

Caracterización geomorfológica del talud y la plataforma continentales de Campeche-Yucatán, México

Manuel Mendoza^{*}
Mario Arturo Ortiz Pérez^{**}

Recibido: 17 de agosto de 1999
Aprobado en versión final: 18 de mayo de 2000

Resumen. Este trabajo incorpora métodos y técnicas de análisis cartográfico y geomorfológico terrestres y marinas, especialmente geológicas y geofísicas, con la intención de determinar las características morfológicas de la margen continental del sureste del Golfo de México. El análisis cartográfico-geomorfológico integra la información de los componentes del paisaje submarino, mediante el apoyo de un sistema de información geográfica (SIG). Se digitizaron las isobatas de tres cartas batimétricas en escala 1:200 000 y se interpolaron 7 000 datos batimétricos correspondientes a la porción de la Plataforma Campeche-Yucatán, de la cual no existía ninguna cartografía a escala semidetallada, construyéndose por tal motivo un mapa batimétrico en escala 1:250 000. Con base en este mapa se realizaron la cartografía morfométrica (mapa de pendientes e hipsométrico) y los Modelos Digitales de Terreno (MDT) que, junto con los ecogramas levantados durante los cruceros en el área en estudio, permitieron definir un estilo tectónico tensional que se presenta en la carta de Morfolineamientos, así como identificar las cinco unidades principales y las siete unidades secundarias de relieve en la carta Morfogenética de la porción sureste del Golfo de México.

Palabras clave: Geomorfología submarina, sistemas de información geográfica, modelo digital del terreno, análisis cartográfico-geomorfológico, plataforma y talud continental, México.

Geomorphological characterization of the continental shelf and slope of Campeche-Yucatán, Mexico

Abstract. This paper uses cartographic and terrestrial geomorphologic techniques linked to marine geologic techniques in order to analyze morphological features of the continental margin in the southeastern Gulf of Mexico. The cartographic-geomorphological analysis integrates information from components of the underwater landscape and was carried out through a Geographical Information System (GIS). Isobaths from three different bathymetric charts, scale 1:200 000, were digitized and interpolated. About 7 000 bathymetric records located in the Campeche-Yucatán continental shelf were interpolated for areas without cartographic references. Finally, a map at a 1:250 000 scale was obtained. Based on this map, morphometric charts (slopes and hypsometric) and Land Digital Models (LDM) were obtained. These, along with ecograms produced during cruises in the study area, allowed to define a tensional tectonic style showed in the resulting cartography. Five major and seven secondary morphogenetic units were identified in the Southern portion of the Gulf of Mexico.

Key words: Underwater geomorphology, Geographic Information Systems, land digital model, cartographic-geomorphological analysis, continental platform and slope, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Las primeras aportaciones al conocimiento de la geomorfología submarina son de Umbgrove (1946) y Shepard (1948). Es hasta la década de los años cincuenta cuando se publican los primeros mapas del relieve submarino y se realiza un mayor número de contribuciones al conocimiento del origen de las formas de este paisaje. Los trabajos de Weaver (1950), Mina-Uhink *et al.* (1956), Dietz (1964) y Emery

(1965) representan los primeros esfuerzos para la explicación del origen y la estructura de plataformas y taludes continentales. Sin embargo, la mayor parte de los términos empleados hasta ese momento son únicamente descriptivos y tan sólo las formas submarinas más evidentes, como las de origen volcánico y tectónico, pueden ser explicadas con base en la Teoría de la Tectónica de Placas o mediante analogías de formas de origen subaéreo (Bloom, 1978).

^{*} Instituto de Ecología-UNAM, Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Ex Hacienda San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México. E-mail: Mendoza@ate.oikos.unam.mx

^{**} Instituto de Geografía, UNAM, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F. E-mail: maop@igiris.igeograf.unam.mx

Las investigaciones sistemáticas de las márgenes continentales iniciaron en los años cincuenta, utilizando técnicas geofísicas y geológicas (Drake y Burk, 1974). En México los primeros trabajos cartográficos del fondo marino, en escala muy pequeña, se inician en los años ochenta. La primera carta de morfoestructuras del fondo oceánico mexicano, en escala 1:8 000 000, se elaboró en esa década por Lugo (1985).

A pesar de la gran extensión marina y de la creciente importancia de los mares mexicanos, los trabajos geomorfológicos siguen siendo escasos, en especial los realizados a semi-detalle. El levantamiento geomorfológico de la plataforma y talud continentales de Campeche-Yucatán presenta particular importancia, debido a su importancia económica (pesca e hidrocarburos) y a que, como el resto de las zonas marinas mexicanas, han sido muy poco estudiados.

Con la finalidad de construir las cartas Morfogenética y de Morfolineamientos, que son de suma importancia en el arreglo de las unidades mayores del relieve, se planteó un análisis cartográfico-geomorfológico integrado, el cual se auxilió de los análisis sedimentológicos e información geológica-tectónica. Se optó por este enfoque, que se basa en pocos datos de campo y en un gran número de fuentes existentes, debido a que se reconoce que un levantamiento submarino de las formas de relieve implica un análisis de datos geológicos y geofísicos con un enfoque integral.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la geomorfología en la Plataforma de Campeche-Yucatán, con fin de conocer la distribución y origen de las formas submarinas y contribuir al conocimiento geomorfológico de las plataformas carbonatadas.

Objetivos particulares

Describir las características geológicas de la zona en estudio; reconocer algunos de los

procesos por los que ha pasado la plataforma durante el Cuaternario y determinar las causas geológico-geomorfológicas de la distribución alineada de los bancos arrecifales en la Plataforma de Campeche-Yucatán.

ÁREA EN ESTUDIO

Esta investigación se desarrolló en el extremo oriental del Golfo de México, el cual ha sido frecuentemente caracterizado en su conjunto como una pequeña cuenca marina (Menard, 1967) o un mar tipo mediterráneo (Garrison y Martín, 1973), que cubre un área mayor a 1 500 000 km² y registra una profundidad máxima de 3 700 m. El Golfo presenta muchos de los rasgos geomorfológicos característicos de los grandes océanos (Martín y Bouma, 1976), lo que ha propiciado la atención de numerosas investigaciones geológicas, en especial de las relacionadas con la geología del petróleo, principalmente por parte de las compañías petroleras estadounidenses, que se realiza en su mayor parte en la porción noroeste.

El área en estudio se localiza entre los paralelos 18°40' y 23°10' de latitud norte y entre los meridianos 89°30' y 92°45' al oeste de Greenwich y abarca un área poco menor de 149 000 km² (Figura 1).

MATERIALES Y MÉTODOS

El material cartográfico obtenido para la realización de este trabajo es escaso, por tratarse de un área marina. La Dirección de Oceanografía de la Secretaría de Marina proporcionó un banco de 7 000 datos batimétricos y el Departamento de Oceanografía de la Dirección General de Geografía aportó tres cartas batimétricas en escala 1:200 000 elaboradas por Petróleos Mexicanos (PEMEX; Browder, 1974; GEOSOURCE, 1974), que cubren tres cuartas partes del área en estudio. También se utilizaron tres cartas topográficas, escala 1:250 000 (INEGI, 1985), para precisar la línea de costa. Además, se contó con los resultados del análisis granulométrico y la información bibliográfica sobre la evolución

tectónica, geología y sedimentología del Golfo de México y Plataforma de Campeche-Yucatán.

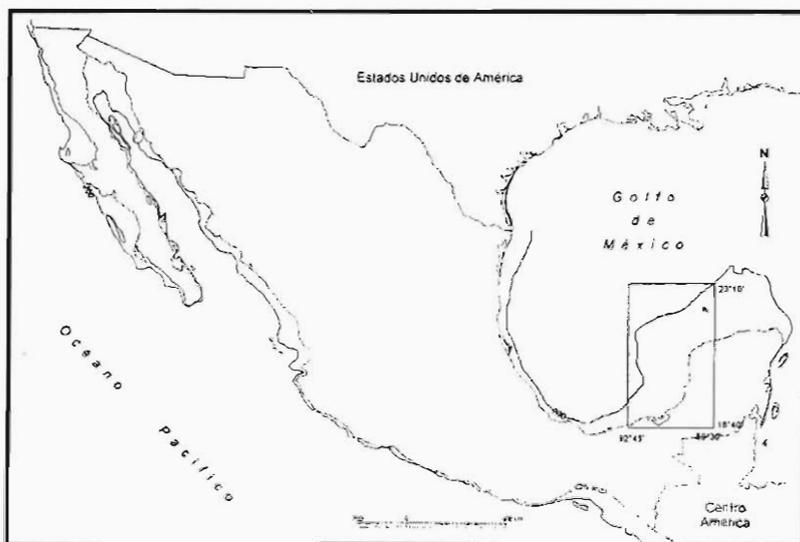
Se utilizó un sistema de información geográfica (SIG), mediante el que se capturó, generó y manipuló la información espacial. El paquete utilizado fue el ILWIS (ILWIS, 1990); además, fue necesario usar el SIG ARC/INFO para la interpolación automatizada de los datos batimétricos y la construcción de una carta de isobatas cada 200 m en la porción del escarpe y cada 10 m en la plataforma. Con la interpolación de estos datos se obtuvo un mapa de isobatas, representadas a cada 200 y 10 m, mismo que cubrió el espacio faltante de información en la porción noreste del área en estudio, sobre el talud continental de la porción norte, que no contaba con cartas batimétricas.

El trabajo de campo consistió en una campaña oceanográfica en la Plataforma de Campeche-Yucatán a bordo del buque oceanográfico "Justo Sierra" de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), del 6 al 23 de marzo de 1990. En los transectos realizados se ubicaron 79 estaciones de muestreo, a fin de conocer las características físicas, químicas, biológicas y sedimentológicas generales de la plataforma carbonatada, con el objetivo

de evaluar el deterioro ambiental resultante de las actividades de extracción petrolera y transporte naviero en el área.

Durante esta campaña, los transectos de mayor interés morfológico se levantaron mediante el uso de una ecosonda digital SIMRAD, en profundidades no mayores a los 2 500 m; se registraron la plataforma y parte del talud continental. Se anotó el posicionamiento del barco, con base en las coordenadas geográficas de cada estación hidrográfica, determinadas por medio de un sistema de navegación por satélite GPS (*Global Positioning System*), al principio y al final del sondeo, así como en el transcurso del recorrido. De esta manera se contó con un mejor control de la ubicación del ecograma.

En cada estación se recolectaron muestras de sedimento con una draga *Smith McIntyre* de 15 litros de capacidad, a profundidades entre 15 y 210 m. Los sedimentos colectados se procesaron en el laboratorio a fin de caracterizar el área en estudio con base en los tipos texturales de sedimentos, para lo cual se asociaron éstos con las características geomórficas de la margen continental en la porción sureste del Golfo de México, permitiendo diferenciar subunidades de relieve.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Área en estudio.

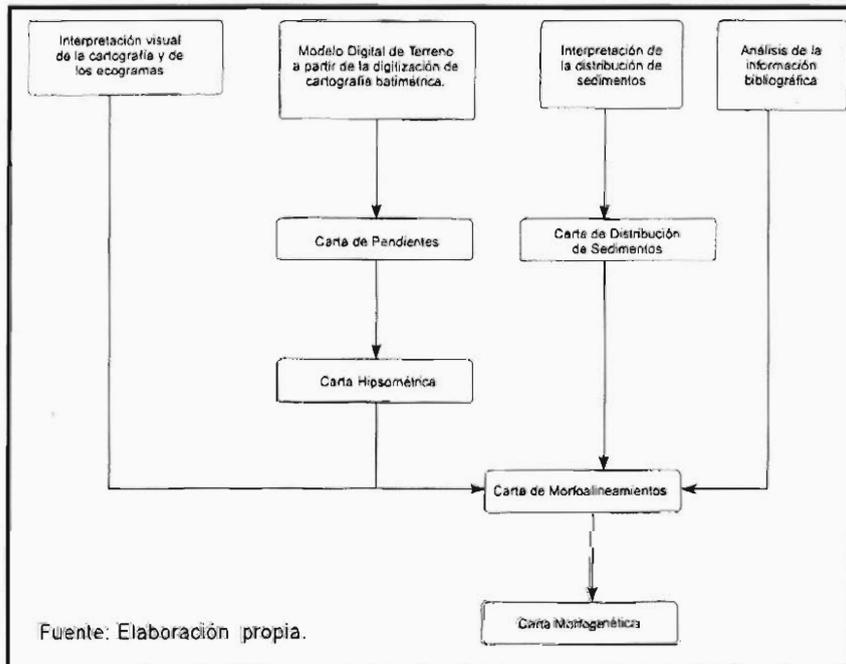
Las muestras lodosas (limo + arcilla) se secaron y pesaron, y la fracción gruesa (arena + grava) se separó por medio del tamizado en húmedo. Las partículas de lodo se pesaron y se obtuvo el porcentaje de la fracción lodosa. Así, a partir del análisis granulométrico, se definieron cuatro clases texturales de sedimentos del área en estudio: a) arena - el contenido de arena es superior a 90%; b) arena lodosa - el contenido de arena varía entre 50 y 90%; c) lodo arenoso - el contenido de arena varía entre 10 y 50% y d) lodo - el contenido de arena es inferior a 10%.

Para el análisis geomorfológico-cartográfico del área, se digitizaron las isobatas a equidistancias variables (5, 10, 100 y 1 000 m), correspondientes a tres cartas batimétricas en escala 1:200 000 de la Sonda de Campeche y el área marina comprendida al norte de Puerto Progreso, Yucatán, y las cartas en escala 1:250 000, que cubren los estados de Campeche y Yucatán.

Una vez construida la carta, se incorporó la base de datos vectorial de ILWIS y se creó una nueva que contenía la información batimétrica del área total; posteriormente, esta base se

"rasterizó", es decir, se transformó en un formato de celdas, lo que facilitó el análisis morfométrico del área en forma automatizada.

El análisis morfométrico incluye la elaboración de las cartas hipsométricas, de pendientes y morfolineamientos con las metodologías expuestas en los trabajos de Orlova (1981), Lamadrid-Marón y Horta-Carballal (1984) y Lugo (1988). El análisis de los sedimentos, así como la información previa obtenida sobre los mismos, principalmente de Logan (1969) y Logan *et al.* (1969), sirvieron de manera importante para caracterizar las unidades geomorfológicas, ya que reflejan la naturaleza del ambiente de sedimentación y geomórfico. Finalmente, con la información obtenida a partir de las cartas temáticas, modelos digitales, modelos digitales en tres dimensiones, sedimentos, perfiles batimétricos y geofísicos, se elaboraron la leyenda y la carta morfogenética en escala 1:250 000, la cual ha sido hasta ahora objeto fundamental de las investigaciones geomorfológicas (Lugo, 1988). En la Figura 2 se muestra el esquema simplificado con la descripción del método utilizado para esta investigación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Método de trabajo de la investigación.

RESULTADOS

Geomorfología

El análisis cartográfico-geomorfológico de la porción sureste del Golfo de México se basa en los principios geomorfológicos que consideran a las formas de relieve, litología, estructura y génesis, como los principales criterios de clasificación del terreno, y agrupa a las formas de relieve en unidades y subunidades, de acuerdo con su homogeneidad (Verstappen, 1971).

El levantamiento geomorfológico es, por excelencia, de carácter integral, en él se mapean los rasgos observables en una escala determinada y se caracterizan en función de sus atributos morfométricos, geológicos, geofísicos, edafológicos y de cobertura (Mendoza y Bocco, 1998). En trabajos continentales de carácter morfogenético, se puede considerar a más de ocho elementos de análisis; sin embargo, al trabajar en el relieve submarino éstos se reducen a sólo cinco:

Batimetría: describe la distribución de profundidades. La cartografía disponible se digitizó, mientras que para las zonas no cartografiadas se construyó un mapa batimétrico a partir de un método de interpolación en ARC/INFO.

Litología: se presenta una descripción de las rocas que conforman las unidades, debido a la relación existente entre ésta y la geoforma-procesos asociados.

Estructura: se elabora a partir de la interpretación cartográfica y la información bibliográfica, lo que da por resultado un mapa de morfoalineamientos en escala 1:2 500 000 (Figura 3).

Pendiente: expresa los distintos declives del relieve y los tipos de modelado, así como la deducción de ciertos procesos geomórficos a los que están sujetas las diferentes unidades.

Sedimentos: la consideración de los sedimentos en este trabajo tuvo un papel determinante en relación con la definición de uni-

dades, ya que el relieve submarino es notoriamente modelado por la sedimentación. Se elaboraron dos mapas de distribución de sedimentos (1:1 000 000 y una reducción en escala 1:2 500 000), de acuerdo con su tamaño y composición (Figura 4). Cabe mencionar que el límite entre las zonas de precipitación de carbonatos y depositación de terrígenos no es brusco, sino transicional. Para la definición de unidades de relieve, el cambio se define por el contacto que contrasta a los sedimentos lodosos de los arenosos.

Estructuras disyuntivas

Para la elaboración de la carta de morfolineamientos (Figura 3) se tomó en cuenta la información cartográfica del *Atlas Nacional de México*, específicamente de las hojas Geología Marina (V.9.5.A.) y Tectónica (IV.2.1.), de Aguayo y Carranza (1991) y De Cserna (1992), respectivamente, así como la hoja Tectónica del *Atlas del Golfo de México* elaborada por Buffler *et al.* (1980), para el Programa de Perforación del Mar Profundo; aunado a los criterios expuestos por Orlova (1981).

A la batimetría obtenida para este trabajo y a las cartas de pendientes e hipsometría (Figura 5) se les asignó el mayor peso para la interpretación de morfolineamientos, debido al detalle con que se cartografía la información batimétrica. De esta manera, se reconoció que el borde continental está estrechamente relacionado con la historia tectónica del Golfo de México, en especial con la del Bloque Yucatán. Se definieron fallas normales y probablemente fallas de carácter transcurrente, que pudieran relacionarse con el movimiento de rotación de la Plataforma de Yucatán en el sentido de las manecillas del reloj, mismas que presentan desplazamiento lateral izquierdo a lo largo del sistema de fallas transcurrentes de las sierras de pliegues, bloques que dominan en la provincia del sector septentrional de Chiapas, de acuerdo con Ross y Scotese (1988).

El talud continental formado por el escarpe de Campeche corre con una orientación

normoreste-sursuroeste y un desarrollo longitudinal de 300 km. En la pared meridional se emplaza el Cañón Campeche. Al parecer, éste tiene un origen tectónico, de acuerdo con Stephan *et al.* (1990). Podría tratarse de una falla con movimiento lateral izquierdo, que funciona como plano de desplazamiento del Bloque Yucatán al inicio de la apertura del Golfo de México, en el Jurásico medio. Cabe señalar que los lineamientos sobre la plataforma emergida presentan un compor-

tamiento y dirección similar noreste-suroeste (Lugo *et al.*, 1992).

Al Talud de Campeche le afectan estructuras que, al parecer, son fracturas, las cuales favorecen el desarrollo de cañones-corredores submarinos con una orientación casi este-oeste; estas fracturas cortan el talud y se prolongan hasta la plataforma continental de Campeche-Yucatán.

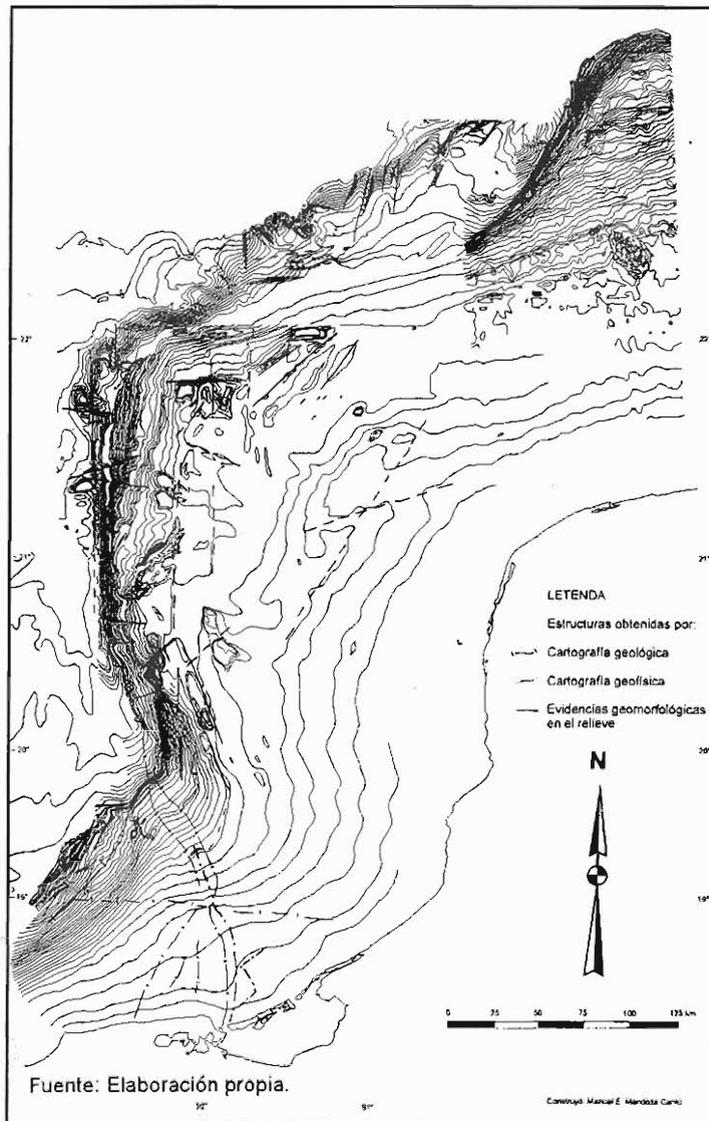
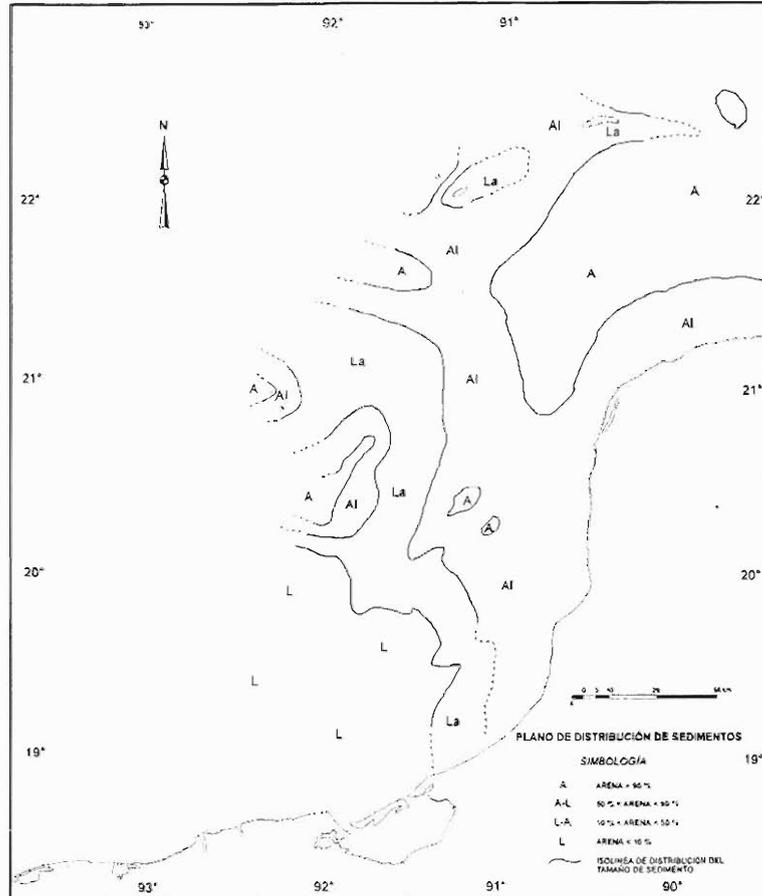


Figura 3. Mapa de estructuras disyuntivas y morfoalineamientos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Plano de distribución de sedimentos.

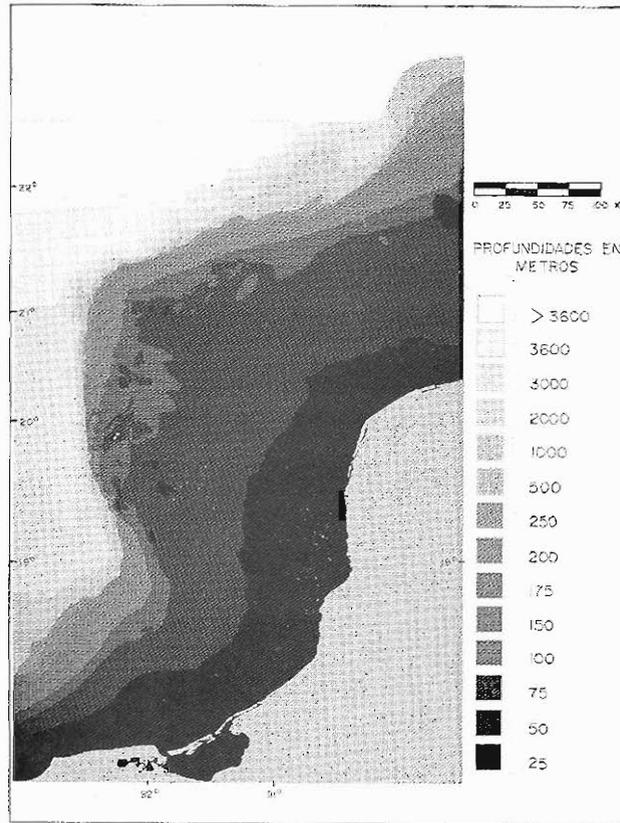
El Escarpe de Yucatán es una estructura mayor que presenta una marcada continuidad, cuya orientación general va de noreste a suroeste, y que se extiende por más de 400 km de longitud. La traza de este elemento mayor del relieve, vista en planta, tiene una configuración escalonada con arreglo en escalón en donde los lineamientos secundarios cortan la porción frontal del talud continental de Yucatán. Se trata de lineamientos que desmiembran el borde de la plataforma continental, en una serie de bloques limitados con bloques de traza arqueada y de rumbo oblicuo al talud en cuestión. Puede pensarse a manera de hipótesis, en un sistema de fallas asociadas de carácter transcurrente con desplazamiento siniestro de cobertura regional, una de las cuales favorece el desarrollo del cañón subma-

rino de Alacranes, cuya longitud registra 135 km, al noreste del área en estudio.

Como puede apreciarse en el perfil sísmico (Figura 6), sobre el Escarpe de Yucatán existen fallas normales, que han generado la existencia de escalones sobre el escarpe, definiendo así un talud superior y otro inferior.

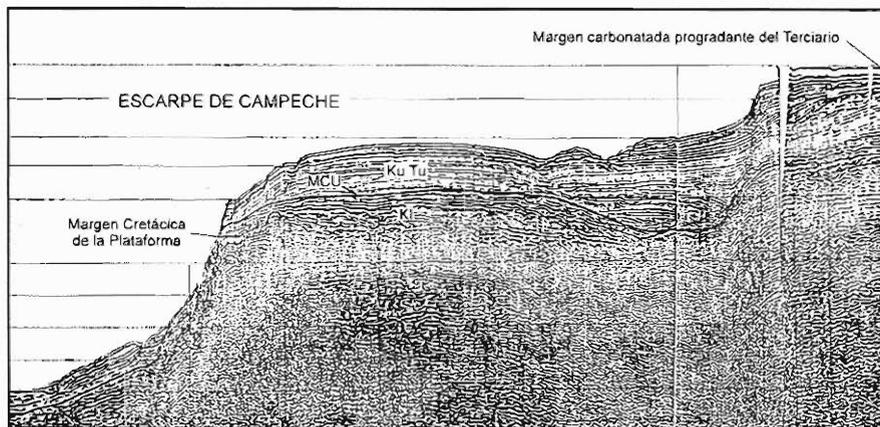
Clasificación de las unidades de terreno por su origen

Las formas de relieve presentes en la porción del Golfo de México se agrupan con base en su origen, en: tectónico-tabular modelado, marino biogénico, marino gravitacional, marino acumulativo y kárstico (Figura 8).



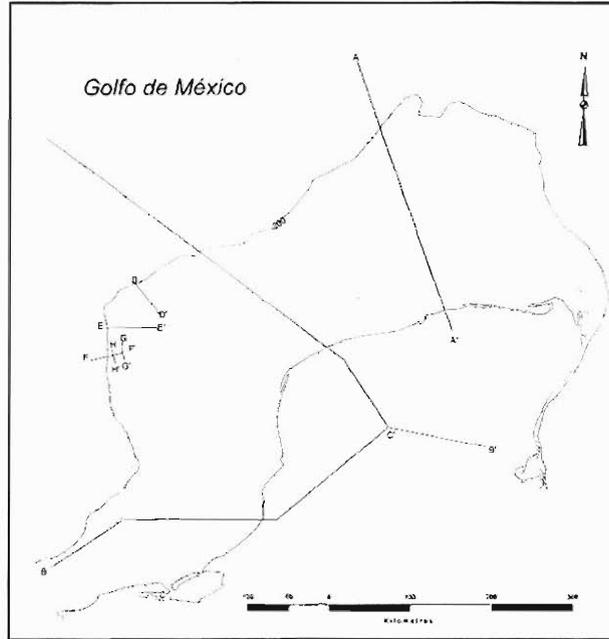
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Mapa hipsométrico.



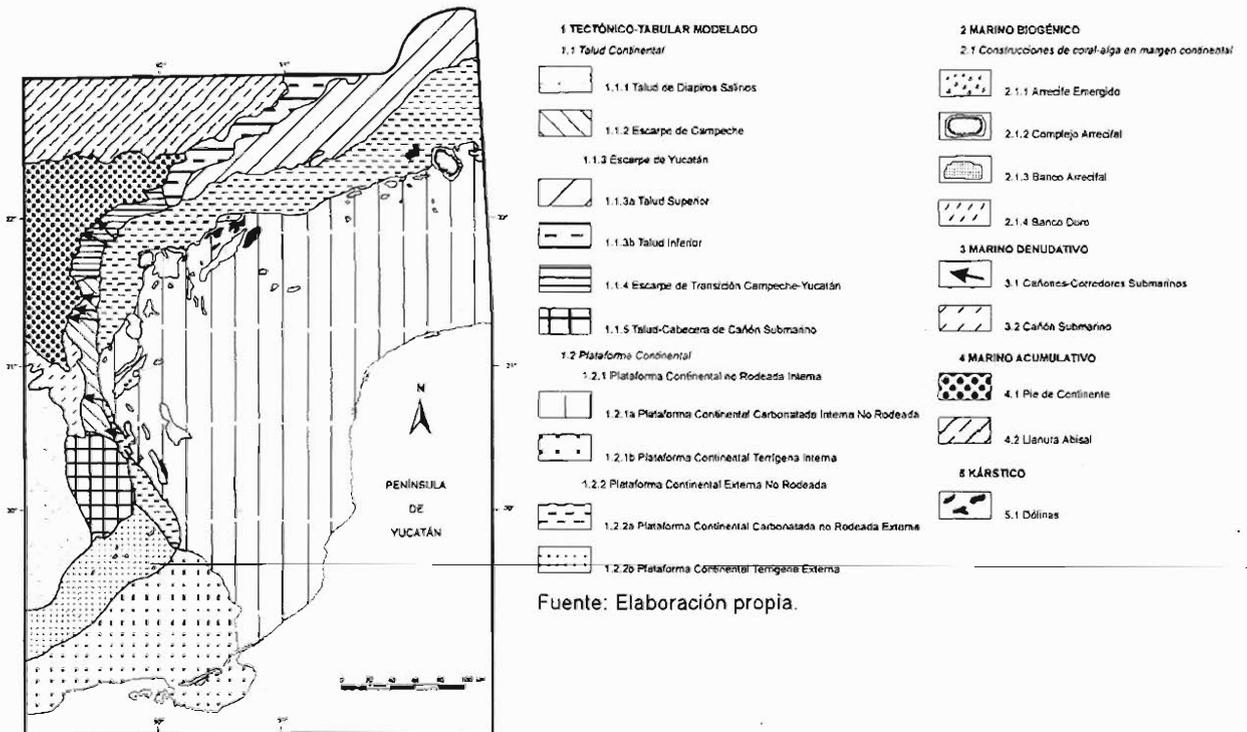
Fuente: Tomado de Buffer *et al.*, 1980.

Figura 6. Perfil sísmico del Escarpe de Yucatán donde se observa la presencia de un fallamiento normal, generador de superficies escalonadas. Ku Cretácico superior, Tu Terciario superior, MCU Discordancia del Cretácico superior. Reinterpretado para este trabajo. Se ubica en la Figura 7 de área en estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Localización del trazo de los perfiles representados en las secciones.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Mapa geomorfológico (porción sureste del Golfo de México).

1. Tectónico-tabular modelado

Esta unidad incluye a todas las formas que son producto directo de fuerzas endógenas, en este caso las creadas por movimientos de la corteza, es decir, por procesos tectónicos así como de inyección de sal (tectónica salina) y han sido modeladas por procesos de deposición y erosión.

1.1. Talud continental

a) Talud de diapiros salinos

Esta unidad comprende una parte de las colinas que se ubican en el Golfo de Campeche, sólo ocupa unos 4 700 km² del área en estudio. La constituyen cuerpos de sal jurásica formados en mares someros y de circulación restringida, que se inyectaron en los sedimentos cenozoicos, los cuales pertenecen a una de las zonas de mayor acumulación de sal de la Gran Cuenca Salina de Campeche.

Se manifiesta en el relieve desde 200 m de profundidad hasta los 3 500 m, con pendientes de 1° en la porción superior, hasta 30° en las porciones más escarpadas (Tabla 1).

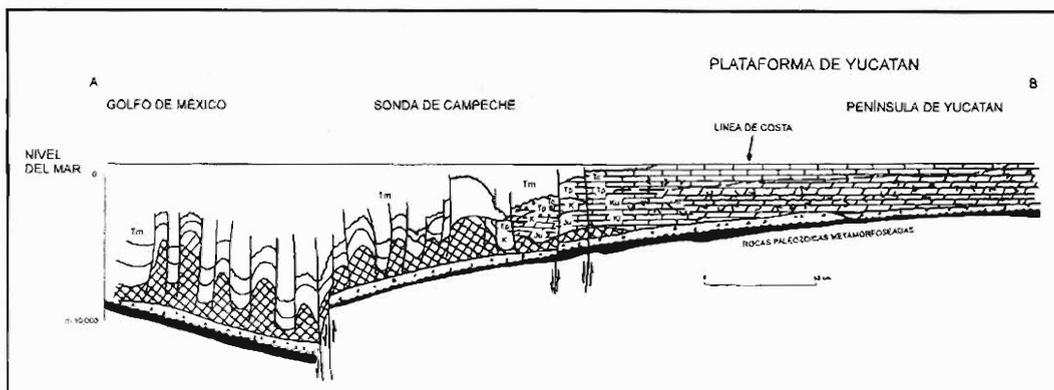
En el área en estudio se pudieron definir dos grandes unidades: Talud Continental y Plataforma Continental no rodeada, las cuales a su vez se subdividen en unidades menores (Figura 8).

Los sedimentos superficiales de este talud están representados por lodos terrígenos, los cuales suavizan la forma de la estructura original del domo salino, producto de la inyección. Su límite oriental lo constituye el contacto tectónico-litológico con el Escarpe de Campeche, mientras que el occidental queda fuera del área en estudio y está representado por el Cañón Veracruz (Bryant *et al.*, 1991).

b) Escarpe de Campeche

Esta unidad se orienta aproximadamente de norte a sur, abarca una superficie de poco más de 3 000 km², está formada por rocas carbonatadas químicas, biogénicas y anhidritas del Grupo Yucatán. Como puede observarse en la sección litológica de la Figura 9, estas rocas subyacen a sedimentos recientes constituidos por lodos carbonatados (limos y arcillas) de la unidad sedimentaria propuesta por Logan *et al.* (1969) como Manto Sigsbee.

Este escarpe tiene una amplitud o diferencia máxima de alturas de 2 600 m, ya que inicia a la profundidad de 200 mbnm, y presenta su posición más distal a la profundidad de 2 800 mbnm con una pendiente que oscila de 2° hasta ser superior a los 45°. En el talud sobresalen rasgos particulares de relieve como los cañones-corredores submarinos (Figura 5 y Tabla 1).



Fuente: Tomado de Peterson, 1982.

Figura 9. Sección litológica-estructural del Escarpe de Campeche y la Plataforma de Campeche-Yucatán.

La configuración actual del escarpe es el resultado de un complejo origen tectónico distensivo de falla de transformación, como ha sido propuesto por Ross y Scotese (1988). En el borde de la plataforma, un subsecuente crecimiento arrecifal se presenta debido a la acumulación de sedimentos carbonatados (Bryant *et al.*, 1991) y fallas lístricas que se presentan paralelas al margen del mismo, como resultado de la fuerte pendiente y la fuerza de gravedad actuante sobre los materiales que la conforman.

c) Escarpe de Yucatán

La unidad del escarpe de Yucatán se alinea de suroeste a noreste, abarca cerca de 1 250 km² del área y sólo comprende la porción occidental del mismo. Al igual que el de la unidad anterior, se desarrolla sobre rocas carbonatadas químicas, biogénicas y anhídras del grupo Yucatán, y los sedimentos recientes que lo cubren están constituidos por lodos carbonatados de la unidad sedimentaria denominada como Manto Sigsbee por Logan *et al.* (1969).

Su amplitud es de 2 800 m e inicia a los 200 mbnm para finalizar a los 3 000 m de profundidad (Figuras 5 y 8). La distribución de los valores de mayor pendiente se encuentra en estrechos bordes formados entre los contactos de las subunidades geomorfológicas y en los flancos de los cañones submarinos, por arriba de los 20° y hasta más de 30°; los valores comprendidos entre 2 y 10° se reparten de manera irregular en el resto del talud.

Este talud también tiene un origen tectónico distensivo, sin embargo es de *riff*, es decir, de apertura del fondo oceánico, por lo que su configuración difiere con respecto al escarpe de la unidad antes mencionada. También incluye en su desarrollo el crecimiento de colonias arrecifales, precipitación de carbonatos y fallas lístricas, debidas a la fuerza de gravedad que actúa sobre la fuerte pendiente original, por lo que puede dividirse en dos secciones: a) *talud superior*: en esta parte se presentan

pendientes menores que oscilan entre 1 y 10°, ya que se encuentra constituido por una serie de escalonadas (terrazas) que asemejan el modelo de margen de *riff* con fallas en escalón (Figura 6), desniveles que pueden corresponder a movimientos gravitacionales de tipo rotacional, derivados de la fuerte inclinación y falta de soporte lateral. El talud limita por arriba de los 200 mbnm y finaliza a los 1 000 m de profundidad, y ocupa una superficie de casi 9 000 km² (Tabla 1). b) *Talud inferior*: la distribución de las pendientes representativas es compleja, pues no existe un patrón definido en esta porción del talud, ellas oscilan entre 5° y más de 45°, con una amplitud de 2 000 m; la profundidad máxima se encuentra a los 3 000 mbnm, con una superficie de 3 520 km² (Tabla 1).

La base del talud limita con la llanura abisal y no se desarrolla al pie del continente como en la mayor parte de las márgenes tipo Atlántico, lo que representa una anomalía en la sucesión de las formas de relieve, que puede ser relacionada con la asociación de fallas (Figura 10).

d) Escarpe de transición Campeche-Yucatán

Esta unidad se encuentra representada por la porción norte del Escarpe de Campeche y la más occidental del Escarpe de Yucatán. Se definió así porque en la zona se realiza el cambio de dirección del talud, además de presentar una geometría ligeramente convexa y cañones-corredores submarinos.

La amplitud de la unidad es de 2 800 m, ocupando un área que corresponde a poco más de 3 000 km², las pendientes mayores se presentan en la cara hacia el Cañón Campeche con valores superiores a los 45° (Tabla 1). Las rocas que la conforman son las del Grupo Yucatán y los sedimentos que en ella se presentan son texturalmente lodos constituidos por carbonatos (Figura 4).

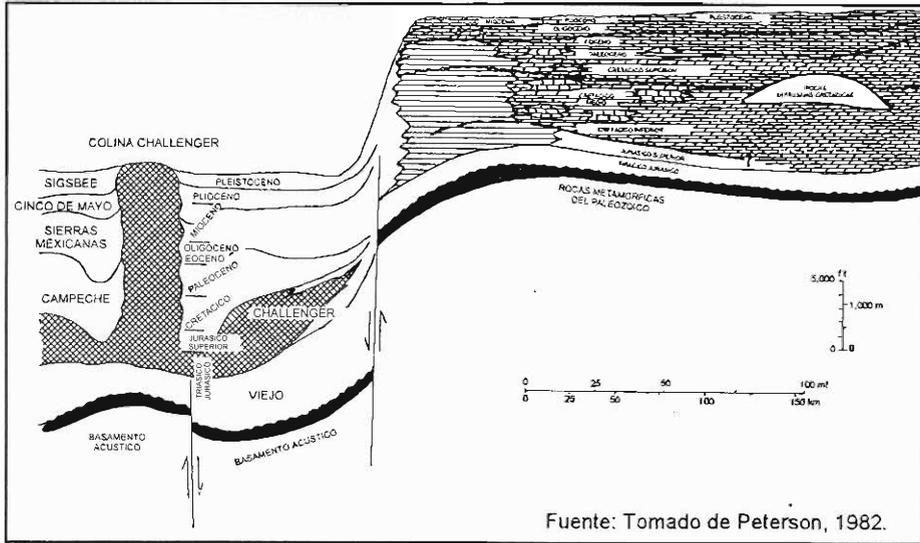


Figura 10. Sección litológica-estructural del Escarpe de Yucatán y la Plataforma de Campeche-Yucatán; se encuentra ubicado en el mapa de la Figura 1.

e) Talud-cabecera de cañón submarino

Esta porción del talud corresponde al área de la cabecera del Cañón Campeche; se caracteriza por presentar laderas cóncavas y una forma en planta similar a la U, con pendientes superiores a 3° e inferiores a 30. La amplitud de la cabecera es de 800 m, inicia a 200 mbnm y finaliza a 1 000 m de profundidad, con una superficie ligeramente superior a 4 700 km² (Tabla 1).

Este talud se desarrolla en rocas carbonatadas y evaporíticas que varían del Jurásico al Terciario superior, mientras que los sedimentos superficiales que las recubren corresponden a lodos terrígenos aportados por el Sistema Lagunar de Términos y los ríos Grijalva-Usumacinta.

1.2 Plataforma continental

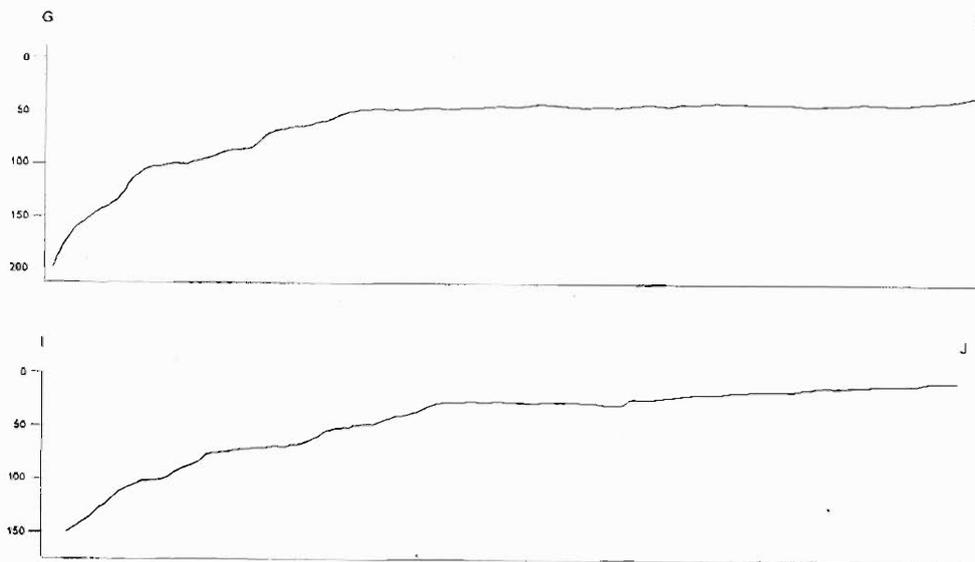
Esta unidad representa casi 66% del área en estudio, y ocupa una superficie de poco más de 104 000 km². Es resultado de la precipitación de carbonato de calcio, anhidrita, la sedimentación de fragmentos de organismos calcáreos y cambios glacioeustáticos

del nivel del mar y, por ende, de las formas kársticas resultantes, al haber quedado expuesta a los procesos atmosféricos (Bryant *et al.*, 1991).

La plataforma presenta tres superficies de nivelación o terrazas que están bien marcadas en la topografía actual de la plataforma, las cuales se localizan entre 90 y 134 m, 63 y 51 m, y 29 y 36 m, por lo que una se encuentra en la plataforma interna y dos en la externa (Figura 11).

Estas superficies se sitúan a una profundidad constante a lo largo de la región y están asociadas a restos de organismos bentónicos de aguas someras, ooides, abundantes restos de fragmentos líticos y algunos fósiles, por lo que son interpretadas como antiguas líneas de costa desarrolladas durante detenciones en las fluctuaciones del nivel del mar en el Cuaternario (Logan *et al.*, 1969).

Tomando en cuenta la distribución espacial de los sedimentos, las variaciones morfométricas y ligeros quiebres de la pendiente, la plataforma pudo dividirse en subunidades del relieve: plataforma interna y externa, las cuales a su vez se subdividieron en carbonatada y



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Terrazas de la Plataforma Campeche-Yucatán.

terrágena.

a) Plataforma continental no rodeada interna

La plataforma interna es la porción de la planicie sumergida que inicia en la línea de costa y finaliza aproximadamente en la isobata de los 50 m; el área que ocupa es de aproximadamente 78 500 km², con una pendiente que varía de 0 a 1°.

El límite inferior de esta unidad está marcado por elevaciones arrecifales, aproximadamente a 50 m de profundidad. Las rocas que conforman la plataforma interna son las margas, calizas autigénicas y biogénicas de la Formación Carrillo Puerto, las cuales constituyen la superficie de nivelación entre 35 y 50 m.

a) *Plataforma continental carbonatada no rodeada interna*: la plataforma interna carbonatada, cuya superficie es de 67 000 km², se caracteriza porque en ella se realiza una importante precipitación química de carbonato de calcio y la depositación de fragmentos de organismos de esqueleto rígido del mismo mineral, por lo que se compone de espículas de briozoarios, pelecípodos, gasterópodos y

foraminíferos. La textura de estos sedimentos varía de arena media a fina y está pobremente clasificada (Logan *et al.*, 1969, Aguayo *et al.*, 1991). Este tipo de sedimentos fue denominado por Logan *et al.* (1969) como Unidad Sedimentaria Manto-Progreso. Hacia la porción oriental de esta unidad, en los alrededores del Arrecife Alacrán, se encuentran grandes depresiones cerradas de origen kárstico; la más grande presenta un eje mayor de hasta 14 km. b) *Plataforma continental terrígena interna*: esta plataforma se caracteriza por la gran influencia continental, es decir, el aporte de material erosionado en el continente, transportado por el sistema fluvial Grijalva-Usumacinta y el aporte del sistema lagunar de Términos. La textura sedimentaria corresponde principalmente a limos y arcillas con importantes concentraciones de microorganismos plantónicos y bentónicos, especialmente de foraminíferos. En la unidad se presentan pequeñas elevaciones, denominadas bancos duros, las cuales son descritas en la unidad de origen biogénico. Las características morfométricas representativas de la unidad son una pendiente menor a 1°, una amplitud de 50 m, que inicia en la línea de costa y termina en la isobata de 50 m,

y ocupa una superficie ligeramente menor a 11 800 km² (Tabla 1 y Figura 8).

b) Plataforma continental externa no rodeada por barrera arrecifal

La plataforma externa inicia a la profundidad de 50 m y termina a 200 m bnm, donde se encuentra el quiebre de la misma; cubre un área de casi 25 600 km². La pendiente se incrementa con respecto a la plataforma interna, pero siempre es menor a 1°. La plataforma se desarrolla en rocas carbonatadas del Mioceno-Pleistoceno de la formación Carrillo Puerto, las cuales se encuentran sepultadas por depósitos de arena media a fina y lodos terrígenos (Figura 4).

Una característica peculiar de esta unidad es que se acuña, desapareciendo cerca del Arrecife Triángulos, ya que el talud de *detritus* de éste constituye la porción superior del Talud Campeche. a) *Plataforma continental carbonatada externa no rodeada por barrera arrecifal*: esta unidad siempre inicia en el borde de las construcciones arrecifales, a 50 m bnm; lo representa su límite inferior la isobata de los 200 m, donde se ubica el quiebre de la plataforma, cuya amplitud es de 150 m y su superficie de 13 600 km²; cabe mencionar que hacia la porción oriental de esta unidad, al igual que en la plataforma continental carbonatada interna no rodeada, se desarrollan depresiones cerradas de origen kárstico, así como algunos pequeños bancos arrecifales. Esta misma porción se prolonga hacia el mar, en comparación con su parte occidental. Las rocas que la constituyen están sepultadas por depósitos de arena media a fina mal clasificada (Logan *et al.*, 1969; Aguayo *et al.*, 1991), denominada Manto Progreso por Logan *et al.* (1969). b) *Plataforma continental terrígena externa*: la plataforma continental terrígena cubre un área de 12 000 km² aproximadamente, con una amplitud de 150 m, inicia a los 50 m bnm y finaliza a los 200 m bnm (Tabla 2), se caracteriza por presentar bancos duros, los cuales serán descritos en las unidades biogénicas, sepultados por depósitos terrígenos; presenta una textura fina, al estar

constituida por fragmentos de foraminíferos y minerales silíceos. La unidad se desarrolla sobre rocas que corresponden a la formación Carrillo Puerto, anteriormente descrita.

2. Marino biogénico

Las formas que constituyen este relieve están directamente relacionadas con la actividad de organismos, que a su vez se ven influenciados por las corrientes, el oleaje, la turbiedad del agua, vientos, temperatura del agua, entre otros. Se definieron, dentro de esta unidad, las construcciones de coral-alga sobre margen continental.

2.1 Construcciones de coral-algas sobre margen continental

El origen y desarrollo de estas formas se vincula a la existencia de una surgencia de aguas profundas, ricas en nutrientes, que se transportan a través de las capas de roca inferiores, por lo que se denomina surgencia interna geotérmica (*endo-upwelling*; Rougerie y Wathy, 1990). Consiste en el ascenso de sales nutritivas, necesarias para el desarrollo del arrecife, las cuales proceden de las capas oceánicas profundas subsaturadas de carbonato-aragonita, que penetran en el zócalo calcáreo poroso del arrecife y son calentadas por el flujo geotérmico, elevándose en el interior del arrecife por convección y surgiendo luego en forma difusa en su laguna, o bien, en forma más dinámica alrededor de la corona externa; desempeña un papel insustituible en la construcción y el funcionamiento de los edificios coralinos (Figura 12). Durante este ascenso también se realiza un reemplazamiento mineral conocido como dolomitización, es decir, el carbonato de calcio (CaCO₃), principal constituyente de la caliza, se reemplaza por dolomita (MgCa(CO₃)₂), lo que corresponde con la estratigrafía antes descrita.

Las aguas profundas ascienden por efecto de la surgencia interna (*endo-upwelling*), ricas en gas carbónico disuelto y pH bajo; al final de su recorrido se desgasifican, lo que provoca una precipitación de carbonatos en la matriz cal-

cárea que, de este modo, se cementa y consolida. El aporte de aguas con un elevado contenido de sales nutritivas sostiene la intensa actividad biológica (fotosintética) de las algas bentónicas y simbióticas, como las zooxantelas.

Otra posible causa de la presencia de arrecifes en el borde de la Plataforma Campeche-Yucatán, sin descartar que tal vez sean ambas las que actúen, es la surgencia de la corriente de Yucatán en el borde oriental de la plataforma a la altura de Contoy, la que se desplaza posteriormente como corriente de fondo en la plataforma somera.

El análisis de estas formas permitió definir cuatro unidades distintivas, las cuales ocupan una superficie total de poco más de 400 km², con pendientes entre 2 y 3° desarrolladas sobre la formación Carrillo Puerto. Todas las construcciones arrecifales están constituidas por la unidad sedimentaria Miembro Capas de Arena (Logan *et al.*, 1969), formada por biohermas, bostromas y clástos de esqueletos.

c) Arrecife emergido

Las formas denominadas con este término son aquellas estructuras orgánicas que rompen el espejo de agua, constituyendo islas coralinas sobre la plataforma, las cuales ocupan una superficie menor de 1 km² y se caracterizan por presentar una pared arrecifal resistente al

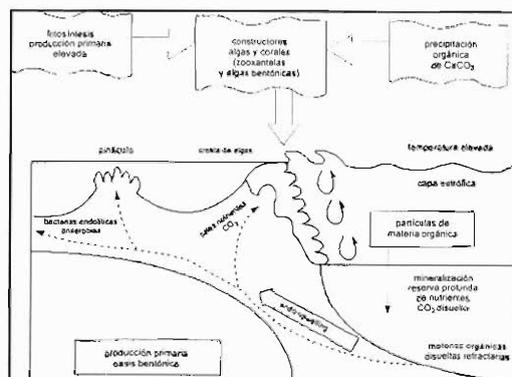
embate de olas, constituida por comunidades orgánicas vivas y por una altitud de relieve menor a 10 msnm (Tabla 2).

d) Complejo arrecifal

Este término es utilizado en el sentido propuesto por Logan (1981), ya que esta estructura orgánica presenta la totalidad de las facies sedimentarias de un complejo arrecifal maduro, como son talud distal, talud proximal, ladera del arrecife, armazón arrecifal, cresta arrecifal, llanura arrecifal y arena post-arrecifal. En la zona en estudio existe una sola estructura orgánica con estas características, conocida como Arrecife Alacrán, en la porción más oriental del área, el cuál ocupa una superficie casi de 54 km² y presenta una amplitud de relieve de 60 m a partir de la plataforma (Tabla 2).

e) Banco arrecifal

Los bancos arrecifales son aquellos arrecifes localizados sobre la Plataforma de Yucatán que no presentan la totalidad de las facies sedimentarias de los complejos arrecifales y que no cortan la superficie del espejo de agua; ocupan una superficie de alrededor de 300 km². En muchas ocasiones estas elevaciones sólo superan los 5 m de amplitud de relieve, aunque son muy abundantes, principalmente cerca del Complejo Arrecifal de Alacrán y hacia el límite noreste de la Plataforma de Yucatán.



Fuente: Tomado de Rougerie y Wathy, 1990.

Figura 12. Modelo que representa la surgencia interna.

f) Banco duro

Se refiere a aquellas elevaciones que se localizan sobre la plataforma terrígena frente a la Laguna de Términos, las cuales presentan una superficie de 66 km² y alturas generalmente cercanas a los 5 m, desarrolladas en calizas biogénicas, es decir, son construcciones arrecifales sepultadas por capas de sedimentos lodosos provenientes del continente.

3. Marino gravitacional

Las formas representativas de este relieve son las originadas por efectos de los procesos exógenos erosivos de las corrientes y los movimientos de masas. En este estudio se pudieron definir dos unidades representativas, los cañones-corredores submarinos y el cañón submarino.

3.1. Cañones-corredores submarinos

Esta unidad lineal sólo se encuentra en los taludes de Campeche-Yucatán, siendo más importante sobre el primero. Estos cañones-corredores cortan las porciones más escarpadas de los taludes y representan la respuesta a los procesos gravitacionales modeladores de una serie de pequeñas depresiones longitudinales casi paralelas a la pendiente. En algunos casos, estos elementos del relieve están favorecidos por la presencia de estructuras disyuntivas.

Estas depresiones longitudinales presentan formas de "V" en perfil transversal, mientras que en perfil longitudinal son ligeramente cóncavas, con pendientes que oscilan entre 20 y 30° (Figura 13).

3.2 Cañones submarinos

El área en estudio presenta dos grandes cañones submarinos; el más importante se conoce con el nombre de Cañón Campeche, el cual se localiza al oeste del área en estudio, el segundo no tiene una denominación específica.

El Cañón Campeche es, genéticamente, el resultado del contacto litológico entre las rocas del banco calcáreo de Yucatán al este y los diapiros de la Cuenca de Campeche al oeste, por lo que su origen es el de una depresión de contacto, en la que actualmente se desarrollan procesos de transporte y sedimentación similares a los de un cañón. La gran expresión morfológica de esta unidad es debida, principalmente, al desarrollo del Escarpe de Campeche y al ascenso, por inyección de sal, del Talud de Diapiros de Campeche, y en segundo término, a la presencia de una falla que corre de noroeste a sursureste, que funciona como plano de debilidad asociado a la diferencia litológica.

La asimetría del cañón (Figura 14) se explica por el diferente desarrollo de los taludes que lo flanquean, mientras que su magnitud (350 km desde la cabecera hasta su zona de depósito) se explica por ser una depresión de contacto. La superficie del fondo del cañón es de alrededor de 2 700 km², con una amplitud de relieve de 1 000 m, inicia a 1 000 msnm y su porción más profunda se encuentra a 2 000 msnm, las pendientes características de esta unidad varían de menos de 1 hasta 3° (Tabla 3).

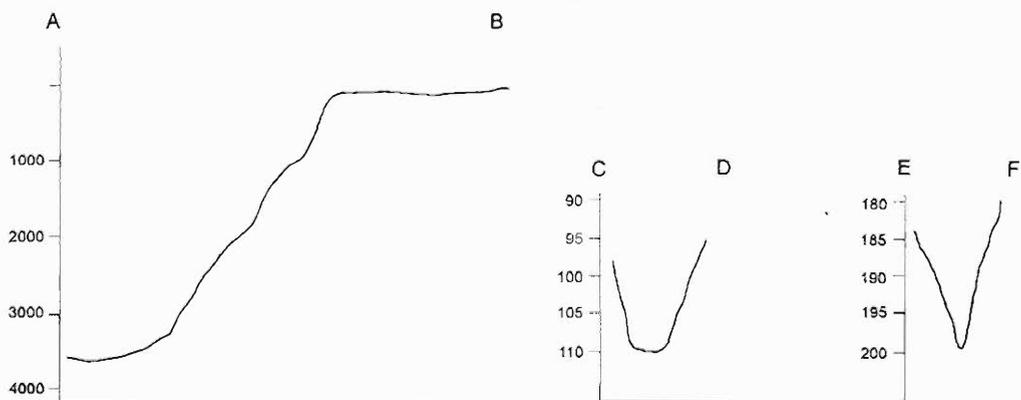
El cañón al este del área se desarrolla sobre rocas carbonatadas y parece encontrarse influenciado por una falla de desplazamiento lateral izquierda, resultado de la rotación del Bloque Yucatán con velocidad diferencial. Al parecer, los cañones submarinos de menores dimensiones generalmente están controlados por estructuras disyuntivas, que en algunos casos corresponden a expresiones morfológicas similares a fallas, debido a que presentan algunos desplazamientos horizontales. Al igual que el cañón al este, estos cañones son simétricos o casi simétricos (Figura 14).

4. Marino acumulativo

Este conjunto de formas es producto de la depositación del sedimento proveniente de las unidades sedimentarias someras, que ha sido transportado por efecto de la gravedad o de las corrientes de fondo, o de precipitación

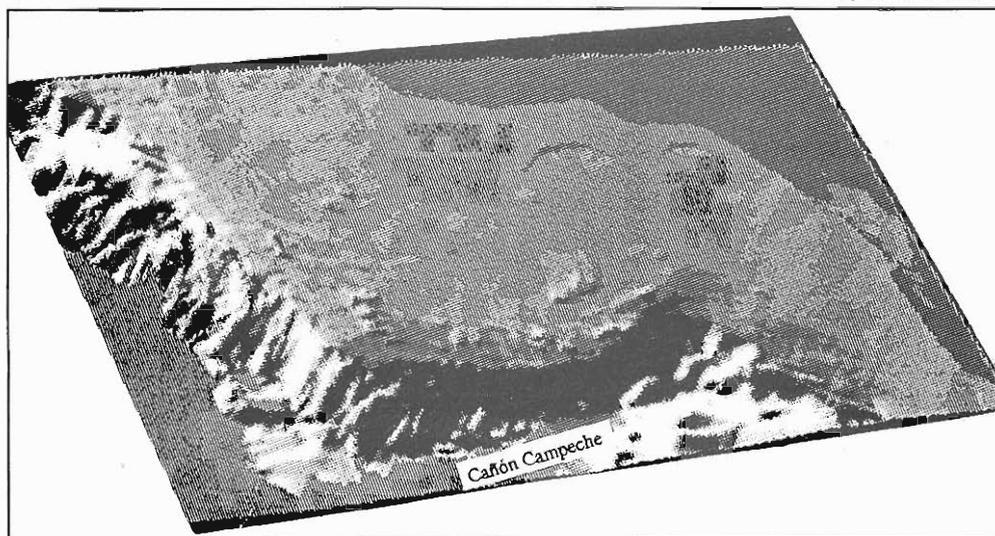
in situ de los materiales disueltos en el agua del mar o bien de la sedimentación de organismos platónicos, por lo que la textura sedimentaria de estas unidades corresponde a la

limo-arcillosa (Figura 4). En el área en estudio se reconocieron dos grandes unidades denominadas pie de continente y llanura abisal.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. A) Perfil longitudinal de un cañón-corredor en el Talud Transicional de Campeche-Yucatán. B) Perfiles transversales de un cañón-corredor en el Talud Transicional de Campeche-Yucatán.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Modelo digital de la plataforma y talud continental, donde se observa el Cañón Campeche y cañones-corredores sobre los escarpes de Campeche y Yucatán.

Tabla 1. Caracterización geomorfológica del talud y la plataforma continentales

1 Provincia sedimentaria de ambiente nerítico con estructura tabular elevada y basculada. Superficie 129 139 km²
 1.1 Subprovincia Talud Continental. Superficie 24 969 km²

Clave	Unidad	Superficie (km ²)	Geología	Sedimentos	Amplitud de relieve (m)	Profundidad a la que se encuentra	Pendiente (en grados)	Origen
1.1.1	Talud de diapiros salinos	4 683	Diapiros de Cenozoico constituidos por sal Jurásica.	Lodos terrigenos con foraminiferos.	3 200	200 m hasta los 3 500 m	De 1 hasta 30	Resultado de la inyección de sal durante el Cenozoico.
1.1.2	Escarpe de Campeche	3 031	Rocas carbonatadas químicas, biogénicas y anhidritas (Grupo Yucatán).	Limos y arcillas carbonatados (Manto Sigsbee).	2 600	200 mbnm, a 2 800 mbnm	De 2 hasta ser superior a los 45	Distensión tectónica (falla de transformación) y subsecuente crecimiento arrecifal.
1.1.3	Escarpe de Yucatán	12 474	<i>Idem</i>		2 800	200 mbnm y final a los 3 000 m	De 1 a más de 45	Distensión tectónica (riftingénesis) y subsecuente crecimiento arrecifal.
1.1.3.a	Talud Superior	8 954	<i>Idem</i>	Lodos carbonatados (Manto Sigsbee).	8 000	200 mbnm a 1 000 mbnm	De 1 a 10	<i>Idem</i>
1.1.3.b	Talud Inferior	3 520	<i>Idem</i>	Lodos carbonatados (Manto Sigsbee).	2 000	1 000 mbnm a 3 000 mbnm	5 y más de 45	<i>Idem</i>
1.1.4	Escarpe de Transición Campeche-Yucatán	3 079	<i>Idem</i>	Lodos constituidos por carbonatos.	2 800	200 mbnm a 3 000 mbnm	10 a más de 45	Distensión tectónica (falla de transformación y riftingénesis) y subsecuente crecimiento arrecifal.
1.1.5	Talud Cabecera de Cañón submarino	4 733	Rocas carbonatadas y evaporíticas que varían del Jurásico al Terciario Superior.	Lodos terrigenos constituidos principalmente por foraminiferos.	800	200 mbnm y finalizando a 1 000 m	Superiores a 3 inferiores a 30	Favorecido por falla de transformación y por procesos erosivos.

1.2 Subprovincia: Plataforma Continental. Superficie: 104 170 km²
 1.2.1 Plataforma continental no rodeada por barrera arrecifal interna. Superficie: 78 500 km²

Clave	Unidad	Superficie (km ²)	Geología	Sedimentos	Amplitud de relieve (m)	Profundidad a la que se encuentra	Pendiente (en grados)	Origen
1.2.1a	Plataforma continental carbonatada no rodeada interna	66 776	Margas, calizas autigénicas y biogénicas del Mioceno-Pleistoceno (Formación Carrillo Puerto).	Varia de arena media a fina (Manto Progreso).	50	0 mbnm a 50 mbnm	Inferior a 1	Precipitación de evaporitas y calizas, modelado por erosión subaérea.
1.2.1b	Plataforma continental interna terrigena	11 800	Margas, calizas autigénicas y biogénicas del Mioceno-Pleistoceno (Formación Carrillo Puerto).	Limos y arcillas terrigenas constituidas principalmente por foraminíferos.	50	0 mbnm a 50 mbnm	Inferior a 1	Precipitación de evaporitas y calizas, modelado por sedimentación de lodos.

1.2.2. Plataforma continental no rodeada por barrera arrecifal externa. Superficie: 25 594 km²

Clave	Unidad	Superficie (km ²)	Geología	Sedimentos	Amplitud de relieve (m)	Profundidad a la que se encuentra	Pendiente (en grados)	Origen
1.2.2.a	Plataforma continental carbonatada no rodeada externa	13 594	Margas, calizas autigénicas y biogénicas del Mioceno-Pleistoceno (Formación Carrillo Puerto).	Arena media a fina y lodos carbonatados.	150	50 mbnm a 200 mbnm	Inferior a 1	Precipitación de evaporitas y calizas, modelado por erosión subaérea.
1.2.2.b	Plataforma continental externa terrigena	12 000	<i>idem</i>	Depósitos terrigenos, con una textura fina constituidos por fragmentos de foraminíferos y minerales silíceos.	150	Inicia a los 50 mbnm y finaliza a los 200 m	Inferior a 1	Precipitación de evaporitas y calizas, modelado por sedimentación de lodos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Caracterización geomorfológica del relieve marino biogénico y gravitacional

Provincia: 2 Relieve Marino Biogénico: superficie 411 km²

Subprovincia: 2.1 Construcciones de coral-alga sobre la margen continental

Clave	Nombre	Superficie (km ²)	Geología	Sedimentos	Amplitud de relieve (m)	Profundidad a la que se encuentra	Pendiente (en grados)	Origen
2.1.1	Arrecife emergido	0.76	Margas, calizas autigenicas y biogénicas del Mioceno-Pleistoceno (Formación Carrillo Puerto).	Arenas, gravas, guijarros y bloques constituidos principalmente por fragmentos de coral.	< 10	No aplica	De 1 a 10	Arrecifes que cortan el espejo de agua.
2.1.2	Complejo arrecifal	52.53	<i>Idem</i>	Arenas, gravas, guijarros y bloques constituidos principalmente por fragmentos de coral.	60	50 m	De 1 a 10	Arrecifes que presentan todas las facies sedimentarias arrecifales.
2.1.3	Banco arrecifal	296.83	<i>Idem</i>	Arenas, gravas, guijarros y bloques constituidos principalmente por fragmentos de coral.	5-40	50 m	De 1 a 10	Arrecifes que no cortan el espejo de agua.
2.1.4	Banco duro	66.11	<i>Idem</i>	Lodos terrigenos que sepultan sedimentos coralinos	5	55-60 m	De 1 a 10	Arrecifes sepultados por lodos terrigenos.

Provincia: 3 Relieve Marino Gravitacional

Clave	Nombre	Superficie (km ²)	Geología	Sedimentos	Amplitud de relieve (m)	Profundidad a la que se encuentra	Pendiente (en grados)	Origen
3.1	Cañones-corredores submarinos		Rocas carbonatadas quimicas, biogénicas y anhidritas (Grupo Yucatán).	Lodos y arenas carbonatadas	3 300	200 mbnm a 3 500 mbnm	Entre 20 y 30	Erosión y movimientos de masa.
3.2	Cañón submarino	2 700	Rocas carbonatadas (Grupo Yucatán) y Cuerpos de sal Jurásica del Cenozoico.	Lodos carbonatados y terrigenos.	1 000	1 000 mbnm a 2 000 mbnm	De 1 hasta 3	Contacto litológico afallado con erosión y movimientos de masa y favorecido por la presencia de fallas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Caracterización geomorfológica del relieve marino acumulativo detrítico y kárstico

Provincia: 4 Relieve Marino Acumulativo Detrítico. Superficie 19 500 km²

Clave	Nombre	Superficie (km ²)	Geología	Sedimentos	Amplitud de relieve (m)	Profundidad a la que se encuentra	Pendiente (en grados)	Origen
4.1	Pie de continente	7 500	Rocas siálicas y metamórficas del Precámbrico-Paleozoico Inferior Medio.	Sedimentos terrigenos y carbonatados.	1 000	2 000 mbnm terminando a 3 000 mbnm	menor a 1	Deposición de sedimentos acarreados.
4.2	Llanura abisal	12 000	Rocas siálicas y metamórficas del Precámbrico-Paleozoico Inferior Medio.	Sedimentos constituidos por microorganismos planctónicos y precipitación <i>in situ</i> .	600	Inicia a los 3 000 y hasta 3 600 m, fuera del area en estudio	menor a 1	Precipitación <i>in situ</i> .

Provincia: 5 Relieve Kárstico

Clave	Nombre	Superficie (km ²)	Geología	Sedimentos	Amplitud de relieve	Profundidad en la que se encuentra	Pendiente (en grados)	Origen
5.1	Dolinas	39	Rocas carbonatadas químicas, biogénicas y anhidritas (Grupo Yucatán).	Varía de arena media a fina (Manto Progreso).	Variable	Entre 30 mbnm y 150 m	Variable	Disolución-erosión durante el Cuaternario al estar expuesta la plataforma.

Fuente: Elaboración propia.

4.1 Pie de continente

Esta unidad se caracteriza por estar fuertemente influenciada por el aporte de material acarreado de las colinas de Campeche, la bahía del mismo nombre y de la Plataforma Campeche-Yucatán a través del Cañón Campeche. Representa la forma de deposición de los sedimentos provenientes a manera de cono de deyección, donde ocurren frecuentes movimientos de reptación superficial (Buffler *et al.*, 1980).

El área en estudio no abarca la totalidad de esta unidad, sin embargo, ocupa una superficie de casi 7 500 km² y una amplitud de 1 000 m, que inicia a 2 000 mbnm y termina a 3 000 mbnm; presenta, además, una pendiente menor a 1°.

4.2 Llanura abisal

La llanura abisal sólo se encuentra en la porción más septentrional del área en estudio y representa una pequeña parte de la denominada Cuenca de Sigsbee, donde se encuentran las mayores profundidades del Golfo.

El área ocupada por esta unidad representa una superficie de aproximadamente 12 000 km² y pendientes menores a 1°; tiene una amplitud de relieve mínima, ya que inicia a los 3 000 m y el punto más profundo se encuentra a 3 600 m, fuera del área en estudio. Desde el punto de vista sedimentario está constituida por depositación de microorganismos plantónicos y precipitación *in situ*.

Con objeto de visualizar en forma sintética los principales atributos y contrastes de las unidades geomórficas, se hace una relación de provincias, subprovincias y unidades del relieve en las tablas 1, 2, y 3; cabe recordar que en cuanto a las superficies, éstas se estimaron con base en mediciones en escala 1:250 000 en formato *raster* con resolución de 250 m/celda.

CONCLUSIONES

Los trabajos de geomorfología submarina, que intenten analizar el origen y procesos modeladores de estas formas, implican el uso intensivo de datos e información de carácter batimétrico, geológico y geofísico, colectados a través de instrumentos y métodos indirectos. El análisis geomorfológico-cartográfico integral constituye una herramienta útil en trabajos subacuáticos. Se adaptan metodologías, generalmente utilizadas en estudios de geomorfología continental y geología marina, haciendo énfasis en el análisis cartográfico-geomorfológico. Se contribuyó de esta manera, al conocimiento de las márgenes continentales pasivas, en particular al de las de carácter carbonatado.

El trabajo permitió definir las principales estructuras disyuntivas, además de la caracterización de algunos de los atributos y propiedades del relieve, mediante la cartografía batimétrica, complementada con información de perfiles sísmicos, ecogramas, perfiles batimétricos del fondo marino, análisis de los sedimentos colectados e información geológica y geofísica. Como resultado, se propuso una leyenda acorde con la morfología presente, la cual incluye cinco unidades principales y siete secundarias en el área en investigación, las cuales están plasmadas en la Carta Morfogenética de la Porción Sureste del Golfo de México.

El trabajo se apoya en la corroboración, de manera directa e indirecta, de las teorías sobre el origen por distensión (riftogénesis) del Golfo de México, giro del Bloque Yucatán en el sentido de las manecillas del reloj, al empezar el desplazamiento lateral izquierdo de las fallas Motagua-Polochic y Motagua-Jocotan en el Terciario Tardío. Lo anterior desecha cualquier idea sobre un origen simple y no tectónico para el Golfo.

La historia geológica del área, en especial de los últimos dos millones de años, fue reconstruida; se integraron evidencias y razonamientos que indican que la plataforma es una unidad modelada tanto por procesos marinos

como por depositación de sedimentos terrígenos y precipitación de carbonatos, además de la depositación de organismos con testas o partes rígidas de su cuerpo, constituidas por carbonato de calcio. También han influenciado a la plataforma los procesos subaéreos, al haber quedado expuesta hace 18 000 años, durante el descenso del nivel del mar en la última glaciación, la Wisconsin, acaecida durante el Cuaternario.

Durante detenciones en las fluctuaciones glacioeústicas del nivel del mar se desarrollaron tres superficies de nivelación o terrazas que presentan restos de organismos bentónicos de aguas someras, ooides, abundantes restos de fragmentos líticos y algunos fósiles, por lo que se asocian a antiguas líneas de costa; dos de estas terrazas se encuentran en la denominada *Plataforma Externa Carbonatada no Rodeada* y una sobre la *Plataforma Interna Carbonatada no Rodeada*.

Al permanecer expuesta la plataforma a los procesos atmosféricos durante aproximadamente 13 000 años desarrolló importantes rasgos kársticos, tales como depresiones cerradas y elevaciones aisladas. Sobre estas últimas se establecieron las construcciones arrecifales. La plataforma carece de valles erosivos, debido a la importante infiltración y consecuente disolución-erosión de la masa rocosa, constituida por gruesos depósitos de carbonato de calcio (CaCO_3), carbonato doble de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), que constituyen a la roca caliza y dolomía respectivamente, así como evaporíticos como anhidritas (CaSO_4), yesos ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y halita (NaCl).

El desarrollo arrecifal en la plataforma se explica por el conjunto de relaciones entre dos grandes grupos de factores, los físicos y biológicos, que engloban el clima, el ambiente tectónico y los organismos existentes. La presencia de estos arrecifes en el borde de la plataforma puede explicarse por ser ésta la porción que mayor tiempo ha permanecido inundada por el agua del mar, excluyendo la terraza localizada a 90 m, aproximadamente.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo financiero proporcionado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) y del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), ambos de la UNAM, dentro del proyecto DINAMO, en el cual se elaboró la tesis de licenciatura. Se agradece la colaboración proporcionada por J. M. Figueroa Mah-Eng en la elaboración de gráficos y mapas. Por último agradecemos la revisión crítica de los dictaminadores anónimos.

REFERENCIAS

- ☞ Aguayo Camargo, J. E., A. Z. Márquez García, R. Salas Colunga, M. E. Mendoza Cantú, A. Carrillo Bañuelos y A. Pérez Rojas (1991), "Geología", en Solís Weiss, V., *Dinámica oceánica y su relación con el deterioro ambiental en la porción sur del Golfo de México*, Proyecto DINAMO, DGAPA/UNAM IN209789, Primer Informe Técnico: 29-49.
- ☞ Aguayo Camargo, J. E. y E. Carranza Edwards (1991), "Tectónica marina", *Atlas Nacional de México*, hoja Geología Marina, IV.9.5.A., escala 1:4 000 000, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- ☞ Avdeev, A. I. e I. M. Beloussev (1968), "On geomorphology of the Sea Caribe and Gulf of Mexico", *Coloquios de investigaciones del mar Caribe y regiones adyacentes*, UNESCO, FAO, ICCRA: 215-224.
- ☞ Bloom, A. L. (1978), *Geomorphology: a systematic analysis of late Cenozoic landforms*, Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA.
- ☞ Browder, W. C. (1974), *Batimetría Campeche, Camp. No. 1*, Gerencia de Exploración, Operaciones marinas, Petróleos Mexicanos, escala 1:200 000.
- ☞ Browder, W. C. (1974), *Batimetría Campeche, Camp. No. 2*, Gerencia de Exploración, Operaciones marinas, Petróleos Mexicanos, escala 1:200 000.
- ☞ Bryant, W. R., J. Lugo, C. Córdova y A. Salvador (1991), "Physiography and bathimetry", in Salvador, A. (ed.), *The Gulf of Mexico basin*. Boulder Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America: 13-30.

- Buffler, R. T., S. D. Locker, W. R. Bryant, S. T. Hall y R. H. Pilger Jr. (1980), *Atlas No. 6 Gulf of Mexico*, Ocean Margin Drilling Program, Marine Science International Woods Hole.
- De Cserna, Z. (1992), "Tectónica", *Atlas Nacional de México*, hoja Tectónica, IV.2.1., escala 1:4 000 000, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Dietz, R. S. (1964), "Wave base, marine profile of equilibrium and wave build terrace: reply", *Geological Society of America Bulletin* 75, pp. 1275-1282.
- Drake C. L. y C. A. Burke (1974), "Geological significance of the continental margins", in Burke C. A. y C. L. Drake (eds.), *Geology of the Continental Margins*. Springer-Verlag, New York.
- Emery, K. O. (1965). "Characteristics of continental shelves and slopes", in A.A.P.G. (1972). *Continental shelves origin and significance*. Selected Papers from the A. A. P. G. Serie 3. Oklahoma, USA., pp. 114-119.
- Garrison, L. E. y R. G. Martín (1973), "Geologic structures in the Gulf of Mexico basin", *Geological Society of America Bulletin*, 66:203-228.
- GEOSOURCE (1974), *Batimetría mar afuera de Progreso No. 6*, Gerencia de Exploración, Operaciones marinas, Petróleos Mexicanos, escala 1:200 000.
- ILWIS, Integrated Land and Water Information System (1990), *User's Manual*, International Institute for Aerospace and Earth Science (ITC), Enschede, The Netherlands.
- Lamadrid Maron, J. y R. Horta Carballal (1984), *Geomorfología*, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, Cuba.
- Logan, B. W. (1969), "Coral reefs and banks, Yucatán Shelf, Mexico (Yucatán Reef Unit)", *Mexico carbonate sediments and reefs, Yucatán shelf*, Mexico A. A. P. G., 1969, Memoir 11, Oklahoma, USA, pp. 129-198.
- Logan, B. W., J. L. Harding, W. M. Ahr, J. D. Williams y R. G. Snead (1969), "Late quaternary carbonate sediments of Yucatán shelf", *Mexico carbonate sediments and reefs, Yucatán shelf*, Mexico A. A. P. G., 1969, Memoir 11, Oklahoma, USA, pp. 1-128.
- Logan, M. W. (1981), "A process approach to recognizing facies of reef complex", Donald, F. T. (ed.), *European fossils reefs models*, Society of Paleontologists and Mineralogists Economics, Special publication No. 30, Oklahoma, USA, pp. 9-40.
- Lugo Hubp, J. I. (1985), "Morfoestructuras del fondo oceánico", *Boletín*, núm. 15, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 9-39.
- Lugo Hubp, J. I. (1988), *Elementos de geomorfología aplicada (Métodos Cartográficos)*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Lugo Hubp, J. I. (1989), *Diccionario geomorfológico*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Lugo Hubp, J. I. y C. Córdova (1991), "Morfogénesis", *Atlas Nacional de México*, hoja Geomorfología 1, IV.3.3., escala 1:4 000 000, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Lugo Hubp, J. I., J. F. Aceves Quezada y R. Espinasa Pereña (1992), *Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán*, Instituto de Geografía, UNAM, México, 10(2):143-150.
- Martín, G. y A. H. Bouma (1976), "Physiography of the Gulf of México", Bouma, A. H. et al. (1976), *Beyond the shelf break*, A. A. P. G. Marine Geology Comm. Short Course, 2:3-19.
- Menard, H. W. (1967), "Transitional types of under small oceans basins", *Journ. Geophys. Research*, 74:3061-3073.
- Mendoza Cantú, M. E. y G. Bocco (1998), "La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica", *Serie Varia*, núm. 17, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 25-55.
- Mina-Uhink, F., A. Rojas y S. Figueroa Huerta (1956), "Plataforma continental, conocimientos geológicos modernos y métodos usados para obtener esta información", *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, núm. 8(3-4), pp. 175-182.
- Orlova, V. N. (1981), *El mosaico móvil de la Tierra*, Ed. Nedra, Moscú (en ruso).
- Peterson, J. A. (1982), *Petroleum geology resources of southeastern Mexico, northern Guatemala, and Belice*, Geological Survey Circular, 760.

- Rezak, R. G. y E. G. Serpell (1972), "Carbonate sediments of the Gulf of Mexico", in Rezak, R. y V. J. Henry (eds.), *Contributions on the geological and geophysical oceanography of the Gulf of Mexico*, Texas A. y M. University, Oceanography Studies, vol. 3, pp. 263-280.
- Ross, M. I. y C. R. Scotese (1988) "A hierarchical tectonic of Gulf of Mexico and Caribbean region", *Tectonophysics* 155: 139-168.
- Rougerie, F. y B. Wauthy (1990), "Los arrecifes de coral: unos ecosistemas increíblemente productivos", *Mundo científico* (versión en español de Rechertee), 10(106):965-974.
- Shepard, F. P. (1948), *Submarine geology*, Harper and Row Publishers, New York, USA.
- Stephan *et al.* (1990), "Paleodynamic maps of the Caribbean", *Bulletin Soc. Geol. France*, Paris (6).
- Umgrove J., H. F. (1946), "Origin of continental shelves", in AAPG (1972), *Continental shelves origin and significance*, Selected Papers from the A. A. P. G., Serie 3, Oklahoma, USA, pp. 3-7.
- Verstappen, Th. (1977), *The use of aerial photographs in geomorphological mapping*, ITC Textbook VII-5, Enschede, The Netherlands.
- Weaver, P. (1950), "Variation in history of continental shelves", in A. A. P. G. (1972), *Continental shelves origin and significance*, Selected Papers from the A. A. P. G., Serie 3. Oklahoma, USA, pp. 351-360.
- Winker, C. y R. T. Buffler (1988), "Paleogeographic evolution of early deep water Gulf of Mexico and margins, Jurassic to Middle Cretaceous (Comancheño)", *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 72(3).318-346.