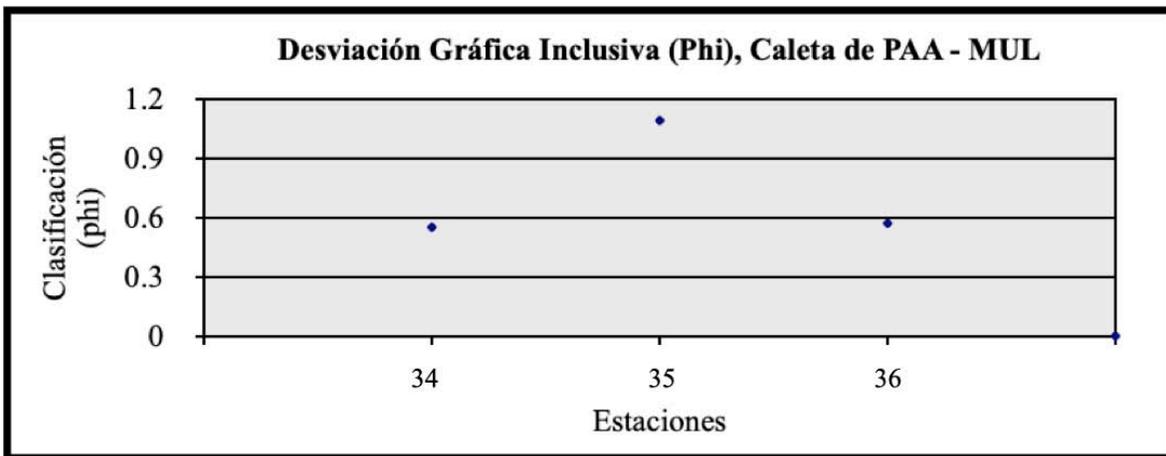


Figura 49. Desviación gráfica inclusiva (phi)

Las arenas gruesas varían de moderadamente bien clasificadas a mal clasificadas.

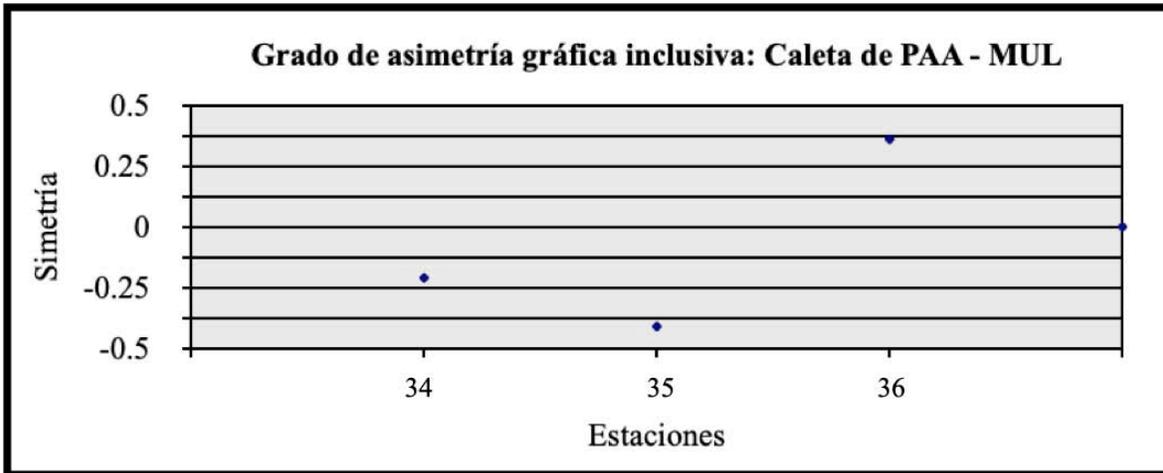


Figura 50. Grado de asimetría gráfica inclusiva

Las arenas gruesas presentan una asimetría hacia los gruesos principalmente.

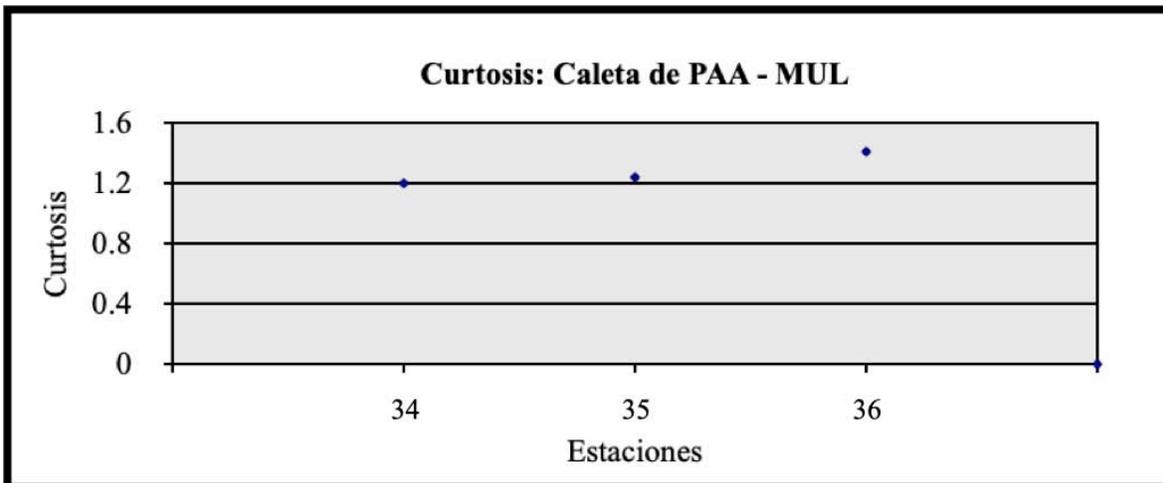


Figura 51. Curtosis

Las arenas presentan una curtosis leptocúrtica (una clase de tamaño, arenas gruesas).

Tabla 16. Nomenclatura del sedimento (Caleta dePaa-mul).

Perfil de playa	No. de Estación	Zona de playa	NOMENCLATURA DEL SEDIMENTO			
PAA - MUL	34	I	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Muy asimétrico hacia gruesos	Muy leptocúrtico
	35	M	Arena gruesa	Mal clasificada	Muy asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	36	S	Arena muy gruesa	Moderadamente bien clasificado	Muy asimétrico hacia finos	Leptocúrtico

Discusión

Los resultados de los análisis granulométricos de las muestras del sitio de **PAA-MUL** (PAA-MUL-1), y su relación con la nomenclatura del sedimento es la siguiente: arenas gruesas a muy gruesas, moderadamente bien clasificadas, con una dispersión asimétrica hacia gruesos y con una predominancia hacia las arenas gruesas que indica una dinámica costera de alta energía. El muestreo se realizó al final del periodo climático de lluvias el que se relaciona con la presencia de grandes tormentas y huracanes (diciembre de 2007).

c) Textura del sedimento

La textura de los sedimentos en la zona de la Caleta de PAA-MUL, está constituida principalmente por arenas gruesas a muy gruesas, moderadamente bien clasificadas a mal clasificadas y con una asimetría principalmente hacia las arenas gruesas, las que se relacionan con un ambiente de alta energía relacionada con una pequeña ensenada o caleta en la que la corriente litoral local transporta a los sedimentos con una dirección preferencial del norte hacia el sur.

d) Composición del sedimento

La composición de los sedimentos está conformada fundamentalmente por materiales carbonatados de origen biogénico como son los fragmentos de: moluscos, corales, esponjas, equinodermos, espículas, algas, foraminíferos, etc., los cuales provienen y/o son producidos dentro de zona lagunar costera y con los cuerpos arrecifales de tipo barrera que se desarrollan en la línea de costa. Los estudios petrográficos (figuras 52 y 53), indican que las arenas de Paa-mul corresponden a biocalcarenitas. (arenas calcáreas con alto contenido biogénico).

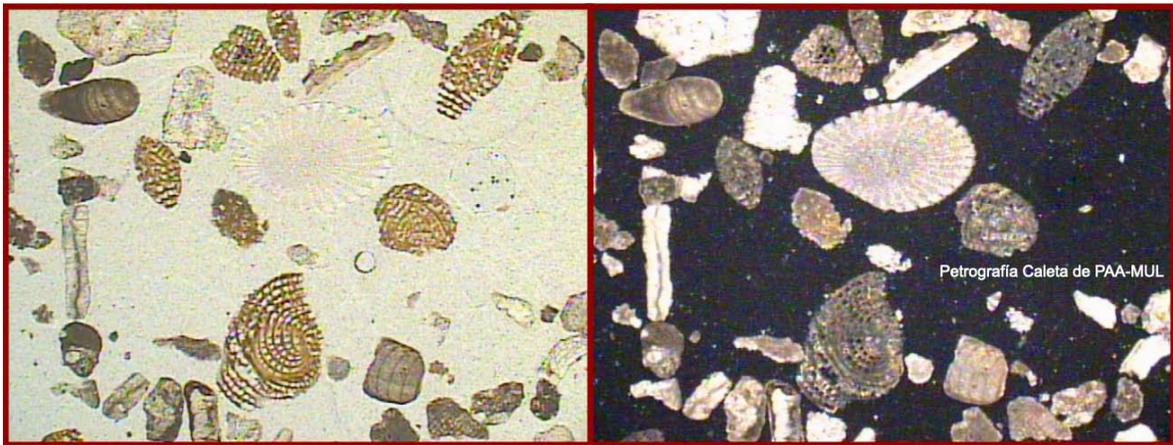


Figura 52. En ésta imagen se presentan dos microfotografías de una lámina delgada, una se tomó con luz reflejada y la otra con luz polarizada (nícoles cruzados) con el objetivo de 25X, en ellas se observa que las testas están constituidas por el mineral calcita (CaCO_3), el cual presenta una alta birrefringencia.

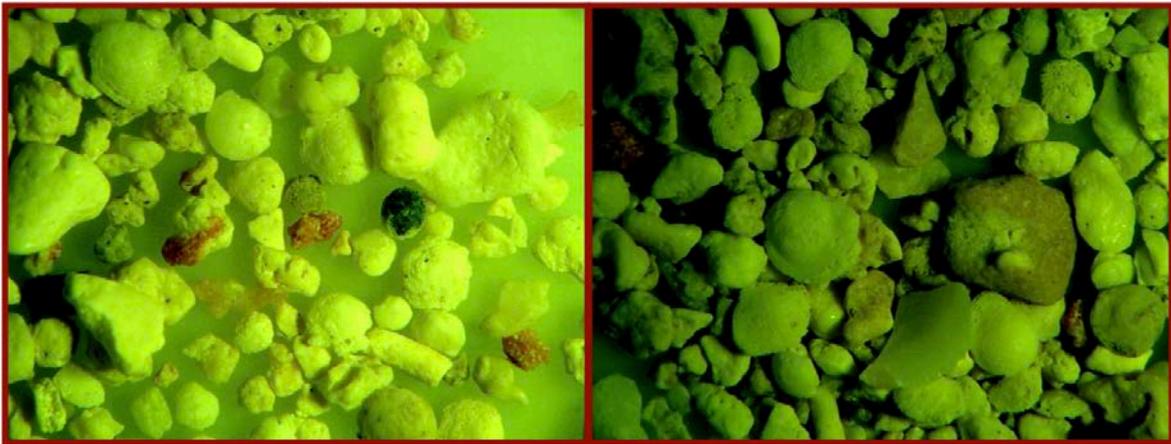


Figura 53. En la siguiente imagen se presentan dos microfotografías con muestras de arenas de la caleta de PAA-MUL, en ellas se observan fragmentos de corales, moluscos y foraminíferos, éstos representan a las arenas gruesas a muy gruesas y moderadamente clasificadas que se clasifican como una biocalcarenita.

e) Transporte de sedimentos y su relación con la morfología de la línea de costa.

La calera de PAA-MUL presenta una forma cóncava (de herradura) que hacia mar abierto se encuentra bordeada por una estructura arrecifal en forma de barrera la que protege a la zona lagunar de la fuerza del oleaje, hacia la punta norte mediante una supervisión visual se observó que predominan las arenas muy gruesas, así como fragmentos de moluscos y equinodermos y fragmentos de rocas caliza (Fm. Carrillo Puerto del Plioceno-Pleistoceno) del tamaño de gravas que sobreyacen a los estratos de roca caliza. La caleta presenta evidencias del ataque de los fenómenos meteorológicos y de la erosión marina, la cual se ve acentuada de manera evidente por los asentamientos antrópicos en el área, el transporte de los sedimentos se lleva a cabo de norte a sur como lo han señalado estudios previos en la región por otros autores entre ellos Fernández-Eguiarte *et al.* (1992a y 1992b) y Márquez-García *et al.* (2011).

4.1.3 Bahía de Tankah

a) Desnivel topográfico del perfil de playa

La bahía de Tankah se localiza aproximadamente 65 Km. de distancia hacia el suroeste de la ciudad de Playa del Carmen, y se puede llegar a ella por tierra utilizando la carretera federal No. 307, que va de Cancún a Chetumal, en cuanto a su morfología, ésta presenta una forma lineal abierta con su punta norte bien definida la que colinda con punta Cardenas hacia el noreste, y hacia el suroeste la punta sur no esta bien definida ya que la costa presenta algunos acantilados rocosos pertenecientes a la zona arqueológica de Tulum (ruinas del Castillo Maya), la que se sitúa a casi 8 Km. de la punta norte de Tankah. En la línea de costa en donde no existe playa arenosa (Qholi) se presentan algunos afloramientos de estratos de caliza de la Fm. Carrillo Puerto, En esta zona se realizaron cinco perfiles de playa los cuales presentan anchuras que varían de 10 a 15 metros y pendientes que van de los 5° a 10° de inclinación, la zona de dunas es prácticamente nula ya que la actividad humana se adueño de ella, así como también de algunas áreas de manglares y humedales lo que seguramente repercutirá en la estabilidad de la línea de costa con respecto a los procesos erosivos correspondientes. En la figura 54, se muestra una imagen combinada en donde la visual aérea corresponde al dominio marino y la visual continental es una representación de la carta geológica que se obtuvo en el trabajo de gabinete de la zona de estudio correspondiente con la Bahía de Tankah (fig. 55). A continuación se presentan los resultados obtenidos de la Bahía de Tankah.

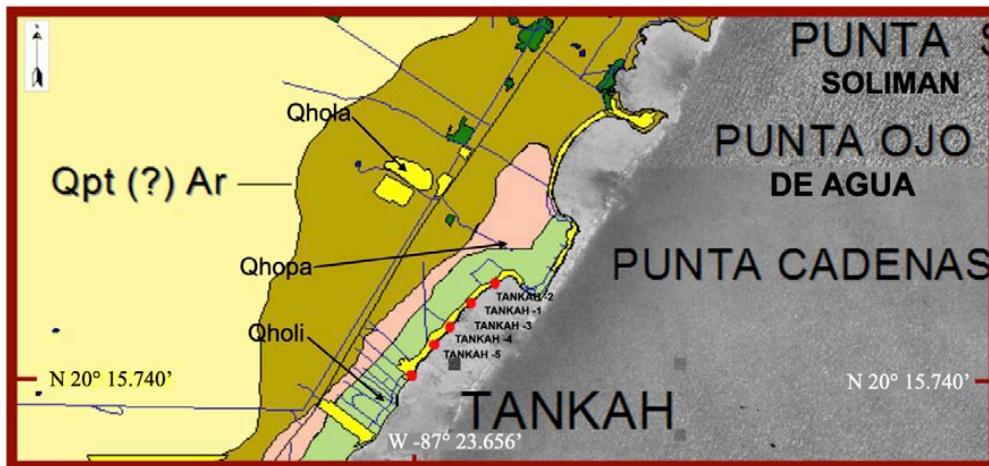


Figura 54. En ésta imagen se muestra información litológica y estratigráfica relacionada con las formaciones del período Holoceno, las que forman una cubierta sobre la Fm. Carrillo Puerto del Plioceno-Pleistoceno (SGM, 2006, Carta Geológico-Minera).

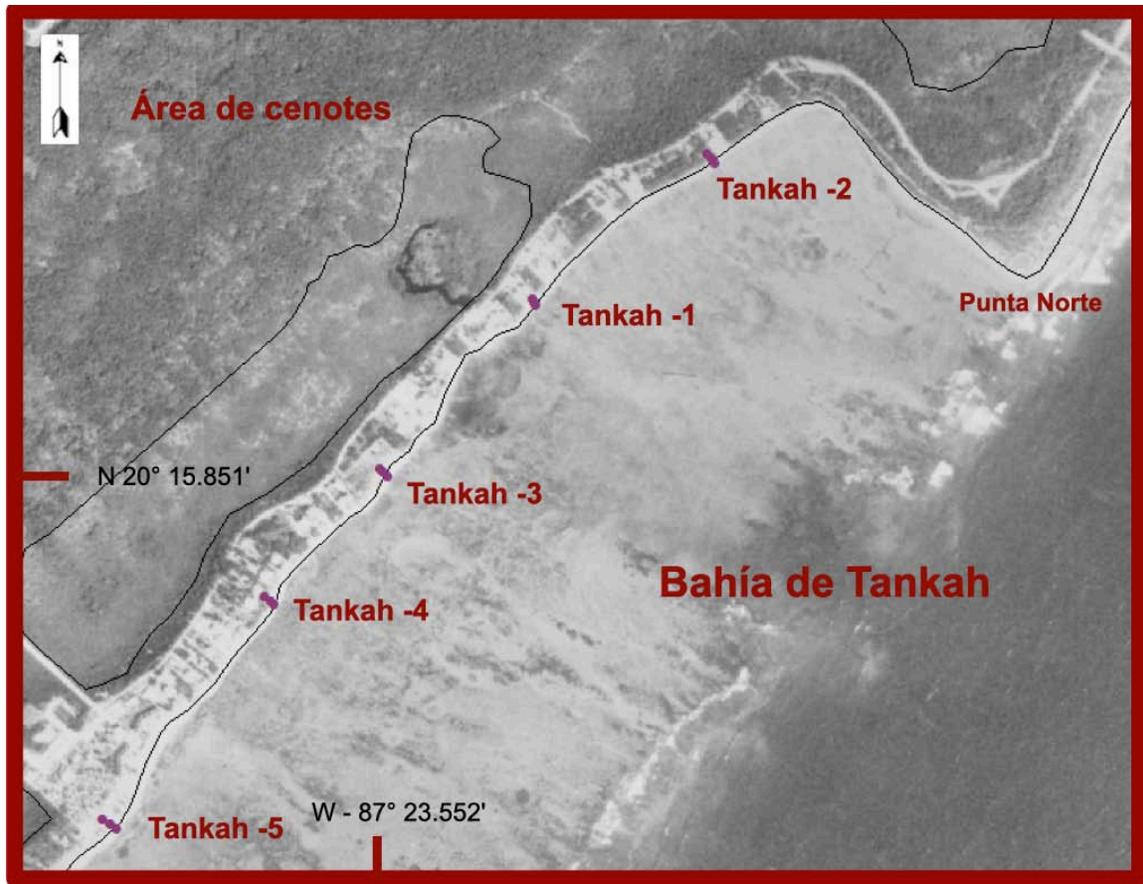


Figura 55. Vista aérea de la zona de estudio de la parte centro norte de la Bahía de Tankah.

Perfil de playa TANKAH-1

Tabla 17. Datos de localización del perfil de playa TANKAH-1.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
TANKAH - 1	1	I (Infralitoral)	N20° 15.993'	W -87° 23.409'
	2	M (Mesolitoral)	N20° 15.995'	W -87° 23.411'
	3	S (Supralitoral)	N20° 15.998'	W -87° 23.412'

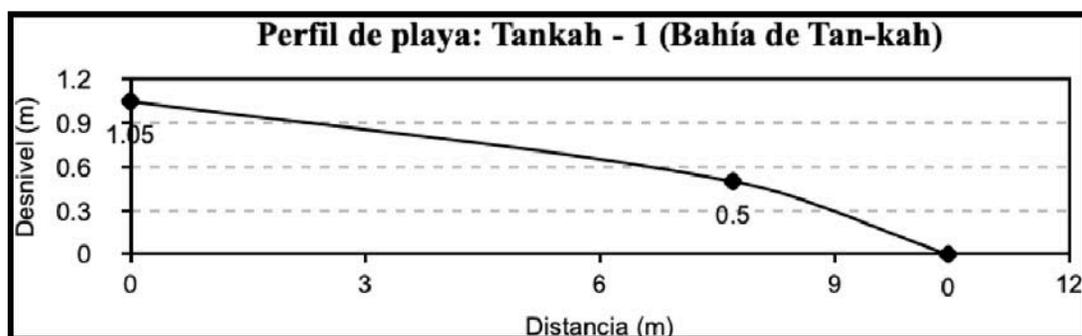


Figura 56. Perfil de playa TANKAH -1 (I-M-S).

Tabla 18. Descripción general del perfil TANKAH -1 (I-M-S).

Nombre del perfil: TANKAH-1	
Clave o ID de referencia:	TANKAH-1 (I-M-S)
Localización:	Se localiza aproximadamente a 200 metros del perfil de playa Tankah -2, hacia la punta norte de la Bahía. (N20° 15.998' y W87° 23.412')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 33°
Anchura:	10.45 metros
Altura:	1.05 metros
Pendiente:	5.73° (Tan ⁻¹ de 0.10047)
Relación con respecto a la línea de costa:	En el lugar se observan construcciones privadas correspondiente a hoteles que ocupan buena parte de la zona de paya, además de que existen tuberías relacionadas con descargas de aguas residuales o grises cubiertas por material rocoso, la zona de la mesoplaya presenta una berma de 50 centímetros de altura y está muy próxima a la zona de la infraplaya, en este caso en particular, la acción humana contribuye en la inestabilidad de la playa acentuando los procesos de erosión.
Diagnóstico	Erosión



Figura 57. Fotografías del sitio en donde se realizó el levantamiento del perfil de playa TANKAH-1, en ellas se aprecian anchuras de playa muy angostas ya que la actividad antrópica se apropió de buena parte de la zona de la supraplaya y del sistema de dunas.



Figura 58. Otras fotografías del sitio que evidencian la invasión antrópica de la zona de playa, así como tuberías de desagüe que vierten las aguas negras hacia la bahía.

Perfil de playa TANKAH-2

Tabla 19. Datos de localización del perfil de playa TANKAH-2.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
TANKAH - 2	4	I	N20° 16.115'	W -87° 23.246'
	5	M	N20° 16.119'	W -87° 23.248'
	6	S	N20° 16.122'	W -87° 23.252'

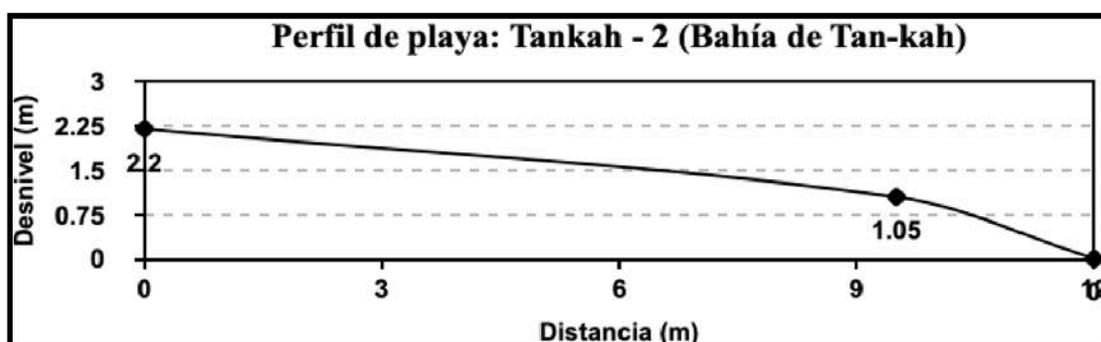


Figura 59. Perfil de playa TANKAH -2 (I-M-S).

Tabla 20. Descripción general del perfil TANKAH -2 (I-M-S).

Nombre del perfil: TANKAH -2	
Clave o ID de referencia:	TANKAH-2 (I-M-S)
Localización:	Es el perfil de playa más cercano a la punta norte de la Bahía (N20° 16.122' y W87° 23.252')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 40°
Anchura:	12.0 metros
Altura:	2.20 metros
Pendiente:	10.39° (Tan ⁻¹ de 0.18333)
Relación con respecto a la línea de costa:	En el lugar se observan construcciones privadas relacionadas al turismo (hoteles) que ocupan buena parte de la zona de paya, además de que existen tuberías relacionadas con descargas de aguas residuales o negras cubiertas por material rocoso, la zona de la mesoplaya presenta una berma de 50 centímetros de altura y está muy próxima a la zona de la infraplaya, éste es un caso muy particular que evidencia como la acción humana contribuye en la inestabilidad y desaparición de la playa acentuando los procesos de erosión.
Diagnóstico	Erosión



Figura 60. En el lugar se observan construcciones privadas relacionadas con el turismo (hoteles), depósitos de arenas muy gruesas, fragmentos de corales arrancados del sustrato arrecifal y depósitos de zargaso formando un depósito de marea de una tormenta reciente.

Perfil de playa TANKAH-3

Tabla 21. Datos de localización del perfil de playa TANKAH-3.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
TANKAH - 3	7	I	N20° 15.844'	W -87° 23.544'
	8	M	N20° 15.848'	W -87° 23.550'
	9	S	N20° 15.851'	W -87° 23.552'

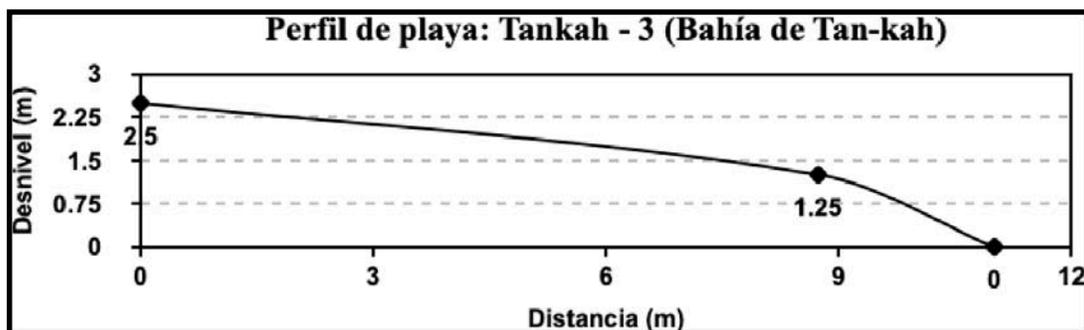


Figura 61. Perfil de playa TANKAH -3 (I-M-S).

Tankah-3

Tabla 22. Descripción general del perfil TANKAH-3 (I-M-S).

Nombre del perfil: TANKAH-3	
Clave o ID de referencia:	TANKAH-3 (I-M-S)
Localización:	Es el perfil de playa se localiza al centro de la Bahía de Tankah (N20° 15.851' y W87° 23.552')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 40°
Anchura:	11.0 metros
Altura:	2.55 metros
Pendiente:	12.8° (Tan ⁻¹ de 0.23181)
Relación con respecto a la línea de costa:	En éste sitio, al igual que en la tabla anterior, se observa la muy activa acción antrópica y las consecuencias de ella con respecto a la zona de la playa, acentuando la erosión de la bahía de Tankah.
Diagnóstico	Erosión



Figura 62. Fotografías en las que se observan construcciones privadas relacionadas con el turismo (hoteles), depósitos de arenas muy gruesas y depósitos de sargazo formando un depósito de marea de tormenta reciente, vistas tomadas en dirección noreste y suroeste de la bahía de Tankah.



Figura 63. Fotografías en las que se observan construcciones privadas relacionadas con el turismo (hoteles), depósitos de arenas muy gruesas y depósitos de sargazo formando un depósito de marea de tormenta reciente. vistas tomadas en dirección hacia el noroeste de la bahía de Tankah.

Perfil de playa TANKAH-4

Tabla 23. Datos de localización del perfil de playa TANKAH-4.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
TANKAH - 4	10	I	N20° 15.541'	W -87° 23.791'
	11	M	N20° 15.544'	W -87° 23.796'
	12	S	N20° 15.549'	W -87° 23.804'

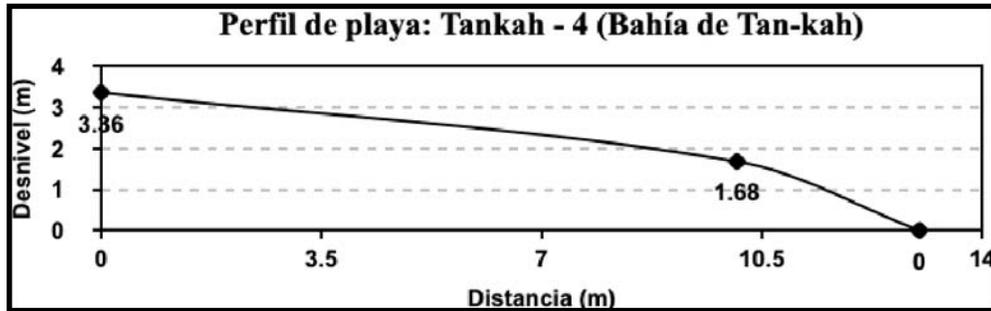


Figura 64. Perfil de playa TANKAH-4 (I-M-S).

Tabla 24. Descripción general del perfil TANKAH-4 (I-M-S).

Nombre del perfil: TANKAH-4	
Clave o ID de referencia:	TANKAH-4 (I-M-S)
Localización:	Este perfil de playa se localiza hacia el suroeste de la bahía de Tankah en las siguientes coordenadas geográficas, (N20° 15.549' y W87° 23.804')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 45°
Anchura:	13.0 metros
Altura:	3.36 metros
Pendiente:	14.49° (Tan ⁻¹ de 0.25846)
Relación con respecto a la línea de costa:	En éste sitio, al igual que en la tabla anterior, se observa la acción antrópica y en algunas zonas hay claros en donde se puede apreciar algunos remanentes del sistema de dunas que había, así como depósitos de marea de tormenta que indican los límites de la zona de la mesoplaya.
Diagnóstico	Erosión



Figura 65. Son imágenes fotográficas en las que se observan algunos remanentes del sistema de dunas que existió, así como algo de vegetación relacionada con el lugar.



Figura 66. En ésta fotografía se observan palmeras en la zona de la supraplaya con una pendiente mas inclinada, y en la otra fotografía se observa al fondo la punta norte de la bahía de Tankah y en primer plano un depósito de algas y basura del litoral que marca el límite de la berma producida por la marea.

Perfil de playa TANKAH-5

Tabla 25. Datos de localización del perfil de playa TANKAH-5.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
TANKAH - 5	13	I	N20° 15.734'	W -87° 23.647'
	14	M	N20° 15.735'	W -87° 23.651'
	15	S	N20° 15.740'	W -87° 23.656'

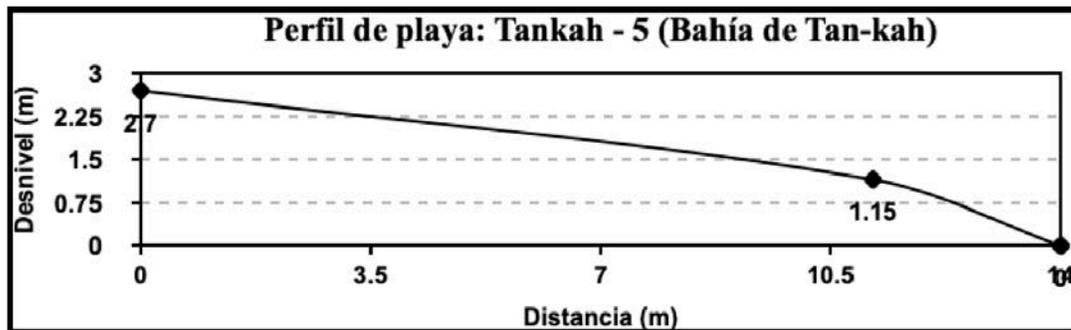


Figura 67. Perfil de playa TANKAH-5 (I-M-S).

Tabla 26. Descripción general del perfil TANKAH-5 (I-M-S).

Nombre del perfil: TANKAH-5	
Clave o ID de referencia:	TANKAH-5 (I-M-S)
Localización:	Este perfil de playa es el último que se realizó dentro de la bahía de Tankah y el más alejado de la punta norte y sus coordenadas geográficas son las siguientes. (N20° 15.740' y W87° 23.656')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 55°
Anchura:	14.0 metros
Altura:	3.70 metros
Pendiente:	14.80° (Tan ⁻¹ de 0.26429)
Relación con respecto a la línea de costa:	En este sitio la actividad antrópica es muy visible por todas partes, aún se siguen construyendo más desarrollos hoteleros y la zona de la playa cada vez es más reducida, a pesar de lo anterior, sus arenas tienden a ser más finas lo que las hace más atractivas para ser visitadas y con ello incrementarse el impacto de la erosión por actividad del hombre.
Diagnóstico	Erosión



Figura 68. En ambas fotografías se observan palmeras tanto en la zona de la supraplaya como en el límite de la mesoplaya, las arenas de esta parte de la playa tienden a ser las más finas de la zona, y los asentamientos humanos se acercan cada vez más a la zona de lavado de la playa (infraplaya), también se observan depósitos de marea de tormenta recientes.



Figura 69. En ésta fotografía se observan construcciones en desarrollo, la voracidad de la actividad antrópica en la zona es increíble, y en consecuencia también los efectos de la erosión.

Discusión

Las playas en la bahía de TANKAH presentan en general ángulos de inclinación que varían de los 5^a y hasta los 15°, con anchuras promedio de 10 a 15 metros, y que varían de los 2.5 a los 3.5 metros de altura, éstas características están relacionadas con procesos de acortamiento relacionados con procesos de erosión. Además, en la Bahía se observa una importante actividad antrópica (construcciones residenciales privadas, actividad hotelera, contaminación por tuberías relacionadas con descargas de aguas residuales o negras cubiertas por materiales pétreos, etc.) la cual esta ubicada en lo que anteriormente fue una zona de dunas de arena, todo lo anterior es indicativo de como la acción humana contribuye a incrementar la inestabilidad y con ello la desaparición del área de la playa, debido también, a los procesos de la erosión marina.

b) Nomenclatura granulométrica de los sedimentos.

A continuación se presentan los resultados de los análisis granulométricos de las muestras recolectadas en el sitio de **TANKAH**, y contiene la siguiente información:

- a) Parámetros granulométricos
- b) Tamaño grafico promedio M_z (ϕ)
- c) Desviación gráfica inclusiva (ϕ)
- d) Grado de asimetría gráfica inclusiva
- e) Curtosis
- f) Nomenclatura del sedimento

Zona de TANKAH

Perfiles de playa: Tankah -1, Tankah -2, Tankah -3, Tankah -4 y Tankah -5.

Tabla 27. Parámetros granulométricos (Bahía de Tankah).

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	PARÁMETROS TEXTURALES DE SEDIMENTOS			
			TAMAÑO (Phi)	DESVIACIÓN (Phi)	SIMETRÍA	CURTOSIS
TANKAH - 1	1	I (Infralitoral)	-1.00	0.76	0.09	1.13
	2	M (Mesolitoral)	1.01	0.66	-0.18	1.25
	3	S (Supralitoral)	0.59	0.82	-0.21	1.46
TANKAH - 2	4	I	1.58	0.65	-0.08	0.97
	5	M	0.33	0.92	-0.04	0.93
	6	S	0.54	0.75	-0.13	1.19
TANKAH - 3	7	I	0.97	1.06	-0.43	1.29
	8	M	0.79	0.68	-0.10	1.22
	9	S	1.02	0.58	0.06	1.25
TANKAH - 4	10	I	1.05	0.94	0.36	0.92
	11	M	0.19	1.06	-0.18	0.98
	12	S	0.91	0.70	0.24	1.21
TANKAH - 5	13	I	1.45	0.57	-0.04	1.04
	14	M	1.00	0.62	-0.10	1.15
	15	S	0.94	0.57	-0.12	1.24

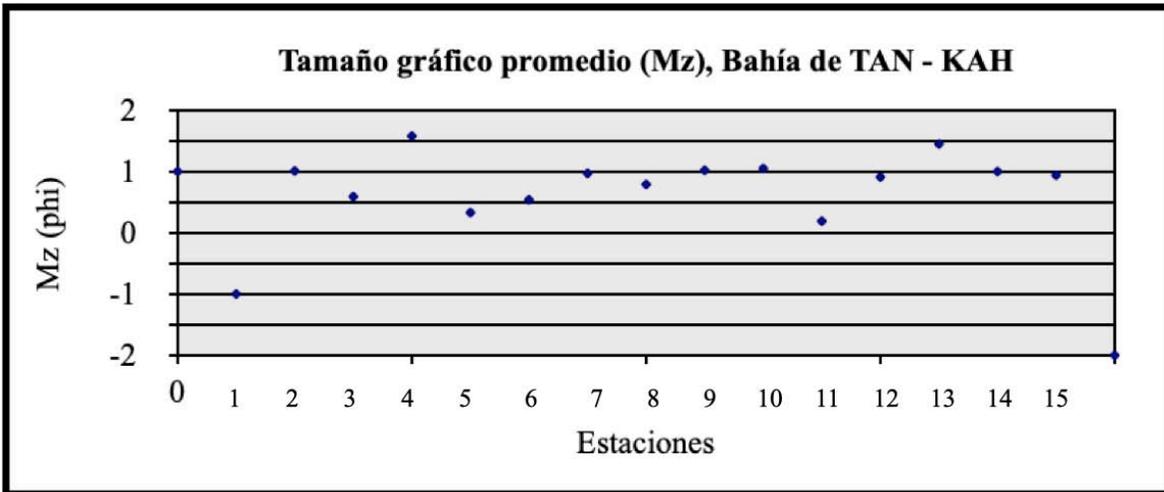


Figura 70. Tamaño gráfico promedio Mz (phi)

En la figura se observa que los sedimentos son principalmente arenas gruesas y medias.

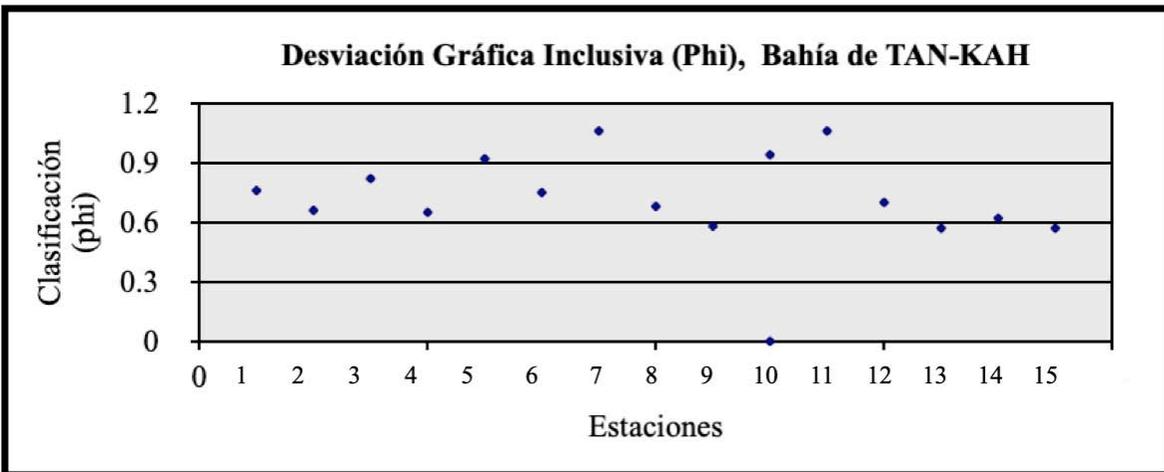


Figura 71. Desviación gráfica inclusiva (phi)

Las arenas gruesas varían de moderadamente bien clasificadas a bien clasificadas.

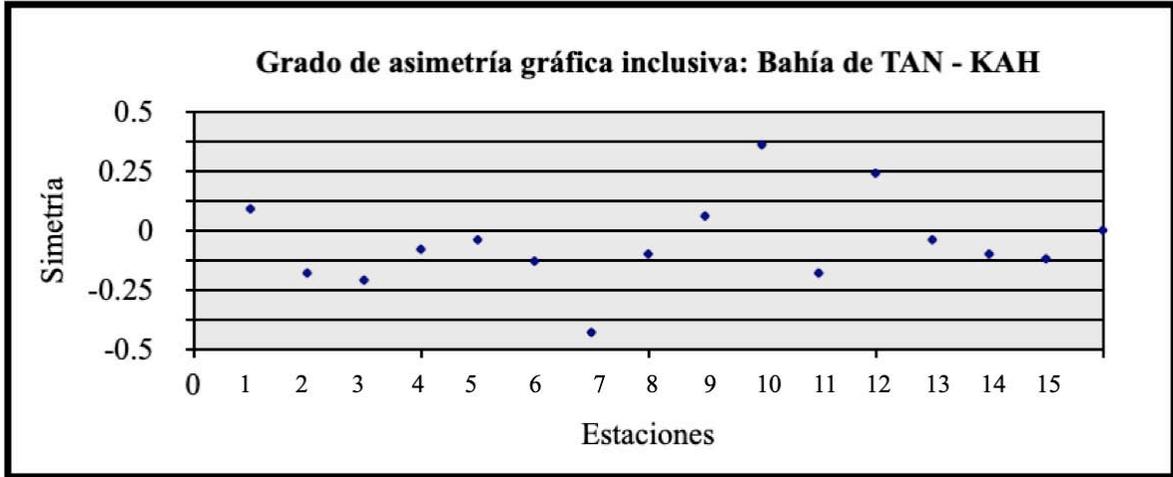


Figura 72. Grado de asimetría gráfica inclusiva

Las arenas medias presentan una asimetría hacia gruesos y simétricas, y después hacia finos.

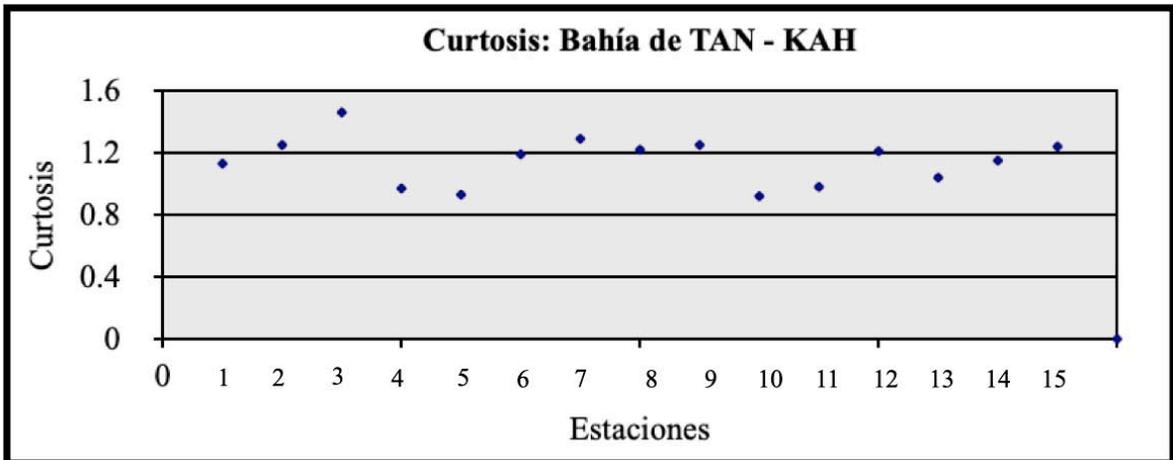


Figura 73. Curtosis

Las arenas presentan una curtosis leptocúrtica (arenas gruesas) y mesocúrtica (arenas gruesas y medias).

Tabla 28. Nomenclatura del sedimento (Bahía de Tankah).

Perfil de playa	No. de Estación	Zona de playa	NOMENCLATURA DEL SEDIMENTO			
TANKAH - 1	1	I (Infralitoral)	Arena muy gruesa	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	2	M (Mesolitoral)	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	3	S (Supralitoral)	Arena gruesa	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
TANKAH - 2	4	I	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	5	M	Arena gruesa	Moderadamente clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	6	S	Arena gruesa	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
TANKAH - 3	7	I	Arena gruesa	Mal clasificada	Muy asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	8	M	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Leptocúrtico
	9	S	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Leptocúrtico
TANKAH - 4	10	I	Arena media	Moderadamente clasificado	Muy asimétrico hacia finos	Mesocúrtico
	11	M	Arena gruesa	Mal clasificada	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	12	S	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia finos	Leptocúrtico
TANKAH - 5	13	I	Arena media	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Mesocúrtico
	14	M	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Simétrico	Leptocúrtico
	15	S	Arena gruesa	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico

Discusión

De acuerdo con los resultados que se observan en las gráficas precedentes, se puede concluir que en la bahía de TANKAH (perfiles TANKAH 1, TANKAH 2, TANKAH 3, TANKAH 4 y TANKAH 5), la nomenclatura del sedimento se ajusta con arenas medias a gruesas, que van de moderadamente bien clasificadas a moderadamente clasificadas, con una dispersión variable de asimétrica hacia gruesos, simétrica y después asimétrica hacia finos, y con la predominancia de las arenas gruesas, que indica una dinámica costera de alta energía, la bahía se encuentra protegida por la presencia de estructuras arrecifales de tipo barrera pertenecientes al sistema arrecifal Mesoamericano. El muestreo se realizó al final del periodo climático de lluvias el que se relaciona con la presencia de grandes tormentas y huracanes (diciembre de 2007).

c) Textura del sedimento

En relación con la textura de los sedimentos en la zona de la bahía de TANKAH, se obtuvo que predominan las arenas de gruesas y medias, de moderadamente bien clasificadas a moderadamente clasificadas y con una dispersión variable en donde predominan las arenas gruesas que indican una dinámica de alta energía en la que la corriente litoral local transporta a los sedimentos con una dirección preferencial del norte hacia el sur, en el lugar prevalecen los procesos de la erosión.

d) Composición del sedimento

Con respecto a la composición de los sedimentos, éstos están constituidos principalmente por material carbonatado (CaCO_3) de origen biogénico relacionado con fragmentos de: moluscos, corales, esponjas, equinodermos, espículas, algas, foraminíferos, etc., al igual que en otras zonas de este estudio, el lugar de donde provienen y son generados son áreas de lagunas costeras y cuerpos arrecifales de tipo barrera que se localizan en la línea costera. Con base en los estudios petrográficos (fig. 74) se observó que las arenas provenientes del área de estudio corresponden a biocalcarenitas. (arenas calcáreas con alto contenido biogénico) (fig. 75).

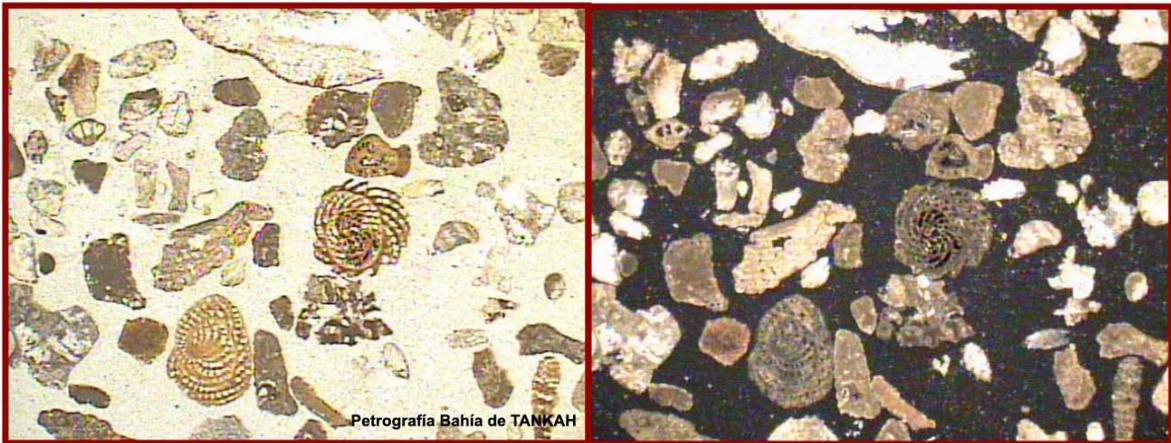


Figura 74. Se presentan dos microfotografías de una lámina delgada de la bahía de Tankah, en donde una fue tomada con luz reflejada y la otra con luz polarizada (nicoses cruzados) y con un aumento de 25X, en la imagen se observan testas de foraminíferos y fragmentos de coral y algas las cuales están conformadas por el mineral calcita (CaCO_3), el cual presenta una alta birrefringencia.

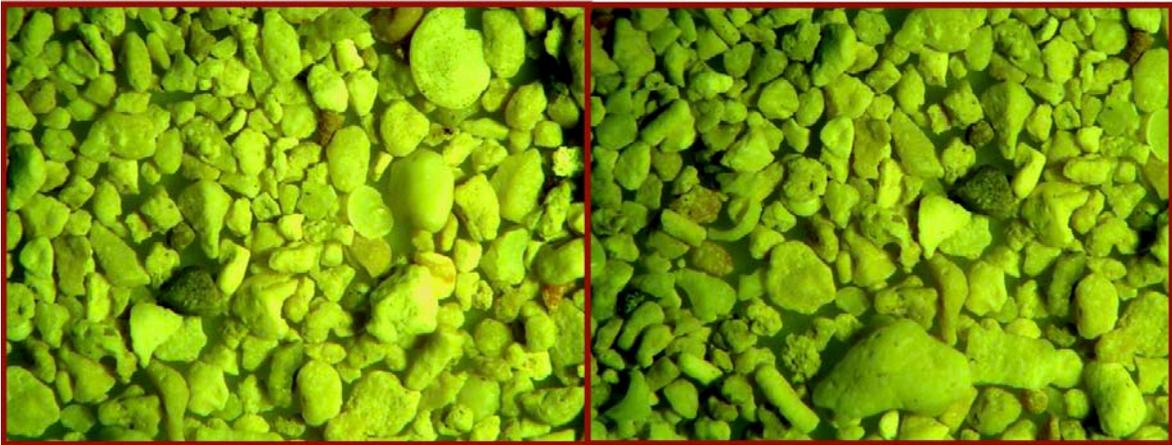


Figura 75. En la siguiente imagen se presentan dos microfotografías con muestras de arenas de la bahía de TANKAH, en ambas se observan fragmentos de corales, moluscos y foraminíferos, éstos organismos conforman a las arenas gruesas y medias, moderadamente clasificadas como biocalcarenitas.

e) Transporte de sedimentos y su relación con la morfología de la línea de costa.

En lo referente con la bahía de TANKAH, esta presenta una punta norte bien definida con una línea de costa alargada, y que hacia el sur no está muy bien definida la presencia de una punta sur, ya que afloran áreas con sustratos rocosos de calizas de forma intermitente hasta llegar a la zona de escarpes y acantilados en la zona de Tulum (zona arqueológica). Hacia la punta norte que también es conocida como punta Cadenas del lado de la caleta o bahía de Solimán, se encuentran depósitos de arenas gruesas y medias, en algunos casos también depósitos de fragmentos del tamaño de gravas en una matriz de arenas muy gruesas, tal vez producidos durante la época de tormentas y huracanes que provocaron arranques del sustrato rocoso de la laguna y del arrecife, a partir de ahí y hacia el sur de la bahía, se puede observar un zoneamiento en cuanto el tamaño de los sedimentos, esto es, disminuyen su tamaño a arenas medias lo que indica una variación de la energía y evidencia el transporte de los sedimentos con dirección de norte hacia el sur. En general los perfiles de playa son cortos y con pendientes que van de 5° a 10°, en algunos áreas se observó el sustrato de rocas calizas y la contaminación de la acción antrópica evidenciada por tuberías que descargan las aguas negras hacia la bahía y que están cubiertas por piedras, éstas aguas negras, provienen de los hoteles y residencias de particulares, ésta acción es muy común en la zona (la mayoría de las construcciones pertenecen a personas de origen extranjero). Ésta bahía debería corresponder con una zona de depósito o acumulación, o por lo menos a una zona de equilibrio sedimentológico, sin embargo, por lo ya mencionado, ésta presenta indicios de erosión marina muy avanzada.

4.1.4 Tulum (playas)

a) Desnivel topográfico del perfil de playa

La zona de playas de Tulum se encuentra situada a aproximadamente 65 Km. hacia el suroeste de la ciudad de Playa del Carmen, y se puede acceder a ella por la carretera federal No. 307, que va de Cancún a Chetumal. Las playas de Tulum: playa Paraíso y playa Cafeto objeto de del presente estudio, se localizan a 7 Km. aproximadamente del centro de la ciudad de Tulum. En cuanto a su morfología, ésta presenta una forma litoral lineal abierta muy extendida hacia el suroeste, ésta inicia a partir de los escarpados acantilados rocosos de la zona arqueológica de Tulum (ruinas del Castillo Maya) en el noreste, y se prolonga en dirección hacia el suroeste hasta la zona lacustre de Boca Paila, ubicada ésta a aproximadamente 23 Km de distancia. En la línea de costa afloran estratos de roca caliza de la Fm. Carrillo Puerto, En esta área se realizaron tres perfiles de playa los cuales presentan anchuras importantes de aproximadamente 60 metros con pendientes bajas que rondan los 5° de inclinación, existe una zona de dunas que es la que marca el límite de la supraplaya, que es donde inicia la actividad humana con desarrollos turísticos hoteleros de todo tipo (formales y mochilero), muy famosos y socorridos por el turismo internacional; hacia el continente se localizan zonas de manglares y humedales que actúan como escudos protectores contra la actividad de los agentes erosivos naturales (tormentas y huracanes), lo que permite catalogar a el área como de depósito o acumulación de sedimentos arenosos. En la figura 76, se muestra parte de una carta temática (Tulum 1:50,000, INEGI, 1986) la localización de los sitios en donde se localizan los tres perfiles de playa del área de Tulum.

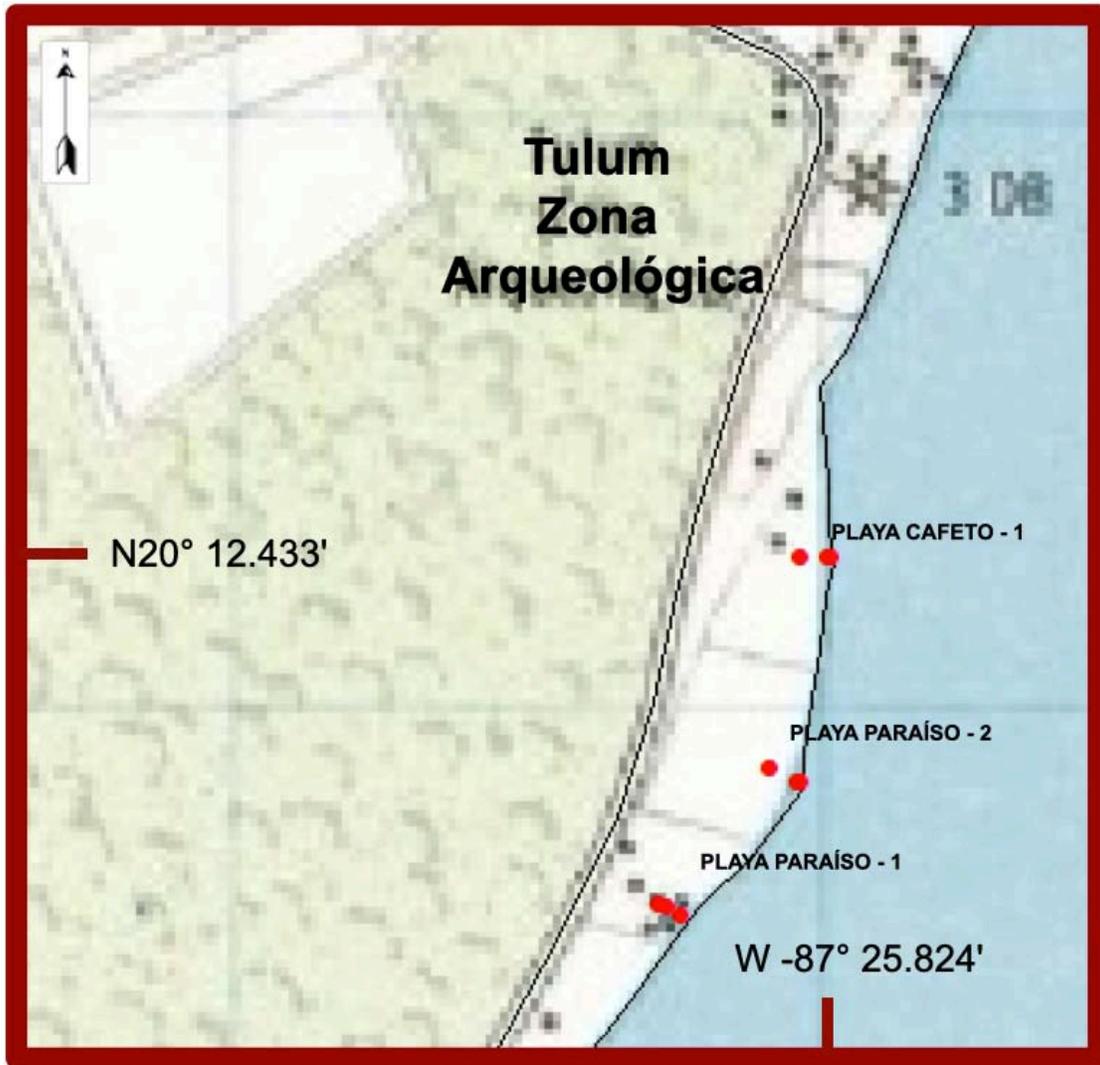


Figura 76. Vista en planta de una carta temática (Tulum 1:50,000, INEGI, 1986) en donde se localizan los sitios correspondientes con los tres perfiles de playa que se realizaron durante el trabajo de campo en la zona denominada como Playas de Tulum.

Perfil de playa PARAÍSO-1

Tabla 29. Datos de localización del perfil de playa PARAÍSO-1.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
PLAYA PARAÍSO - 1	16	I	N20° 12.104'	W -87° 25.972'
	17	M	N20° 12.116'	W -87° 25.983'
	18	S	N20° 12.115'	W -87° 25.992'

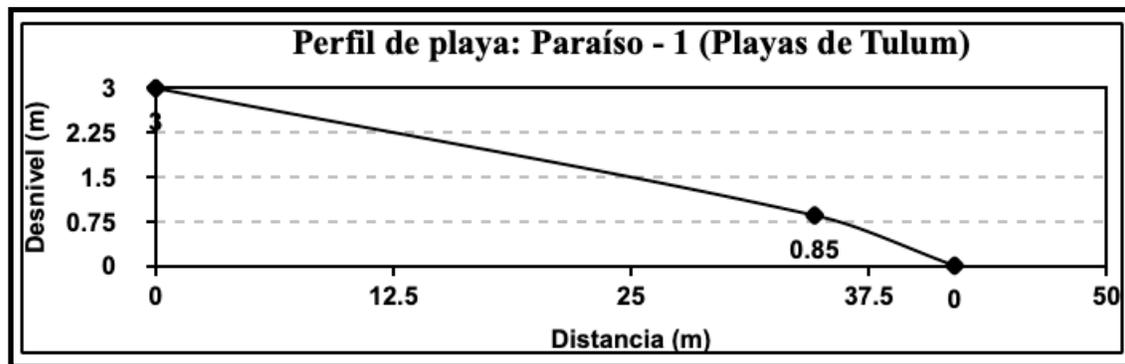


Figura 77. Perfil de playa PARAÍSO -1 (I-M-S).

Playa Paraíso -1

Tabla 30. Descripción general del perfil PARAÍSO -1 (I-M-S).

Nombre del perfil: PARAÍSO -1	
Clave o ID de referencia:	PARAÍSO -1 (I-M-S)
Localización:	Este perfil de playa está ubicado aproximadamente a 1.5 Km. al suroeste de la zona arqueológica de Tulum y sus coordenadas geográficas son las siguientes: (N20° 12.115' y W87° 25.992')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 32°
Anchura:	42.0 metros
Altura:	3.0 metros
Pendiente:	4.08° (Tan ⁻¹ de 0.07142)
Relación con respecto a la línea de costa:	Este perfil de playa presenta anchuras de casi 50 metros y pendientes bajas cercanas a los 5° de inclinación, la actividad antrópica está presente pero en menor cantidad que en otras zonas estudiadas, aún se pueden visualizar algunas zonas de dunas con alturas cercanas a los 4 metros, no se observan afloramientos rocosos ni indicios de erosión, por lo que el diagnóstico del área puede ser considerada como de depósito o acumulación de sedimentos arenosos de finos a muy finos, es muy probable que ésta zona se encuentre en equilibrio con una franca tendencia a la acumulación de sedimentos.
Diagnóstico	Acumulación o depósito



Figura 78. En estas fotografías se observan construcciones relacionadas con el turismo que prevalece en la zona, además de la zona de sotavento de una duna pegada a la playa con una altura cercana a los 4 metros, lo que es indicativo de un depósito sedimentario relacionado con los sistemas de dunas costeros.



Figura 79. En estas fotografías se observan el sitio en donde se realizó el perfil de playa PARAÍSO-1, el cual presenta playas anchas con pendientes bajas, arenas de finas a muy finas, lo que la hace un sitio muy atractivo para la actividad turística nacional e internacional.

Perfil de playa PARAÍSO-2

Tabla 31. Datos de localización del perfil de playa PARAÍSO-2.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
PLAYA PARAÍSO - 2	19	I	N20° 12.227'	W -87° 25.855'
	20	M	N20° 12.229'	W -87° 25.857'
	21	S	N20° 12.240'	W -87° 25.884'

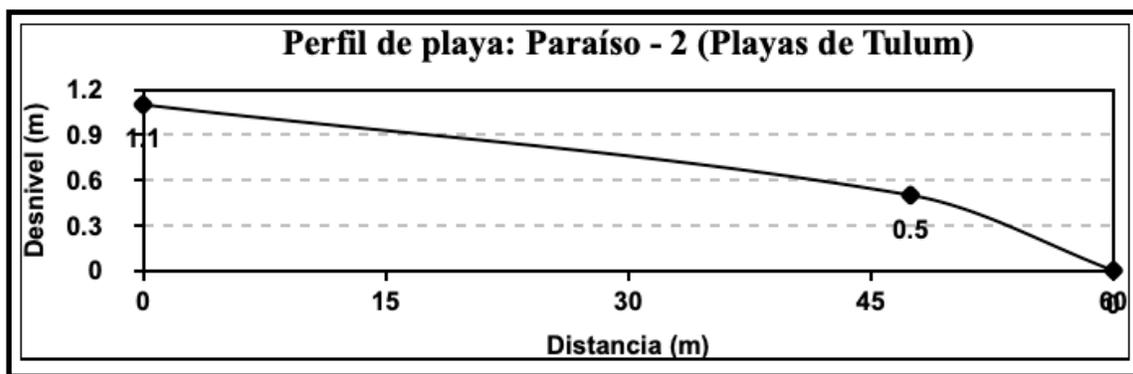


Figura 80. Perfil de playa PARAÍSO -2 (I-M-S).

Playa Paraíso-2

Tabla 32. Descripción general del perfil PARAÍSO-2 (I-M-S).

Nombre del perfil: PARAÍSO-2	
Clave o ID de referencia:	PARAÍSO-2 (I-M-S)
Localización:	Este perfil de playa está ubicado aproximadamente a 750 metros al suroeste de la zona arqueológica de Tulum y sus coordenadas geográficas son las siguientes. (N20° 12.240' y W87° 25.884')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 25°
Anchura:	60.0 metros
Altura:	1.10 metros
Pendiente:	1.05° (Tan ⁻¹ de 0.01833)
Relación con respecto a la línea de costa:	Este perfil de playa presenta anchuras de un poco más de 60 metros y pendientes bajas cercanas a los 2° de inclinación, la actividad antrópica es escasa, aún se pueden visualizar amplias áreas del sistema de dunas con alturas cercanas a los 3 metros, no se observan afloramientos rocosos ni indicios de erosión, por lo que el diagnóstico es el de depósito o acumulación de sedimentos arenosos de finos a muy finos, es una zona de probable equilibrio sedimentológico con una visible tendencia a la acumulación de sedimentos.
Diagnóstico	Acumulación o depósito



Figura 81. En ésta fotografía se puede apreciar la gran amplitud de la playa y la escasa presencia del ser humano en la zona de la playa de PARAÍSO-2, hacia al fondo de la foto se alcanza a observar la zona escarpada de la zona arqueológica de Tulum (El castillo maya).

La playa Paraíso 2 (Fig. 82), presenta un desnivel casi horizontal (pendiente de 2° de inclinación) y una anchura de un poco más de 60 metros, la actividad antrópica en este lugar es ocasional y muy escasa, aún se pueden visualizar amplias áreas correspondientes al sistema de dunas que en algunos casos pueden tener hasta 3 metros de altura, no se observan afloramientos rocosos ni indicios de erosión, por lo que el diagnóstico es de depósito o acumulación de sedimentos arenosos de finos a muy finos, es una zona de probable equilibrio sedimentológico con una visible tendencia a la acumulación de sedimentos.



Figura 82. En ésta fotografía se realizó el perfil de playa PARAÍSO-2, en segundo plano se observa una torre de vigías o de personal de salvaguarda de vidas.

Perfil de playa CAFETO-1

Tabla 33. Datos de localización del perfil de playa CAFETO-1.

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	LATITUD N	LONGITUD W
PLAYA CAFETO	22	I	N20° 12.433'	W -87° 25.824'
	23	M	N20° 12.434'	W -87° 25.829'
	24	S	N20° 12.435'	W -87° 25.855'

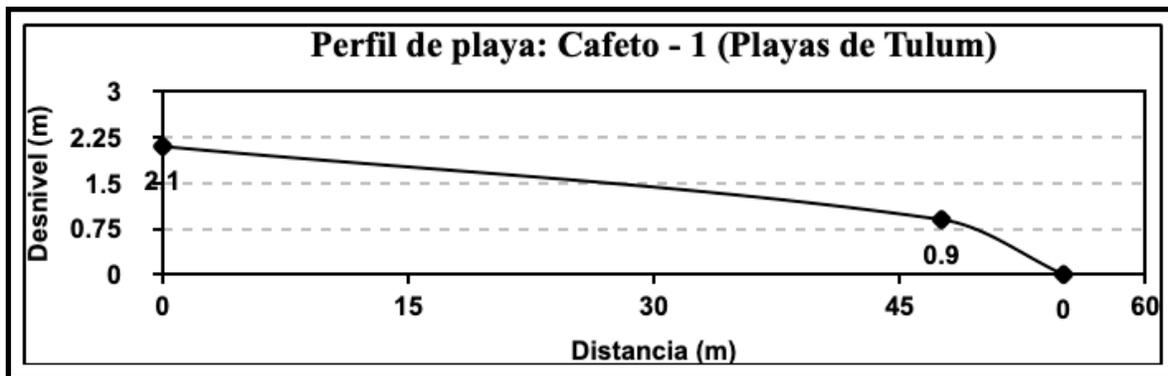


Figura 83. Perfil de playa CAFETO-1 (I-M-S).

Playa Cafeto -1

Tabla 34. Descripción general del perfil CAFETO -2 (I-M-S).

Nombre del perfil: CAFETO -1	
Clave o ID de referencia:	CAFETO -1 (I-M-S)
Localización:	Este perfil de playa está ubicado aproximadamente a 350 metros al suroeste de la zona arqueológica de Tulum y sus coordenadas geográficas son las siguientes. (N20° 12.435' y W87° 25.855')
Orientación del perfil de playa:	NW-SE 04°
Anchura:	55.0 metros
Altura:	2.10 metros
Pendiente:	2.2° (Tan ⁻¹ de 0.03818)
Relación con respecto a la línea de costa:	Este perfil de playa presenta anchuras cercanas a los 60 metros y pendientes muy bajas cercanas a los 2° de inclinación, la actividad antrópica es importante, el sistema de dunas esta parcialmente invadido por la actividad humana (cabañas), pero aún se pueden visualizar amplias áreas de dunas con alturas cercanas a los 3 metros, muy próximo al área estudiada se encuentran los acantilados rocosos de calizas de la Fm. Carrillo Puerto (Plioceno-Pleistoceno) de la zona arqueológica de Tulum, las características sedimentológicas que presenta ésta zona de la playa son de depósito o acumulación de sedimentos arenosos de finos a muy finos, con una visible tendencia a la acumulación de sedimentos.
Diagnóstico	Acumulación o depósito



Figura 84. En éstas fotografías se puede apreciar el sistema de dunas parcialmente invadido por la actividad humana (cabañas), así como también un comercio establecido muy socorrido (fuente de sodas) y al fondo visos del Mar Caribe con su característico color azul turquesa y la amplitud de la playa con baja pendiente.



Figura 85. En la primera fotografía se puede apreciar al fondo el desarrollo de cabañas, y en el primer plano, la importante amplitud de la zona de playa con arenas de finas a muy finas, en la segunda fotografía se observa el acantilado rocoso de calizas de la Fm. Carrillo Puerto de edad Plioceno-Pleistoceno el cual es impactado por la fuerza de las olas que erosionan a la roca. hacia al fondo de la foto se observa la zona escarpada de la zona arqueológica de Tulum (El Castillo Maya).

b) Nomenclatura granulométrica de los sedimentos.

A continuación se presentan los resultados de los análisis granulométricos de las muestras recolectadas en el sitio de **TULUM**, y que contienen la siguiente información:

- a) Parámetros granulométricos
- b) Tamaño grafico promedio M_z (ϕ)
- c) Desviación gráfica inclusiva (ϕ)
- d) Grado de asimetría gráfica inclusiva
- e) Curtosis
- f) Nomenclatura del sedimento

Zona de TULUM

Perfiles de playa: Paraíso-1, Paraíso-2 y Cafeto-1

Tabla 35. Parámetros granulométricos (Playas de Tulum).

PERFIL DE PLAYA	No. DE ESTACIÓN	ZONA DE PLAYA	PARÁMETROS TEXTURALES DE SEDIMENTOS			
			TAMAÑO (Phi)	DESVIACIÓN (Phi)	SIMETRÍA	CURTOSIS
PLAYA PARAÍSO - 1	16	I	2.57	0.46	-0.25	1.22
	17	M	2.26	0.61	-0.30	0.98
	18	S	1.92	0.91	-0.26	0.75
PLAYA PARAÍSO - 2	19	I	2.47	0.53	-0.19	1.08
	20	M	2.31	0.60	-0.09	0.83
	21	S	1.85	0.94	-0.18	1.07
PLAYA CAFETO	22	I	2.51	0.55	-0.32	1.13
	23	M	2.48	0.44	-0.17	1.10
	24	S	2.50	0.60	-0.27	0.70

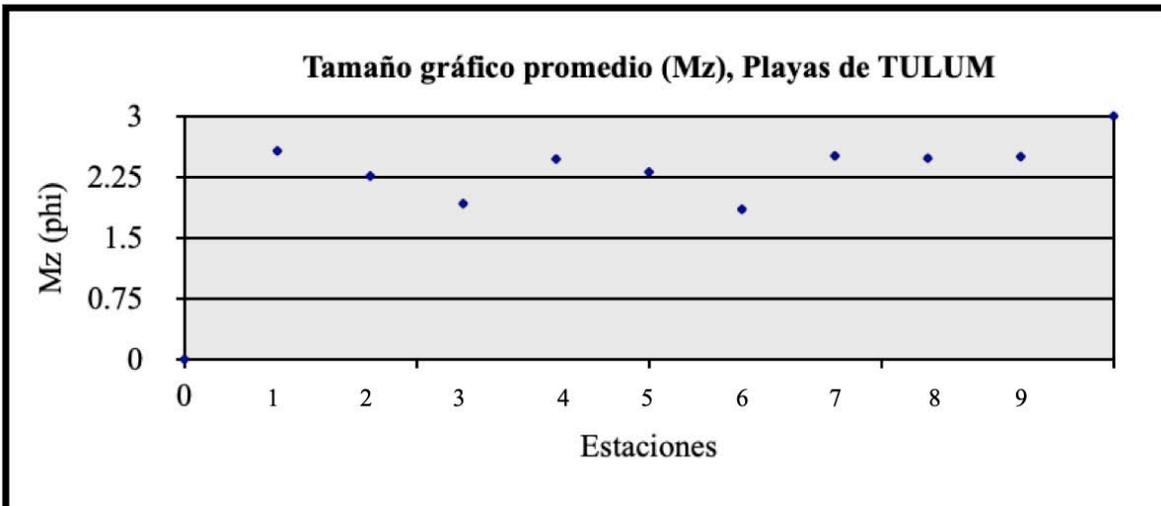


Figura 86. Tamaño grafico promedio Mz (phi)

En la figura se observa que los sedimentos son principalmente arenas finas.

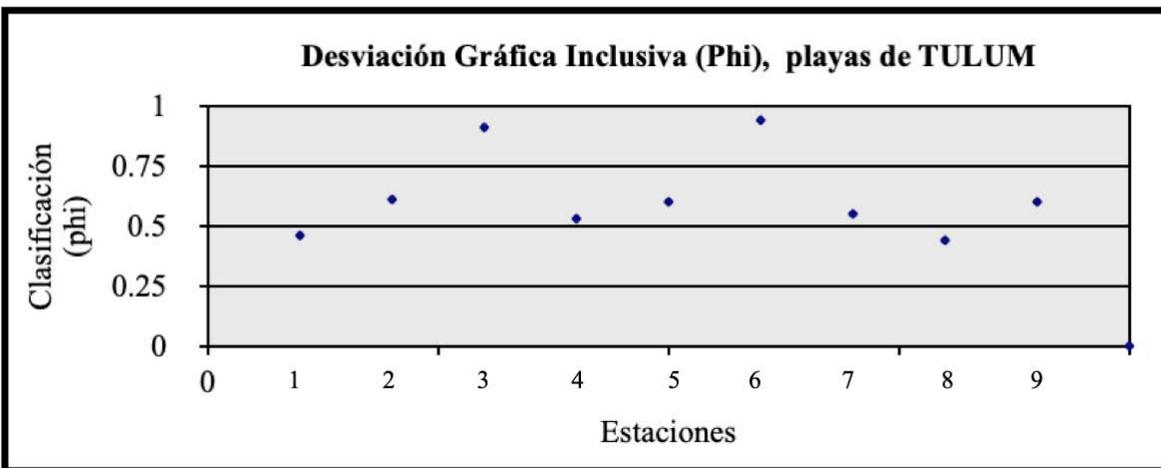


Figura 87. Desviación gráfica inclusiva (phi)

Las arenas finas varían de moderadamente bien clasificadas a bien clasificadas.

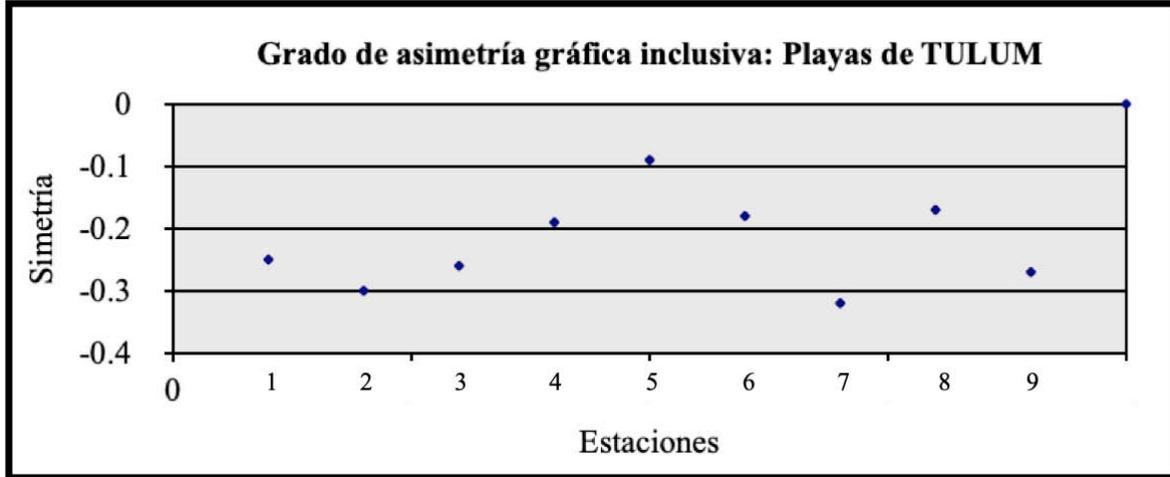


Figura 88. Grado de asimetría gráfica inclusiva

Las arenas medias presentan una asimetría hacia gruesos y después hacia finos.

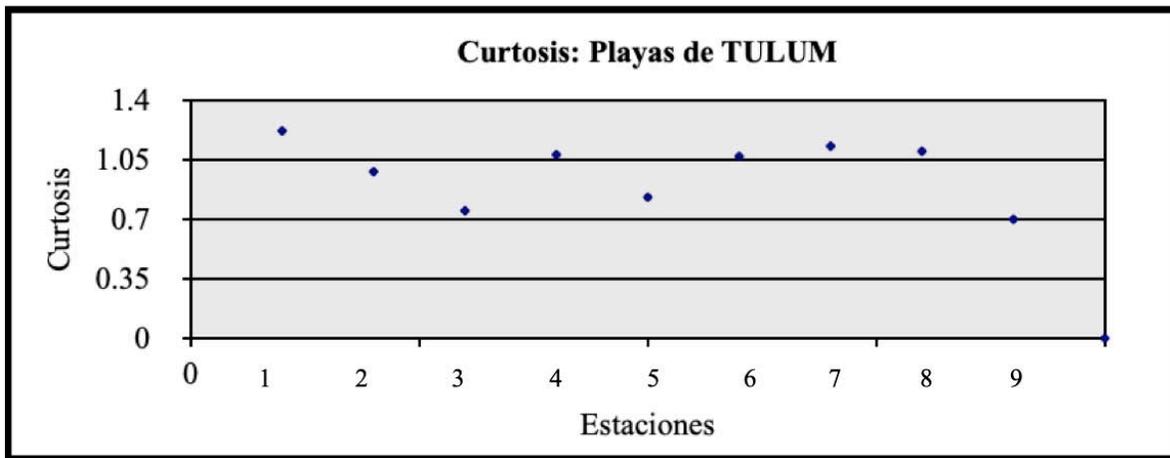


Figura 89. Curtosis

Las arenas presentan una curtosis que varía de leptocúrtica a platicúrtica en la que los sedimentos ya clasificados por la acción del oleaje ahora lo hacen por la acción del viento.

Tabla 36. Nomenclatura del sedimento (Playas de Tulum).

Perfil de playa	No. de Estación	Zona de playa	NOMENCLATURA DEL SEDIMENTO			
PLAYA PARAÍSO - 1	16	I	Arena fina	Bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	17	M	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	18	S	Arena media	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Platicúrtico
PLAYA PARAÍSO - 2	19	I	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	20	M	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia finas	Platicúrtico
	21	S	Arena media	Moderadamente clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
PLAYA CAFETO	22	I	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Muy asimétrico hacia gruesos	Leptocúrtico
	23	M	Arena fina	Bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Mesocúrtico
	24	S	Arena fina	Moderadamente bien clasificado	Asimétrico hacia gruesos	Platicúrtico

Discusión

Con base en los resultados que se presentan en las anteriores gráficas y tablas, se puede concluir que en las playas de la zona de Tulum (perfiles PARAÍSO 1, PARAÍSO 2 y CAFETO 1), la nomenclatura del sedimento se ajusta con arenas finas a muy finas, que van de moderadamente bien clasificadas a moderadamente clasificadas, con una dispersión que es asimétrica hacia los gruesos. Los sedimentos arenosos son transportados en un ambiente de alta energía relacionado con una zona de playa lineal abierta con la presencia de un sistema remanente de dunas de arena y de la presencia de amplias lagunas costeras protegidas por cuerpos arrecifales de tipo barrera.

c) Textura del sedimento

En relación con la textura de los sedimentos en la zona de las playas de Tulum, se obtuvo que predominan las arenas de finas a muy finas, de moderadamente bien clasificadas a moderadamente clasificadas y con una dispersión variable en donde la asimetría se va hacia los sedimentos gruesos, y que presenta varias curvas de distribución (curtosis) lo que indicaría una dinámica variable en cuanto a la energía de transporte de los sedimentos. No obstante, la sedimentación en la zona costera se asocia con los procesos dinámicos que favorecen la acumulación de los sedimentos.

d) Composición del sedimento

Con respecto a la composición de los sedimentos, éstos están constituidos principalmente por material carbonatado (CaCO_3) de origen biogénico relacionado con fragmentos de: moluscos, corales, esponjas, equinodermos, espículas, algas, foraminíferos, etc., al igual que en las otras áreas correspondientes a éste estudio, el lugar de donde provienen los sedimentos calcáreos son las zonas de lagunas costeras y cuerpos arrecifales de tipo barrera que se localizan a lo largo de la línea de costa. Asimismo, con base en los estudios petrográficos se observó que los sedimentos arenosos también están constituidos por biocalcarenitas. (arenas calcáreas con alto contenido biogénico) (figuras 90 y 91).

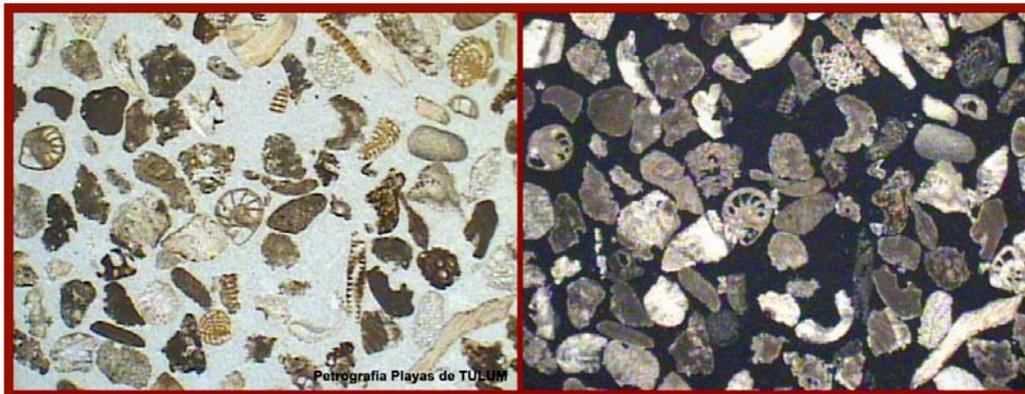


Figura 90. Se presentan dos microfotografías de una lámina delgada de la playa Paraíso 2, de la zona de Tulum, en la imagen se observan testas de foraminíferos, fragmentos de coral y algas. Éstas están constituidas por el mineral calcita (CaCO_3), el cual presenta una alta birrefringencia, (la primer microfotografía fue tomada con luz reflejada y la segunda con luz polarizada con un aumento de 25X).

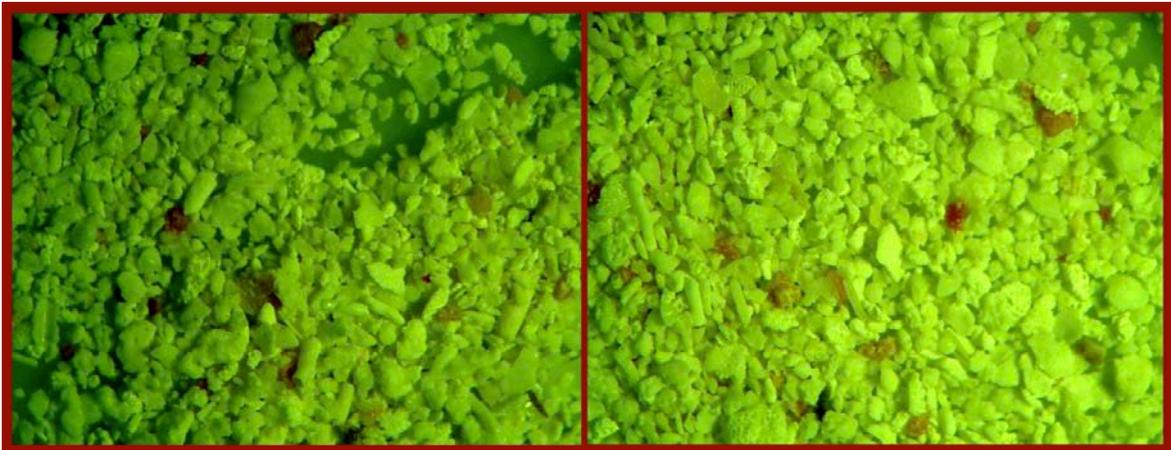


Figura 91. En la siguiente imagen se presentan dos fotografías de una muestra de arenas de la playa Paraíso 2, de la zona de Tulum, éstas presentan fragmentos de corales, moluscos, algas y foraminíferos, éstos organismos conforman a las arenas finas y medianas, moderadamente clasificadas que se clasifican como biocalcarenitas.

e) Transporte de sedimentos y su relación con la morfología de la línea de costa.

Las playas de Tulum se encuentran situadas a lo largo de una línea de costa alargada y abierta, las que inician en la parte norte de la zona con los acantilados escarpados de la zona arqueológica de Tulum (Castillo Maya), éstos acantilados son afloramientos de roca caliza de la Fm. Carrillo Puerto de edad Plioceno-Pleistoceno, los cuales están cubiertos por depósitos litorales de arenas ricas en material biogénico (calcarenitas), los perfiles de playa presentan las siguientes características: son alargados y anchos con pendientes muy bajas (2° de inclinación), y están acompañados por un sistema de dunas remanente en donde algunas de ellas alcanzan alturas de casi 4 metros, el sistema de dunas se encuentra parcialmente invadido por cabañas y negocios que acentúan la actividad antrópica en la zona. Con base en la presencia de pequeñas salientes arenosas hacia el mar y por el aumento de la anchura de los perfiles de playa, se piensa que el transporte de los sedimentos se realiza con dirección de norte hacia el sur. En cuanto al tamaño de los sedimentos, éstos consisten principalmente de arenas finas y medias, e indican una dinámica costera variable (oleaje y viento), pero en donde los procesos de sedimentación están relacionados con la acumulación y el depósito, se puede considerar que la zona se encuentra en condiciones de acumulación y con tendencia a mantener un equilibrio sedimentológico.

4.1.5 Discusión general de resultados.

Con base en los resultados obtenidos a partir de los perfiles de playa y su respectivo análisis granulométrico, se obtuvo información valiosa que permitió contar con la nomenclatura de los sedimentos, aunado a lo anterior, se logró analizar la morfología de la línea de costa con el apoyo de los estudios de imágenes de satélite, ortofotos y fotografías aéreas del área de estudio, con base en dichos análisis, se puede decir que, en donde las geoformas presentan estructuras cóncavas y formas dentadas (bahías, ensenadas, caletas y salientes conspicuas hacia el mar). los procesos dinámicos y sedimentológicos están relacionados con la erosión, y que el transporte de los sedimentos suele realizarse del norte hacia el sur dentro de éstas estructuras locales (Tabla 37), a pesar de que la corriente del *“Atlántico Norte que viene desde el Mar de las Antillas, ésta bordea los litorales del Golfo de México hasta llegar a la Península de Florida, la otra bordea el litoral oriental de Cuba para posteriormente unirse a la primera en la Península de Florida para juntas dirigirse al Atlántico Norte hacia las Islas Británicas”* (Tamayo, 1974) (en Nolasco Montero y Carranza Edwards, 1989), lo anterior debido a que en éstas geoformas la corriente del Atlántico Norte se impacta, y parte de ella se refracta hacia el sur, lo que provoca que la corriente litoral local tienda a desplazarse hacia el sur.

En relación con lo anterior, también se observó, que hay una tendencia de los sedimentos a disminuir en tamaño hacia la zona sur dentro de las geoformas antes mencionadas (con base en la nomenclatura del sedimento), por lo que podría indicarse que la zona de mayor dinámica se localiza hacia las salientes o puntas en la zona norte de éstas estructuras, y que en consecuencia se confirmaría que la tendencia del transporte de los sedimentos se lleva a cabo del norte hacia el sur.

Además, se pudo observar que, en la parte norte del área de estudio (Playa del Carmen, Caleta de Paa-mul) y parte de la zona sur (bahía de Tankah) predominan los procesos de erosión, y hacia la zona sur (playas de Tulum) la sedimentología de la línea de costa está relacionada con procesos de acumulación y depósito. (fig. 92).

En cuanto a la procedencia de los sedimentos, éstos son producidos en la zona lagunar y los sistemas arrecifales (tipo barrera) que se localizan a lo largo del litoral y en la línea costera, así como en el interior de las geoformas estudiadas (bahías, ensenadas, caletas y playas alargadas abiertas). En cuanto a la composición de los sedimentos, éstos están constituidos principalmente por material carbonatado (mineral calcita = CaCO_3) de origen biogénico de

materiales fragmentados de moluscos, corales, esponjas, equinodermos, espículas, algas, foraminíferos, etc., y que con base en los estudios petrográficos se observó que los sedimentos arenosos se clasifican como biocalcarenitas. (arenas calcáreas con alto contenido biogénico). (fig. 93)

Con el material gráfico tomado de algunas playas del complejo PLAYACAR en la ciudad de Playa del Carmen, a manera de ejemplo, se pudo mostrar y constatar que la actividad humana (antrópica) acelera los procesos de erosión (procesos exógenos), y es responsable directa del modelado de las geoformas de la línea costera de la Riviera Maya. (fig. 94).

Tabla 37. Diagnóstico de las playas del área de estudio

LOCALIDAD	PERFIL DE PLAYA	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS			AFLORAMIENTOS	ACTIVIDAD	DIAGNÓSTICO DE LA PLAYA
		ALTURA (m)	ANCHURA (m)	PENDIENTE (°)	ROCOSOS	ANTRÓPICA	
PLAYACAR	REEF - 1	2.34	28	4.78°	NO	MUY ALTA	EROSIÓN
	REEF - 2 (ROCA)	1.84	25	4.2°	SI	MUY ALTA	EROSIÓN
	RUINAS - 1	2.7	27	5.7°	SI	MUY ALTA	EROSIÓN
CALETA PAA - MUL	PAA - MUL	2.7	15	10.14°	SI	ALTA	EROSIÓN
BAHÍA TANKAH	TANKAH - 1	1.05	10.45	5.73°	NO	MUY ALTA	EROSIÓN
	TANKAH - 2	2.2	12.0	10.39°	NO	MUY ALTA	EROSIÓN
	TANKAH - 3	2.55	11.0	12.8°	NO	MUY ALTA	EROSIÓN
	TANKAH - 4	3.36	13.0	14.49°	NO	MUY ALTA	EROSIÓN
	TANKAH - 5	3.7	14.0	14.80°	NO	MUY ALTA	EROSIÓN
TULUM	PLAYA PARAÍSO - 1	3	42	4.08°	NO	ALTA	ACUMULACIÓN
	PLAYA PARAÍSO - 2	1.1	60	1.05°	NO	MEDIA	ACUMULACIÓN
	PLAYA CAFETO	2.1	55	2.2°	NO	ALTA	ACUMULACIÓN

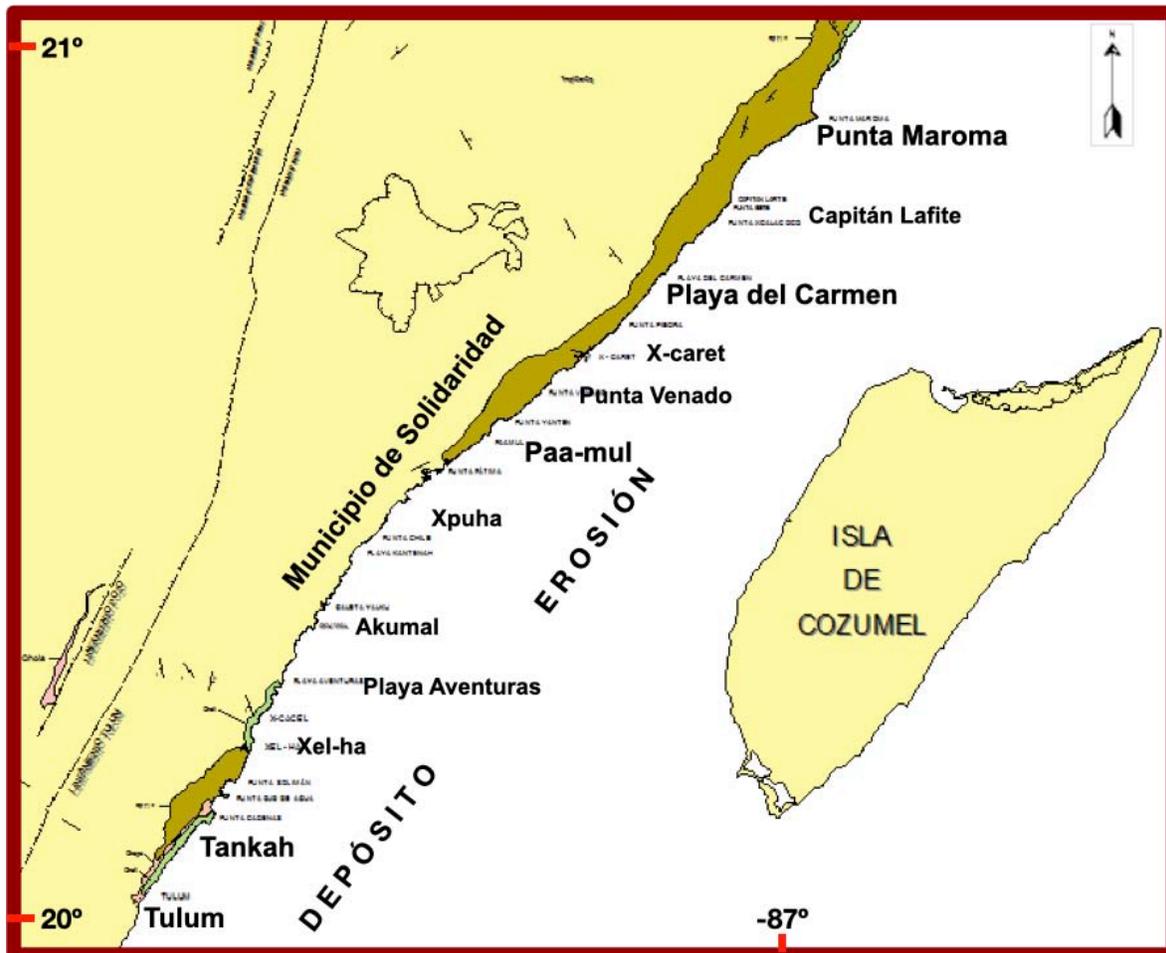


Figura 92. En esta figura se encuentra representada la línea de costa del área de estudio (Playa del Carmen-Tulum), en ella se indica que en la parte norte predominan los procesos relacionados con la erosión marina y hacia el sur se presentan zonas de depósito y acumulación.



Figura 93. En la imagen se observan microfotografías de la composición de los sedimentos (Ejemplo, la punta norte de la Bahía de Tankah), la cual está constituida principalmente por material carbonatado (Calcita = CaCO_3) de origen biogénico relacionado con fragmentos de moluscos, corales, esponjas, equinodermos, espículas, algas, foraminíferos, etc.

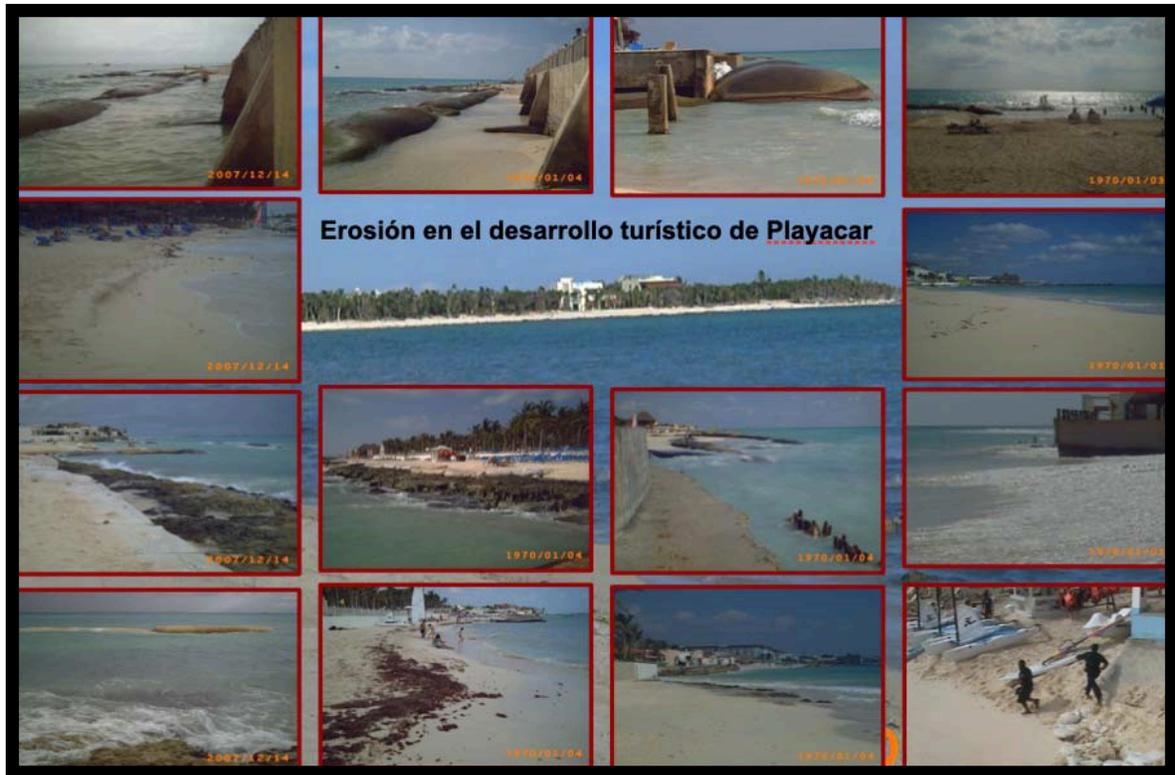


Figura 94, En la imagen se presentan algunas playas del complejo PLAYACAR correspondientes a la ciudad de Playa del Carmen, en donde se muestran los efectos causados por los procesos de la erosión y la actividad humana (antrópica), el cual es solo un ejemplo de la devastación ecológica y morfológica de la línea costera de la Riviera Maya, en el estado de Quintana Roo, México.

5. Conclusiones y recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos a partir de los análisis de los perfiles de playa, la nomenclatura granulométrica de los sedimentos, la composición y textura del sedimento y el transporte de sedimentos y su relación con la morfología de la línea de costa, se observó lo siguiente:

1. Que 3 de la 4 zonas estudiadas (Playacar en Playa del Carmen, Caleta de Paa-mul y la parte centro norte de la Bahía de Tankah) predominan los procesos de erosión, y solamente en una (Tulum) el proceso que se observó fue el de la acumulación y el depósito de los sedimentos.
2. Hacia la zona de Playacar, en sus playas, predominan las arenas de medianas a finas con perfiles de playa cortos y con desniveles con pendientes que varían de los 5° a los 10° de inclinación. Mientras que en la caleta de Paa-mul las arenas son de gruesas a muy gruesas con perfiles de playa cortos y pendientes de hasta 10° de inclinación. En la bahía de Tankah, se observó que hacia la punta norte los depósitos de sedimentos son arenas gruesas y medias, y que éstas disminuyen en tamaño hacia el sur (arenas medias), lo que mostraría una disminución del tamaño de los sedimentos en la dirección sur y en donde predominan los efectos de la erosión. Sólo en la zona de Tulum es muy evidente el predominio de las arenas finas con perfiles de playa amplios y pendientes de hasta 2° de inclinación, lo que indica una dinámica que genera la acumulación y el depósito.
3. La composición de los sedimentos es principalmente de carbonato de calcio (CaCO_3), y es de origen biogénico, principalmente conformado por foraminíferos, gasterópodos, moluscos, corales, espinas de equinodermos y de esponjas, tubos de anélidos, ostrácodos y algas, éste material carbonatado proviene de la zona lagunar y de las estructuras arrecifales que forman parte a nivel regional del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM).
4. Las bahías, las ensenadas y las caletas (geoformas) son lugares en donde la corriente del Atlántico Norte se impacta para posteriormente continuar su camino hacia el norte (Golfo de México), pero de manera local, ésta se refracta hacia el sur, lo que provoca que la corriente litoral local tienda a desplazarse en esa dirección (hacia el sur), y con ello también el transporte de los sedimentos.
5. Se observó que los procesos de erosión que afectan a la zona de estudio se deben en gran medida a los procesos naturales (Huracanes, tormentas, efectos del oleaje y la marea), y también a la gran actividad humana (antrópica), la cual no tiene visos de disminuir, todo lo contrario, se verá incrementada por el fomento al desarrollo de las actividades turísticas y a la infraestructura relacionada con la construcción del Tren Maya, así como a la mala gestión administrativa de la zona costera que prevalece en la Riviera Maya.

6. Además, habría que agregar los efectos del calentamiento global y con ello el ascenso del nivel del mar con sus respectivas consecuencias (transgresiones y regresiones marinas).

Recomendaciones:

1. Se recomienda fomentar este tipo de estudios en las zonas de la línea de costa en donde nunca se han realizado.
2. Continuar con monitoreos de las zonas ya conocidas con la finalidad de contar con mayor información, con el propósito de obtener diagnósticos más precisos en cuanto al estado que guarda la zona litoral.
3. Realizar una mejor gestión administrativa de la zona litoral con base en los diagnósticos obtenidos de la dinámica y la sedimentología de la línea de costa.
4. No otorgar permisos sin previos estudios de impacto ambiental en la zona litoral, ya que la construcción de marinas, escolleras, explotación de materiales, etc., podrían interferir y afectar el transporte de los sedimentos, además, de que se verían afectadas zonas naturales muy vulnerables.

Bibliografía

Carranza-Edwards A, Márquez-García. A.Z, Tapia-Gonzalez. C.I, Rosales-Hoz. L, Alatorre-Mendieta, M.A., 2015, "Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste", Boletín de la Sociedad Geológica mexicana Volumen 67, Núm. 1, paga. 21-43.

Chávez, E. A. y E. Hidalgo, 1988. Los arrecifes coralinos del Caribe noroccidental y Golfo de México en el contexto socioeconómico. Anales del Instituto de Ciencia del Mar y Limnología, UNAM. 15:167-176.

Castro (1976); Descripción de las arenas carbonatadas y de su ámbito submarino al noreste de la Península de Yucatán.

Folk, R.L., 1980, Petrology of Sedimentary rocks: Austin, Texas, Hemphill Publishing Co.,182 p.

Folk R. L., 1973. Petrología de Rocas Sedimentarias. Hemphill Publisher, 373 p.

Garrison. T., (2007), "Oceanography, An Invitation to Marine Science",Ed. Thomson Brooks-Cole, Sixth Edition.

González, A., Torruco, D., Torruco, A.D., 2017, "Las playas arenosas de Quintana Roo, México": La diversidad de su fauna intermareal, Revista de Biología Marina y Oceanografía, Vol. 52, N°2: 361-373, agosto 2017

Guido-Aldana, P., Ramírez-Camperos A., Godínez-Orta, L., Cruz-León, S., Juárez- León., A.; "Estudio de la erosión costera en Cancún y la rivierra Maya, México.", 2009.

Habib Galindo,D.A., 2017, "Análisis sedimentológico, petrográfico y geoquímico en playas de la Riviera Maya", Tesis profesional Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Jordan-Dahlgren (1993), "Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe mexicano". Parte I. En la cual se hace una caracterización ecológica y sedimentológica de la barrera arrecifal incluyendo el área de Akumal.

Krumbein, W.C. and Sloss, L.C., 1963. Stratigraphy and Sedimentation, W.H. Freeman company, San Francisco, 660p.

Márquez *et al*, (2000), Morfología y sedimentología del sistema arrecifal y litoral de la bahía Akumal

Márquez-García, A.Z. y Pérez-Aguilar, V, 2000, Geomorfología y Sedimentología de la zona arrecifal de la Bahía de Akumal, Quintana Roo. XII Congreso Nacional de Oceanografía, 22-26 de mayo del 2000, Huatulco, Oaxaca, Méx. Pág. 245.

Márquez García, A.Z., Guerrero Herrejón, Ma. A., Pérez Aguilar, V. y Zepeda Carrión S. Morfometría y sedimentología. *In* Díaz-Ruiz, S., 2002.

Márquez-García, A.Z; Campos-Verduzco, R.; Castro-Soriano, B.S. “Sedimentología y morfología de la playa de anidación para tortugas marinas, El Carrizal, Coyuca de Benítez, Guerrero”, *Hidrobiológica*, vol. 20, núm. 2, agosto, 2010, pp. 101-112, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Distrito Federal, México.

Martínez-Rivera, Wiliam; Ordaz-Hernández, Alexis; Garatachia-Ramírez, Juan Carlos “Evolución de la línea de costa de la península de Yucatán entre 1980 y 2019: potencial fuente de riesgo socionatural”, *Minería y Geología*, vol. 36, núm. 4, 2020.

Medina-Ávila. J.J. (2021), *Petrología General*, notas de clase, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Merino-Ibarra, M. 1984, ASPECTOS DE LA CIRCULACION COSTERA SUPERFICIAL DEL CARIBE MEXICANO CON BASE EN OBSERVACIONES UTILIZANDO TARJETAS DE DERIVA, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Contribución 470 del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

Merino-Ibarra y Otero-Dávalos (1991), *Atlas Ambiental Costero*. Puerto-Morelos, presentan la Geología superficial de la Península de Yucatán.

Montes de Oca, M., *TOPOGRAFIA*, Ed. Alfaomega, Facultad de Ingeniería UNAM. Enero de 2015

Nolasco Montero y Carranza Edwards (1989), *Estudio sedimentológico regional de las playas de Yucatán y Quintana Roo*.

R. Bello M., J.E. Aguayo C., M.A. Bazañez, M.A. Del Vecchio, Juan Araujo Mendieta, Tomo 41, No. 3-4, 1980, *Estudio sedimentológico en el Área Tulum–Cancún–Isla Mujeres*, Estado de Quintana Roo.

Ruiz Martínez, G., Silva Casarín, R., Mendoza Baldwin, E., 2006, *Caracterización Geomorfológica de la Línea de Costa del estado de Quintana Roo, México (caso Cancún)*, XIX CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA, CUERNAVACA, MORELOS.

www.semarnat.gob.mx/yucatán

www.alamy.es

(<http://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/exploracionminas/wp-content/uploads/2020/04/APUNTES-Introducción-Muestreo-Datos.pdf>)

Imágenes de satélite y cartografía temática.

SAHOP, 1981, Ordenamiento del Territorio del Estado de Quintana Roo, Plan Estatal de Desarrollo Urbano, Imagen de satélite LANSAT , escala 1:500,000

INEGI, 1996, Espaciomapa Estatal de Quintana Roo, construido con imágenes LANSAT, escala 1:600,000, 1ra. Edición.

INEGI, 16-julio-1996, Espaciomapa Cozumel-Playa del Carmen, escala 1:250,000, última actualización.

Imagen satelital QuicBird, 2005, etm0403-EarthSat-Orthorectified

Cartografía temática:

INEGI, 2002, Imagen digital de la carta topográfica F16C79 AKUMAL Quintana Roo, escala 1:50,000, 2da. Edición.

INEGI, 2002, Carta topográfica F16-D71 COZUMEL Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 2002, Carta topográfica F16-D61 SAN JOSÉ Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 1986, Carta topográfica F16-C88 TULUM Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 2004, Carta topográfica F16-C78 XEL - HA Quintana Roo, escala 1:50,000, 2da. Edición.

INEGI, 2002, Carta topográfica F16-11 COZUMEL, Quintana Roo y Yucatán, escala 1:250,000, 2da. Edición.

INEGI, 1986, Carta topográfica F16-C69 PLAYA DEL CARMEN, Quintana Roo y Yucatán, escala 1:250,000, 2da. Edición.

INEGI, 2004, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C69C, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2004. (f16c69c_orto_r15_i92)

INEGI, 2004, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C69E, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2004. (f16c69e_orto_r15_i92)

INEGI, 2001, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C78F, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2001. (f16c78f_orto_r15_i92)

INEGI, 2004, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C69F, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2004. (f16c69f_orto_r15_i92)

INEGI, 2004, ORTO-FOTO DIGITAL F16-C79A, fotografías aéreas Escala 1:40,000, marzo de 2004. (f16c79a_orto_r15_i92)

INEGI, 1988, Carta topográfica F16-D41 CANCUN, Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 1987, Carta topográfica F16-D51 PUERTO MORELOS, Quintana Roo, escala 1:50,000, 1ra. Edición.

INEGI, 1998, Carta Condensado Estatal QUINTANA ROO, escala 1:700,000, 1ra. Edición.

INEGI, 1998, Carta Condensado Estatal YUCATAN, escala 1:500,000, 1ra. Edición.

CONABIO, 2002, “MÉXICO, Imagen Desde el Espacio”, Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, Mosaico 2002 de imágenes Modis sin nubes del satélite Terra , bandas 1, 4, 3, (RGB), resolución espacial 250 metros, sobre un modelo digital del terreno.

SGM, 2006, Carta Geológico-Minera, F16-11 COZUMEL, Quintana Roo y Yucatán, Secretaría de Economía, Escala 1:250,000, 1ra. Edición.

CNP, 2000, GULF OF MEXICO EXPLORATION MAP, Escala 1: 5,000,000

Fotografías aéreas

DETENAL, 1982, Fotos Aéreas de “PLAYA DEL CARMEN”, Quintana Roo (R-5 L-1 F-1 al 7) Mayo de 1982.

INEGI, 1991, V. E. COSTA PUERTO MORELOS - TULUM, Quintana Roo, (R-6 / 3 / 91) Escala 1:75,000 D.F. 151.96 MAR/91 L -1 No. 13 al 27 (14 fotos)

INEGI, mayo de 1982, Playa del Carmen, Quintana Roo, R-5 Línea 1F, fotos 01 a 07, escala 1:35,000

INEGI SINFA, febrero de 2005, clave F16D61 R-1769/06, Línea 547, foto 0003, escala 1:40,000