

CAPÍTULO II. “EL SUBSUELO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN”

II.a EL SUBSUELO EN LA GEOGRAFÍA ACTUAL

En el capítulo anterior se estudiaron las actividades kársticas que dieron la geomorfología actual al subsuelo de la península, los párrafos siguientes enfatizan el tipo de materiales formados a lo largo de la era Cenozoica, ubicándolos en la geografía actual de la Península de Yucatán, es decir se estudiara el subsuelo tal como se encuentra en nuestros días.

Recordando del capítulo anterior, el denominado periodo Paleoceno incluye provisionalmente aquellas unidades litológicas que por falta de fósiles característicos es imposible datar con seguridad dentro del periodo Eoceno, aunque parecen de edad Eocénica, sin excluir la posibilidad de que correspondan al Paleoceno. Aflora en tres regiones, una abarca la región de la sierra de Yucatán, otra ocupa la porción limitada al norte por la formación Chichén Itzá, al oeste por la formación Estero Franco, al este por la formación Icaiché en el territorio de Quintana Roo, y la tercera que se extiende desde el poblado de Hopelchén en el estado de Campeche hasta penetrar en Petén, Guatemala; esta última la litología es muy semejante a la de la formación Icaiché, distinguida por la ausencia de yeso; no se ha precisado su espesor.

En el Eoceno (52 a 36 millones de años) un proceso orogénico (formación de las montañas) en el sur de la Península plegó los recién formados estratos de calizas y produjo un relieve ondulado, esta representado actualmente por una secuencia de dos formaciones: Chichén Itzá e Icaiché.

La formación de Chichén Itzá comprende casi todas las rocas eocénicas de la Península, su conjunto se ha dividido en los miembros Chumbéc, Pisté y Xbacal.

El miembro Chumbéc abarca una zona muy limitada al norte del poblado Libre Unión en el estado de Yucatán; los microfósiles que en ellos se han encontrado lo sitúan en la parte superior del Eoceno Medio y el Eoceno Superior, sus estratos están constituidos por calizas blancas, cristalinas, macizas con aspecto de mármol, de textura sacaroide (similar a los granos de azúcar) (Fig. 1), su espesor probable es inferior a los 100 m.



Fig.1 Calcita (caliza blanca, cristalina)

El miembro Pisté se extiende en la parte central y centro occidental de la Península; aflorando también al sur de Champotón y al norte de Belice. Su microfauna es típica del Eoceno Medio, los estratos superiores de este miembro son los más fosilíferos y están representados por calizas blancas en capas de 10 a 40 cm, generalmente compactas y a veces cretosas (roca con cal que cristaliza amorfa)(Fig. 2). Por debajo se encuentran capas gruesas de calizas de color blanco amarillento, los niveles inferiores contienen pocos fósiles y son calizas criptocristalinas o microcristalinas (rocas cuyas partículas o cristales son observables solamente a grandes aumentos o rayos X), amarillas y compactas en capas gruesas; el espesor de este miembro puede alcanzar varios centenares de metros.



Fig.2 Caliza fosilífera

El miembro Xbacal se extiende al norte de Escárcega, encontrándose principalmente con los cortes de la carretera Champotón-Escárcega. Esta formado por calizas blancas, grises y amarillas, de espesor bajo a medio; a veces se encuentran capas delgadas de calizas blandas y de verdaderas margas (compuestas principalmente de caliza y arcilla) amarillas, lutitas verdosas (la lutita es una roca detrítica, es decir, formada por detritos, y está integrada por partículas del tamaño de la arcilla y del limo.) (Fig. 3). Sus estratos están mas intensamente plegados que los de los miembros más recientes de esa formación Chichén Itzá, alcanzando echados de 20° (Fig.4); la microfauna de este miembro es característica del Eoceno Inferior y su espesor puede alcanzar varios cientos de metros.



Fig.3 Lutita Marga



Fig. 4 Lutita Arcillosa



Fig. 4 Echado de roca caliza

La formación Icaiché aflora al sur de la Península en una franja orientada de Norte a Sur, extendiéndose desde el poblado de Chumul en el estado de Campeche, hasta la región del Petén en Guatemala. Está compuesta por calizas, predominando el amarillo-crema y el blanco, de textura microcristalina a megacristalina en las que es frecuente existe dolomitización (presencia de magnesio, Fig.5) y silicificación secundaria (reemplazamiento de carbonatos por sílice, Fig. 6). Los procesos diagenéticos (diagénesis: Transformación de materiales sedimentarios en rocas, al consolidarse por efectos de los procesos de cimentación, compactación y recristalización) probablemente son la causa de la pérdida de los vestigios de la fauna de esta formación, ya que en pocos casos se encuentran restos de foraminíferos (protozoos rizópodos acuáticos, casi todos marinos, Fig.2), de moluscos y de algas. Es característica de esta formación la presencia de yeso que forma bancos de varios metros de espesor. Algunos autores sitúan esta unidad estratigráfica en el Mioceno Inferior, y otros en una porción indeterminada entre el Eoceno y el Paleoceno.



Fig. 5 Dolomitización de la caliza



Fig. 6 Silicificación de roca caliza

En el Oligoceno no existen afloramientos de formaciones porque no se depositaron o porque siendo muy delgadas se erosionaron (Fig. 7), sin embargo existen referencias que señalan la existencia de dos zonas al sur de la Ciudad de Mérida donde el Oligoceno aflora entre las formaciones de Chichén Itzá y Carrillo Puerto, además es importante considerar que en los cortes estratigráficos de perforaciones profundas efectuadas al norte de estas zonas, la columna del Terciario aparece completa.



Fig. 7 Erosión de roca caliza



Fig. 8 Caliza Carbonatada

En el primer capítulo se mencionó que durante el Mioceno y Plioceno se originaron dos sistemas de fracturas: uno con orientación NE-SO cuyas expresiones se observan a lo largo del cauce del río Hondo; y otro con orientación NO-SE a lo largo de la “Sierrita de Ticul”. Durante el Mioceno Medio, la Península de Yucatán experimentó un hundimiento que favoreció la posterior precipitación de carbonato de calcio (Fig. 8) durante el Plioceno, conformando su porción septentrional.

El Plioceno-Mioceno superior comprende las formaciones Carrillo Puerto, Estero Franco y Bacalár.

La formación Carrillo Puerto (formación donde se ubican los ejemplos de cimentaciones de los capítulos consiguientes) ocupa la mayor parte del territorio de Quintana Roo y aflora también en Yucatán y Campeche. Los estratos superiores que afloran en el tramo de carretera comprendido entre Peto y Carrillo Puerto son de calizas duras, de color blanco y amarillo claro, con niveles arenosos debajo de los cuales se encuentran calizas arenosas menos duras, que van de un tono amarillento a amarillo-rojizo, alternadas algunas veces por margas amarillas, arenas y areniscas (Fig. 8). Los estratos inferiores están representados por coquinas (Fig. 9) (compuestos principalmente por caparazones calcáreos de organismos marinos) de menos de 1m de espesor, recubiertas por una capa dura de roca caliza amarillenta, con moluscos y otros tipos de fósiles marinos.



Fig. 8 Arenisca



Fig. 9 Coquina

La formación Estero Franco aflora en la mayor parte del curso del río Hondo y en algunos cortes aislados entre los kilómetros 21 y 40 de la carretera Chetumal- Escárcega. Ésta formación está compuesta por calizas y dolomitas macizas de color blanco-rosa en niveles superiores y en estratos inferiores son amarillas muy cristalinas, a veces con nódulos de calicita de texturas sacaroide y en capas regulares de 5 a 10 cm de espesor. A la altura del kilómetro 21 de la carretera Chetumal-Escárcega, las calizas de esta formación presentan plegamientos muy pronunciados con eje en dirección NO-SE; el espesor de esta formación puede llegar a 100 m, no presenta fósiles, excepto algunos foraminíferos no identificables; su edad exacta es incierta por la misma ausencia de fósiles pero su posición estratigráfica sobre la Formación Bacalar indica que por lo menos es contemporánea a la formación Carrillo Puerto.

La formación Bacalar se extiende desde Belice hasta la parte sureste del Territorio de Quintana Roo, comprendiendo la región donde están situados Chetumal y Bacalar. Esta constituida por calizas cretosas de consistencia semejante a la del sascab (roca caliza no consolidada Fig. 10) de color blanco o amarillento, en las que se encuentran a veces intercalaciones de yeso y nódulos de calizas duras; la alteración de estas calizas da lugar en la superficie a un material duro de color gris-negro a veces laminar, los fósiles de esta formación la sitúan en el Mioceno Superior. Como el sub-basamento de esta formación se desconoce no se ha podido precisar su espesor exacto; en niveles inferiores estas calizas son ligeramente margosas (Roca marga: Roca más o menos dura, de color gris, compuesta principalmente de carbonato de cal y arcilla en proporciones casi iguales).



Fig. 10 Extracción de sascab en Playa del Carmen

En el Holoceno-Pleistoceno los materiales correspondientes a esta edad están constituidos por coquinas con escasa matriz calcárea criptocristalina de color crema, con abundantes fragmentos de fósiles de moluscos (Fig.9). Se extienden desde Campeche en la costa occidental, hasta el poblado de Chacmuhuch, cubriendo la costa norte en su totalidad, además desde Champotón hasta las inmediaciones de la laguna de Términos, extendiéndose una faja costera de coquinas semejantes; los cordones litorales incluidos en esta unidad están cubiertos por arena cuyo espesor es variable, alcanzando hasta 3 ó 4 m.

II.b SISTEMA CARSO-TECTÓNICO

Este subtítulo conlleva a investigar las etapas evolutivas del paisaje Carso-tectónico en la península de Yucatán, es decir la afectación por tectonismo y karst del paisaje actual de la Península de Yucatán (Fig. 11).

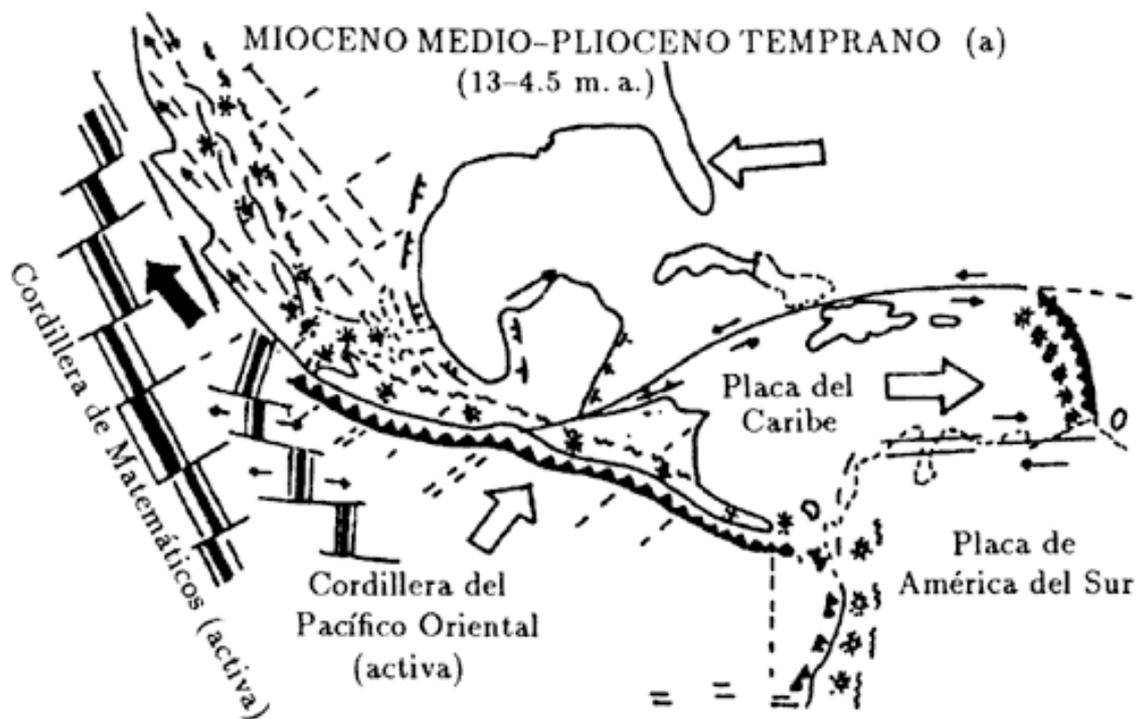


Fig. 11 Tectónica Actual de la Península de Yucatán

El relieve cárstico ya estudiado en el capítulo anterior se debe a la actividad de la disolución por aguas subsuperficiales y subterráneas de rocas solubles tales como caliza, dolomita, yeso, evaporitas y sal comunes de la región. El karst previamente estudiado, se desarrolla en zonas húmedas sobre superficies de estructura tubular y/o subhorizontal, como el caso de pliegues braquianticlinales (de forma ondulada o poco alargada.), mesetas y terrazas estructurales.

Este es el sistema más representativo de la Península y se le ha denominado Carso-tectónico por la estrecha correspondencia entre la actividad geotectónica y los patrones de disolución que dan origen al modelado cáustico. El relieve en su conjunto es considerado del tipo karst de mesa por el predominio de estructuras tabulares monoclinales y se organiza en una serie de planicies estructurales a diferentes niveles altitudinales a 50, 100 ,200 y más de 200 msnm (metros sobre el nivel del mar).

Se puede observar en la Fig. 11 que la Península es afectada tectónicamente por la Cordillera del Pacífico oriental (Placa de Cocos) y la placa del Caribe, sin embargo se ve que estas no afectan de manera significativa el norte y centro de la Península, haciendo presencia la actividad tectónica en el sur, específicamente en las colindancias con Guatemala y Belice y en la zona del Istmo de Tehuantepec en las colindancias con el estado de Chiapas, correlacionando la Fig. 12 se puede confirmar que la Península de Yucatán prácticamente se mueve dentro de la Placa del Caribe, teniendo como consecuencia poca actividad tectónica dentro de la misma Península, salvo las regiones limítrofes de la placa del caribe ya mencionadas.

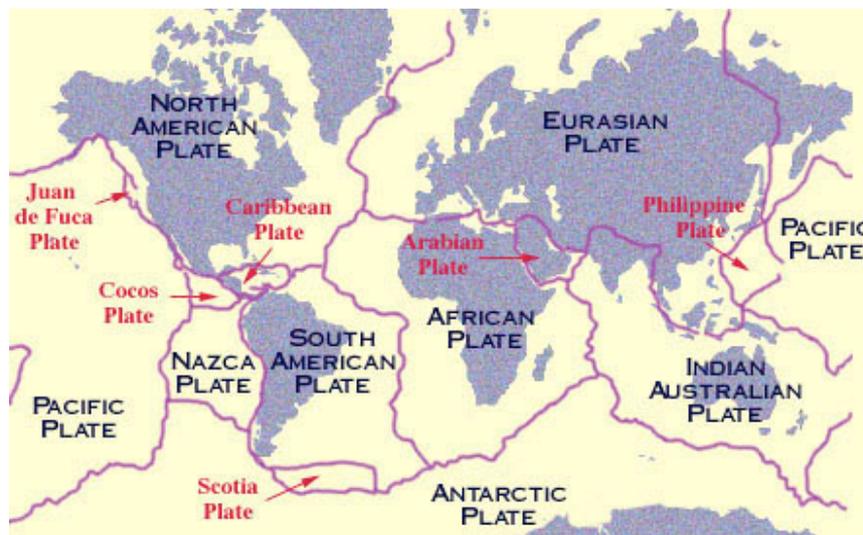


Fig. 12 Placas Tectónicas

En la Península de Yucatán se pueden diferenciar dos grandes subregiones, una al norte y otra al sur: En el norte predominan superficies niveladas durante el Cuaternario resultado de transgresiones y regresiones del Pleistoceno, por lo cual el relieve kárstico es reciente, predominando planicies estructurales denudativas y de disolución. En la subregión sur existen levantamientos tectónicos desde el Mioceno (hace 24 millones de años) por lo que se presenta un relieve de lomeríos en cúpulas y planicies residuales resultado de un mayor grado de karsticidad.

Para hacer más clara esta relación de grado de karsticidad-expresión morfológica, se utilizan interpretaciones de los modelos empleados por los autores Grund (1914) y Cvijic (1918) que denotan cuatro etapas generales de evolución (Fig.13) que muestran una evolución lineal que puede ser modificada por diferentes grados y estilos de actividad tectónica así como sus correspondientes condicionantes exógenas, reguladas por los factores ambientales.

El manto freático en la Península de Yucatán en promedio se encuentra a 35 m de profundidad; debido a esto la principal forma de aprovechamiento del agua es mediante pozos con bombas de extracción tipos turbina y sumergibles. La alta permeabilidad de los carbonatos se refleja en los bajos gradientes de la tabla de agua; en algunos lugares de la Península el nivel freático se encuentra a 100 m por debajo de la superficie, haciendo la explotación del agua aún mas difícil y por ende demasiado costosa. El agua predominante es del tipo cálcica-magnésica-bicarbonatada, procediendo los dos primeros elementos de la disolución de los carbonatos que constituyen las rocas calcáreas.

En la porción de lomeríos se manifiestan alturas de 250 msnm en su parte sur, la permeabilidad del medio es muy alta y ha sido detectada a través de los pozos existentes, registrándose abatimientos pequeños (CNA, 1995). La región sureste está representada por lomeríos continuos de pendiente suave, tendiendo a formar amplias planicies que carece de red hidrográfica. El nivel estático presenta variaciones importantes, desde 10 hasta 165 m que es el valor más alto hasta ahora registrado en el ejido Chencoh de la parte norte del municipio de Hopelchén; en su parte centro existen valores desde 3.0 m hasta 90.0 m siguiendo la línea de costa de Oeste-Este hasta la población de Escárcega; estos valores disminuyen de centro hacia el sur con rangos de 10 m a 20 m. En la parte centro-sur se observa una plataforma en donde se ubica el río Candelaria el cual define su cuenca en dirección SE-NO. El agua es de mala calidad ya que se reportan altas concentraciones de sulfatos debido a la presencia de yeso y anhídridos.

Las características hidrogeodinámicas de la llanura litoral, por debajo de la curva de nivel de 2 msnm, denotan la mayor elevación del nivel freático registrada en pozos y cenotes a 30 km de distancia de la costa, con un nivel promedio de 1.11 y 1.03 msnm respectivamente. La elevación disminuye gradualmente hacia la costa; temporalmente las máximas elevaciones del nivel de agua ocurren durante septiembre y octubre, con aguas mas salobres (inodora, insípida e incolora) y de baja temperatura. En contraparte las mínimas elevaciones se registraron desde el final de la época de nortes, durante la época de secas principalmente, con aguas más dulces y las máximas temperaturas al inicio de la época de lluvias. Cabe mencionar que la concentración de sal aumenta conforme disminuye la distancia al mar.

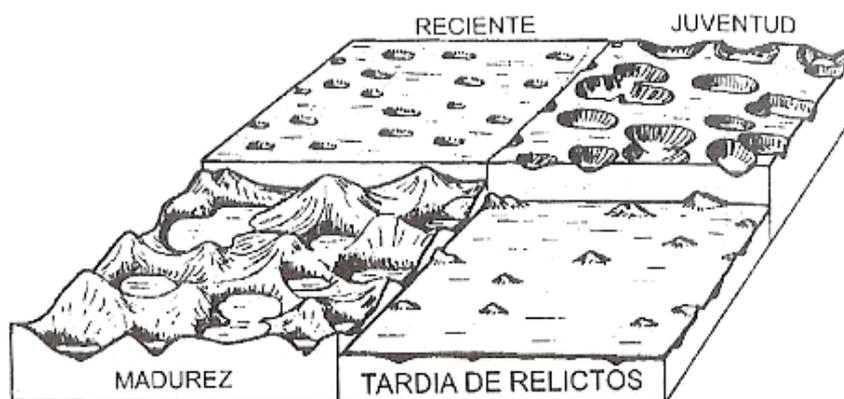


Fig. 13 Etapas evolutivas lineales del paisaje Carso-tectónico.

II.c MAPA GEOMORFOLÓGICO

El mapa geomorfológico de la Península de Yucatán se encuentra delimitado por unidades territoriales de escalas medias con cierto grado de homogeneidad morfogenéticas y ambiental. Bajo este criterio se estructura al sistema de clasificación de paisajes geomorfológicos. A cada paisaje le corresponde una particular combinación de procesos endógenos y exógenos así como las respectivas evidencias en geformas, materiales (residuales, acumulativos, erosivos y denudativos) e indicadores bióticos (Fig. 14).

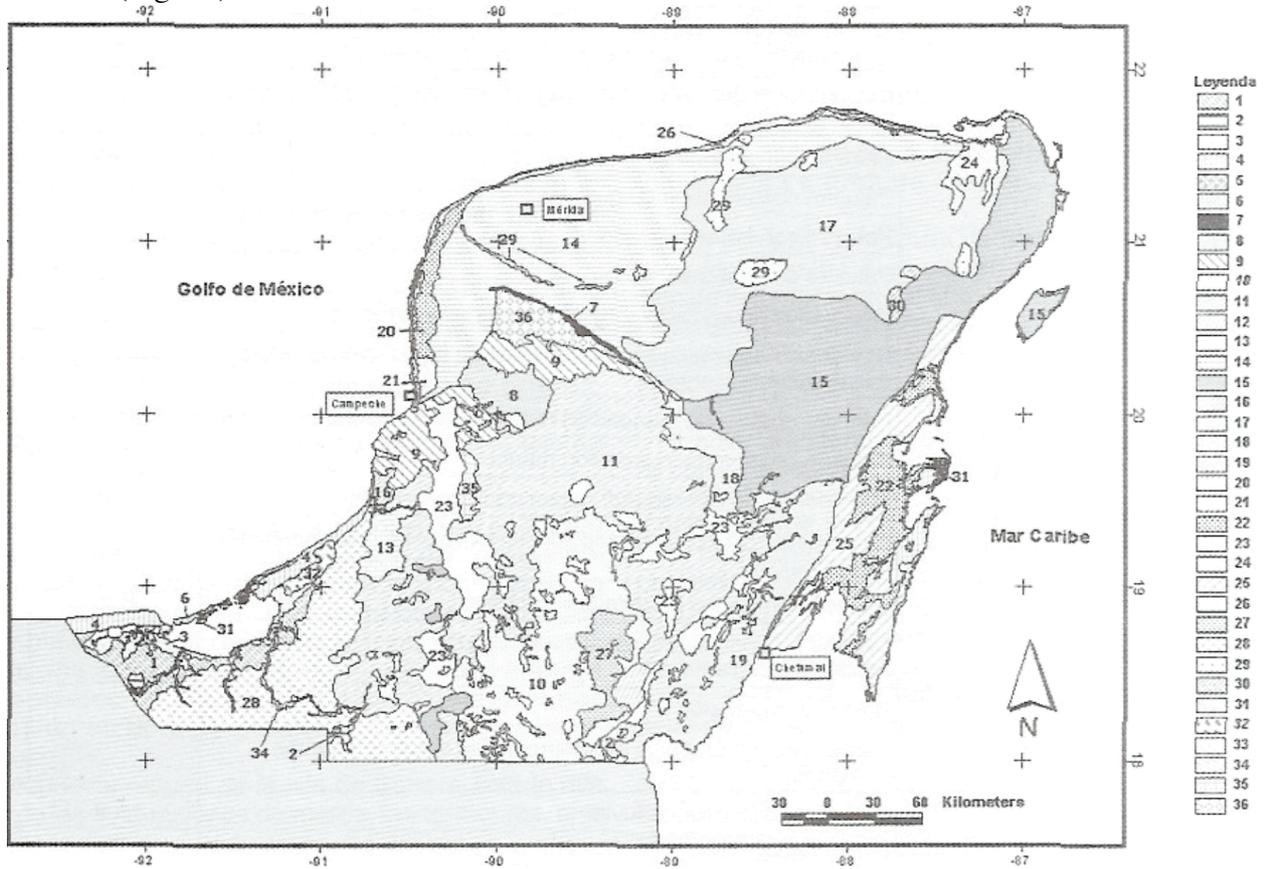


Figura 14. Mapa de paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán.

Sistema Terrestre (Morfogénesis)	Expresión Morfológica principal	Paisaje Geomorfológico	Grado de evolución Cárstica	Clave
Fluvio-palustre	Planicies	Palustre		1
		Fluvio-palustre		2
		Palustre pluvial-conchífera bajo influencia marina		3
Litoral	Planicies	Cordones litorales líticos y arenosos		4
		Flechas litorales		5
		Isla Barrera		6
Carso-Tectónica	Lomeríos	Pliegue bloque con cúpulas alineadas (presenta al menos un escarpe tectónico identificable)	Mad	7
		Pliegue bloque poco disectado con planicies amplias (presenta al menos un escarpe tectónico identificable)	Mad-Tar	8

		Pliegue con cimas en cúpulas y planicies confinadas (presenta al menos un escarpe tectónico identificable)	Mad	9
		Altos > 200 msnm disectado por torrentes	Mad- Tar	10
		De elevaciones bajas < 200 msnm (dispersos y con planicies interiores amplias)	Tar	11
		Disectados por torrentes y disolución sobre morfoalineamientos tectónicos	Juv- Mad	12
		En cúpulas con erosión diferencial alternando con planicies confinadas	Mad	13
	Planicies	Estructural baja denudativa (< densidad de fracturas)	Rec	14
		Estructural baja fitoestable	Rec-Mad	15
		Estructural baja acumulativa	Tar	16
		Estructural ondulada con disolución y denudación (> densidad de fracturas, alta concentración de formas cársticas)	Juv	17
		Estructural ondulada denudativa de transición entre lomeríos y planicies	Mad	18
		Estructural escalonada	Juv-Mad	19
		Palustre costera con blanquizales	Rec	20
		Palustre con retenes grandes	Rec	21
		Palustre con retenes chicos	Rec	22
		Residuales acumulativas susceptibles de inundación	Tar	23
		Residuales acumulativas susceptibles de inundación controladas estructuralmente	Mad-Tar	24
		Palustre costera de inundación marina con hundimiento	Rec-Juv	25
		Palustre costera de inundación marina	Rec	26
		Altas denudativas > de 200 msnm con lomeríos aislados	Tar	27
		Estructural baja con acumulación fluvio-deluvial (materiales del cuaternario)	Rec	28

	Dolinas agrupadas (inundadas –cenotes-) y en proceso de formación de úvalas	Juv	30
	Bajos intermareales		31
	Planicie estructural baja de resurgencias sobre ambientes palustres		32
	Lecho cárstico pseudofluvial	Juv	33
	Lecho fluvial		34
	Rampa cárstica deudatorio-erosiva	Mad	35
	Planicie estructural ondulada de transición entre pliegues bloque (50 msnm promedio)	Mad-Tar	36

Tabla 1. Geoformas de la Península de Yucatán y su grado de evolución.

II.d SISTEMA FLUVIO-PALUSTRE

El sistema fluvio-palustre se ubica sobre planicies bajas acumulativas que se alojan en cuencas de acumulación marginal. Están expuestas a regímenes de inundación semipermanente y extraordinaria por lo que existe hidromorfismo en los suelos y vegetación hidrófila como vegetación riparia, manglares, popales, pastizales inundados, selvas bajas y medianas inundables (Fig. 15).



Fig. 15 Manglar y Popales respectivamente

Conociendo que en la Península de Yucatán no existen corrientes superficiales porque la alta permeabilidad de las calizas provoca una rápida penetración del agua hacia el nivel freático, la erosión producida por el agua forma conos de disolución en la superficie, conductos y cavernas subterráneas a través de las cuales el agua fluye con un gradiente prácticamente paralelo al relieve casi horizontal del terreno. El sentido del flujo es radial del centro de la Península hacia las costas; la existencia de manantiales de agua dulce cerca de la costa y aún en el mar corroboran esta afirmación.

El suelo vegetal es escaso, sobre todo en las zonas de mayor permeabilidad donde se desplaza con mayor facilidad a estratos profundos.

La plataforma caliza puede considerarse como un medio homogéneo en relación al acuífero costero kárstico que fluye en su interior.

II.e SISTEMA LITORAL

Se sitúa en el borde extremo continental, sobre una cuenca marginal o de transición entre el continente y el océano, es el lugar en donde comienzan a formarse las nuevas ciudades de la Península, y en donde se encuentran las construcciones mas significativas.

El Sistema Litoral recibe los sedimentos de la porción continental y los generados en ambiente marino. Exhibe una estructura tubular con echados ligeramente inclinados hacia el mar con relieve esencialmente llano; en estos sistemas la hidrodinámica costera del oleaje, las mareas y la deriva litoral son factores morfogenéticas relevantes.

Cuando los sedimentos confluyen en el mar las corrientes litorales se encargan de distribuirlos en una alternancia de camellones alargados y pequeñas hondonadas o depresiones ordenadas sucesivamente a diferentes ritmos de avance hacia el mar. También puede haber planicies intermareales confinadas, cubiertas con manglar y/o pastizales halófilos así como blanquizales en el flanco interno de la isla Barrera. Los líticos presentan fragmentos de roca mas o menos estabilizados y los arenosos están en proceso de formación, estos se encuentran bien desarrollados en el sureste de Campeche y costa centro de Quintana Roo.

La respuesta natural de la isla Barrera ante la alta energía de las fluctuaciones de marea, las tormentas, olas y viento es la disminución de arena, flexibilización y retracción hacia tierra adentro debido al incremento del nivel medio del mar. Este retroceso es originado por tres mecanismos: 1) Dinámica de bocas que conectan el mar con la ciénaga o ría; 2) Bajos inundables, y 3) Migración de la duna costera. El autor Meyer-Arendt menciona que las barras arenosa de la costa de Yucatán se retrae tierra adentro a una tasa que varia de 0.3 a 0.9 m anuales, este fenómeno es el principal problema para la conservación y restauración de playas ante el paso de Huracanes, ya que existe un alto grado de erosión que disminuye el área de playa, tendiendo el mar a regresar a su estado natural modificado por el hombre, representando un alto costo el relleno de playas, ejemplo claro en los últimos años las playas de Cancún que han sido fuertemente erosionadas a causa del paso de huracanes y tormentas tropicales (Fig. 16 y 17).



Fig. 16 Erosión de playas en Cancún



Fig. 17 Relleno de playas en Cancún

En general la mayoría de los perfiles de la región noroccidental de la Península, muestran cambios evidentes en función de la temporada del año, de verano-otoño (acreción) y de invierno-primavera (erosión) y se observan cambios en la playa debido a fenómenos meteorológicos como los nortes, fuertes y huracanes; siendo estos últimos los de mayor peligrosidad por lo tanto la base de diseño de las cimentaciones y estructuras en la zona.

La llanura litoral esta expuesta a diferentes procesos físicos y geológicos muy vinculados de importancia poco difundida, en cuanto a lo que ocurre con la evolución geomorfológica de la zona en estudio. Las áreas inundables de la barra arenosa (playas) que se establecen en el litoral presentan mayores inundaciones, de octubre a enero, cuando el nivel medio del mar es alto y se producen las pleamares máximas que inundan el manglar de franja y se vierten sobre la ciénaga baja. En la

temporada de lluvias y nortes se forman “islas” de agua salada bordeadas de agua dulce. En estas temporadas se presentan olas con una altura que varía de 0.3 a 0.7 m, principalmente durante los “nortes” y con amplitudes de 3 a 20 m. Los vientos provenientes del norte y del noroeste presentan velocidades promedio de 25 km/hr a una altura de 2.5 m sobre el piso y velocidades de 14 a 20 km/hr a 10 cm del piso, lo cual ejerce una fuerza extraordinaria para levantar los sedimentos de la playa y transportarlos a distancia.

Durante los dos primeros capítulos de este trabajo se ha estudiado el subsuelo de la Península desde épocas ancestrales hasta nuestros días, abarcando todos los temas necesarios para conocer las características de los subsuelos predominantes que hoy prevalecen en la región.

El trabajo va encaminado de lo general a lo particular, es decir se expuso las características generales del subsuelo en la Península, sin embargo a partir del próximo capítulo (Capítulo III) se abarcará las regiones donde existe el mayor desarrollo poblacional, económico y sobre todo de infraestructura concerniente a nuevas edificaciones como lo es el litoral Cancún-Riviera Maya en el estado de Quintana Roo, y la ciudad de Mérida en el estado de Yucatán, por lo que se estudiará con detalle las características geomorfológicas del subsuelo, abarcando posteriormente en el Capítulo IV ya estudios de mecánica de suelos elaborados al subsuelo, así como pruebas de laboratorio a diferentes subsuelos calizos, se podrá analizar en el Capítulo V una gama de edificaciones cimentadas en dichas ciudades, su comportamiento estructural, criterios de diseño, metodología constructiva, fallas estructurales, presentación de proyectos, planos etc.