Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
Núm. 48, 2002, pp. 7-23

Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico de la Reserva de la Biosfera Calakmul, México

Gerardo García Gil*
José Luis Palacio Prieto**
Mario Arturo Ortiz Pérez**

Recibido: 25 de febrero de 2002
Aceptado en versión final: 2 de julio de 2002

Resumen. La interpretación de fotografías aéreas y la generación de un sistema de información geográfica permitió realizar el reconocimiento geomorfológico e hidrográfico de la Reserva de la Biosfera Calakmul. Se digitalizaron cartas topográficas escala 1:50 000 con curvas de nivel cada 10 m, se fotointerpretaron rasgos físicos e hidrográficos en escala 1:25 000 y se corrigieran digitalmente para incorporarlos al Sistema de Información Geográfica. Las geoformas de la zona de estudio fueron clasificadas por su morfología y por la evidencia de procesos erosivos y de disolución kárstica. Las unidades de relieve determinadas son: laderas, mesetas estructurales de desarrollo kárstico; valles fluviales y kársticos, planicie estructural y zonas de inundación temporal y permanente. La red hidrográfica superficial está poco desarrollada, por lo que dominan condiciones de infiltración de las aguas pluviales y fluviales que favorecen la alimentación a los acuíferos .

Palabras clave: Geomorfología, hidrografía, Calakmul, México.

Reconnaissance géomorphologique et hydrographique de la Réserve de la Biosphère de Calakmul, Mexique

Resumé. L'interprétation de photographies aériennes et l'élaboration d'un système d'information géographique ont permis la reconnaissance géomorphologique et hydrographique de la Réserve de la Biosphère de Calakmul. On a procédé à la digitalisation des cartes topographiques au 1:50 000 en courbes de niveau d'équidistance 10 mètres ainsi qu'à l'interprétation des traits physiques et hydrographiques à partir de photographies aériennes au 1:25 000 corrigées digitalement afin d'être incorporées au système d'information géographique. Les géoformes de la zone d'étude ont été classées en fonction de leur morphologie et sur la base des traces de processus d'érosion et de dissolution karstique. Les unités de relief sont classées en types de versants, surfaces structurales d'origine karstique, vallées fluviales et karstiques, plaines structurales et zones inondables, périodiques et permanentes. Le réseau hydrographique superficiel est peu développé car prévalent des conditions d'inflitration des eaux pluviales et fluviales qui favorisent l'alimentation des nappes aquifères.

Mots-clefs: Géomorphologie, hydrographie, Calakmul, Mexique.

INTRODUCCIÓN

La península de Yucatán es reconocida dentro del contexto mexicano como una unidad cultural, fisiográfica, geológica y geomorfológica (López, 1975; Lugo, 1999). Al norte y oeste limita geográficamente con el Golfo de México (depresión de Sigsbee), al noreste con el canal de Yucatán; al este con el Mar Caribe (Cuenca de Yucatán); en el extremo sur se extienden el Petén guatemalteco y Belice, países a través de los cuales existe una comunicación física y biótica con América Central (Figura 1).

La península de Yucatán abarca una superficie de más de 300 000 km^2, prácticamente no posee escurrimientos superficiales perennes, en cambio, son frecuentes las depresiones inundadas e inundables asociadas a fallas y fracturas, que favorecen las condiciones para la infiltración a profundidad y,

* El Colegio de la Frontera Sur, ECOSUR-Chetumal, Carretera Chetumal-Bacalar, Km. 2, Zona Industrial No. 2, 77049, Chetumal, Quintana Roo. E-mail ggarcia@ecosur-qroo.mx
** Instituto de Geografía, UNAM, Cd. Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: palacio@servidor.unam.mx; maop@igiris.igeograf.unam.mx

onsecuentemente, la disolución de las rocas calcáreas. Las condiciones litológicas, estructurales y las características morfodinámicas han dado lugar a una morfología crkárstica de mesetas con colinas y microvalles, valles kársticos de disolución *(poljes)* y miles de dolinas de muy distintas dimensiones (Lugo, 1999).

Las comunidades vegetales de esta unidad física están conformadas principalmente por selvas, manglares y vegetación hidrófila, forman parte de una gran masa forestal del trópico mexicano y centroamericano. Antes del proceso de colonización reciente del trópico, las selvas de México cubrían casi la totalidad de la península de Yucatán, además de los estados de Veracruz, Tabasco y las tierras bajas de Chiapas. En los últimos cuarenta años, la dinámica del crecimiento demográfico y económico de la región han tenido un impacto evidente en la disminución de la superficie de selva en el sureste del país (Revel, 1980; Szekely y Restrepo 1988).

La zona en estudio se ubica en las selvas de Calakmul, las cuales se encuentran en el centro y sur de la península de Yucatán, en una posición de difícil acceso a la acción humana. Las condiciones físicas y climáticas que prevalecen en estas selvas son extremas y poco apropiadas para los proyectos de colonización establecidos en el área.

La morfología del terreno con pocas deformaciones y la naturaleza kárstica del subsuelo propician que durante la temporada de lluvias (junio-noviembre), extensas superficies de selva permanezcan inundadas en algunas zonas. La inexistencia de un sistema fluvial desarrollado y la alta permeabilidad del terreno favorecen la infiltración de las aguas pluviales a profundidad.

En otras zonas, por el contrario, durante la estación de secas las aguas superficiales son escasas y se reducen a pequeñas depresiones de disolución kárstica (dolinas), localmente llamadas "aguadas", y eventualmente los cuerpos de agua de dichas depresiones se agotan durante el estiaje. La escasez de agua para el consumo humano, así como para el desarrollo de actividades productivas, ha sido el factor limitante para la colonización humana de la selva y para lograr el desarrollo social de las comunidades que la habitan.

El estudio del medio físico de la reserva es útil para orientar acciones tendientes al ordenamiento y seguimiento del plan de manejo, así como para reconocer prioridades de investigación, debido a que aporta el conocimiento de la distribución de las formas terrestres y de los fenómenos modeladores del relieve. En este estudio se emplean procedimientos comúnmente utilizados en levantamientos cartográficos, tales como interpretación de fotografías aéreas y generación de una base geográfica de datos, que incluye varias coberturas temáticas (topografía, hidrografía, suelos, geología, geomorfología, entre otras), las cuales son introducidas mediante técnicas digitales en un sistema de información geográfica para su análisis y representación gráfica.

La región de Calakmul

En las últimas décadas algunos sectores de gobierno y de la sociedad han mostrado interés por la conservación de los ecosistemas tropicales. Una de las estrategias seguidas ha sido la conservación *in situ,* por lo que se han decretado áreas silvestres protegidas bajo distintas modalidades.

En la península de Yucatán varios tipos de ecosistemas se han protegido, creándose como reservas federales, estatales y privadas. Los ecosistemas que han quedado bajo alguna categoría de manejo incluyen selvas, lagunas costeras, litorales, humedales, zonas arrecifales, etc. Las selvas del sur de la península fueron protegidas mediante

decreto federal publicado el 23 de mayo de 1989 en el cual se establecen como Reserva de la Biosfera de Calakmul, Campeche (RBC), con una superficie de 723 185.12 ha. Comprende dos zonas núcleo y una zona de amortiguamiento: la zona núcleo I (sur) de 147 915.50 ha, la zona núcleo II (norte) con 100 345.0 ha y la zona de amortiguamiento tiene 474 924.62 ha (Figura 1). La RBC es el área protegida con mayor superficie de selva tropical a nivel nacional y sirve como un corredor biológico que favorece la migración de especies animales y la conservación de la selva tropical.

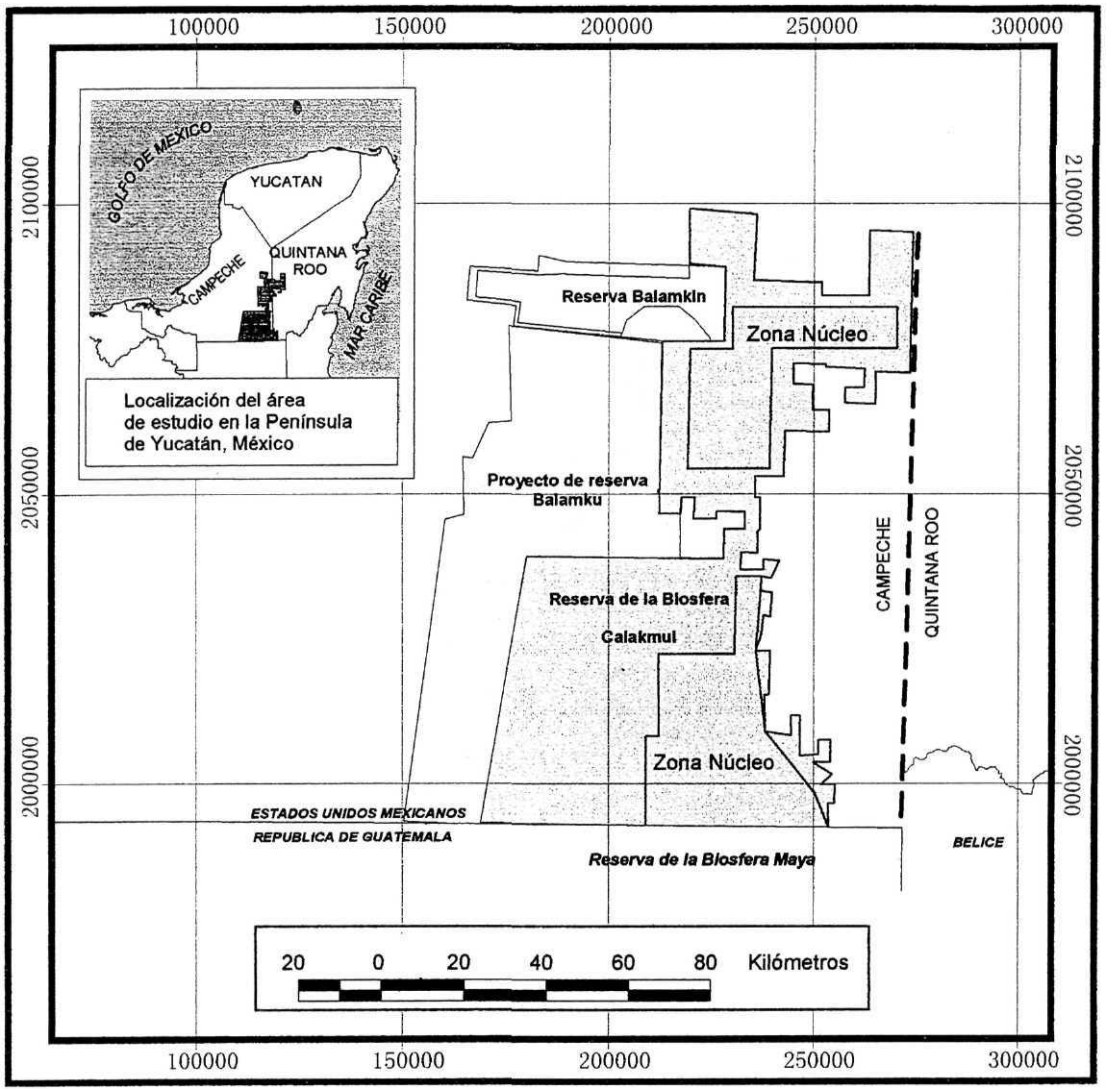

Figura 1. La Reserva de la Biosfera Calakmul forma parte de un sistema de reservas en el centro de la península de Yucatán y norte de Guatemala Estas reservas permiten el flujo genético de especies al incrementarse la superficie de selvas bajo protección y mantenerse la continuidad forestal entre ellas.

A la declaratoria de creación de la reserva Calakmul, se le ha sumado un decreto de carácter estatal para la creación de la reserva Balamkin (10 000 ha); actualmente el gobierno de Campeche proyecta la creación de un área protegida denominada Balamku con aproximadamente 409 000 ha. Además, existe otro proyecto para la creación de una reserva al noreste de Calakmul en el estado de Quintana Roo, Balam Káax. Considerando las áreas protegidas de Guatemala y Belice suman más de 2 000 000 ha, por lo que se denomina la Gran Selva Maya, resultando así que su valor es fundamental para mantener poblaciones silvestres a largo plazo en el sureste de nuestro país (Figura 1).

Las selvas de Calakmul han sido impactadas en los últimos treinta años por un proceso de colonización humana y la sustitución de la vegetación por actividades agropecuarias (Pat, 2000; García y Pat, 2001). En décadas anteriores no hubo una ocupación humana permanente en la selva, debido a que las actividades que se practicaron fueron de carácter temporal, básicamente extracción del látex del chicozapote para producir el chicle y la extracción selectiva de maderas preciosas, principalmente cedro y caoba.

La política gubernamental de fines de los años sesenta abrió las selvas del sureste a grupos de campesinos de otros estados de la República, con el fin de proseguir con el reparto agrario nacional y ampliar la frontera agropecuaria del país a través de dotación de tierras. Las selvas que actualmente ocupan la RBC comprenden ampliaciones forestales, dotaciones ejidales, nuevos centros de población y propiedades privadas. Actualmente se estima una población aproximada de 700 habitantes dentro de la reserva (García y Pat, 2001).

El tipo y la dinámica de las actividades productivas realizadas en la selva se han ajustado al comportamiento de los elementos del clima en la región. La temperatura media anual en las selvas de Calakmul es de 22 a 26° C; la precipitación media anual oscila entre 1 200 y 1 500 mm en el centro y aumenta gradualmente la humedad al sur en donde oscila entre 1 500 y 2 000 mm (INEGI, 1982). Por tanto, en el área en estudio prevalecen condiciones cálidas y subhúmedas, clasificándose así como clima que corresponde al subtipo Ax'(w_0) (i')gw" (Orellana, 1999). El período lluvioso es de junio a noviembre, se interrumpe aproximadamente durante treinta días (entre julio y agosto) por la presencia del fenómeno meteorológico conocido como vaguadas polares que impiden el paso de los vientos alisios, provocando la sequía intraestival (canícula).

La humedad que penetra en las selvas de Calakmul se debe a los vientos del noreste que arrastran humedad a su paso por el Océano Atlántico y mar Caribe, por lo que la vertiente oriental es más húmeda. La humedad que recibe Calakmul varía según la incidencia de tormentas tropicales en el mar Caribe que siguen normalmente un desplazamiento al oeste. Cuando las tormentas tropicales se convierten en huracanes aportan mayores cantidades de agua y provocan la activación de los sistemas hidrológicos, quedando así grandes extensiones de selva inundadas. Las precipitaciones en invierno ocurren por la presencia de masas de aire frío que descienden del norte.

La península de Yucatán es una plataforma de rocas calcáreas que sobreyacen al basamento metamórfico de edad paleozoica (López, 1975); aflora además una secuencia de rocas calizas del Cenozoico, con deformaciones poco significativas. En las selvas de Calakmul se observan afloramientos del Paleoceno, que forman el relieve con mayor altitud en la península (380 m). Butterlin y Bonet en 1963 reportaron rocas calizas con arcilla parcialmente silicificadas, reconocibles por su color café, blanco o amarillo, dispuestas en capas dolomitizadas, con presencia de nódulos de pedernal, yeso y micro-

fauna mal preservada; casi siempre se encuentran cubiertas por una capa blanda de material intemperizado llamado localmente "caliche" y por arenas margosas. Las calizas del Paleoceno forman los afloramientos más antiguos en la península de Yucatán, donde se aprecia el relieve más afectado por influencia de la tectónica; éstos se localizan en el extremo sur en los límites con Guatemala y Belice. Al centro y norte de la península afloran el cuaternario, eoceno y mioceno.

Los depósitos del cuaternario en la RBC están restringidos a superficies negativas o de acumulación de depósitos remanentes de la disolución de rocas calizas, que corresponden a material no consolidado formado por gravas, arenas, limos y arcillas calcáreas (Figura 2).

Métodos y materiales

Este trabajo fue realizado a partir del análisis de los resultados generados por la cartografía disponible del área en estudio, así como de la información obtenida mediante la fotointerpretación de pares estereoscópicos que dieron cubrimiento al área de la reserva. La información fue capturada en formato digital para ser capturada en formato digital para ser ingresada al sistema de información geográfica (SIG) ARC/INFO para su análisis. La información digitalizada de cada una de las coberturas temáticas en el SIG fue complementada y modificada con base en la información obtenida a partir de las fotografías aéreas y trabajos de validación de campo. En el Cuadro 1 se muestran las coberturas temáticas generadas en este estudio.

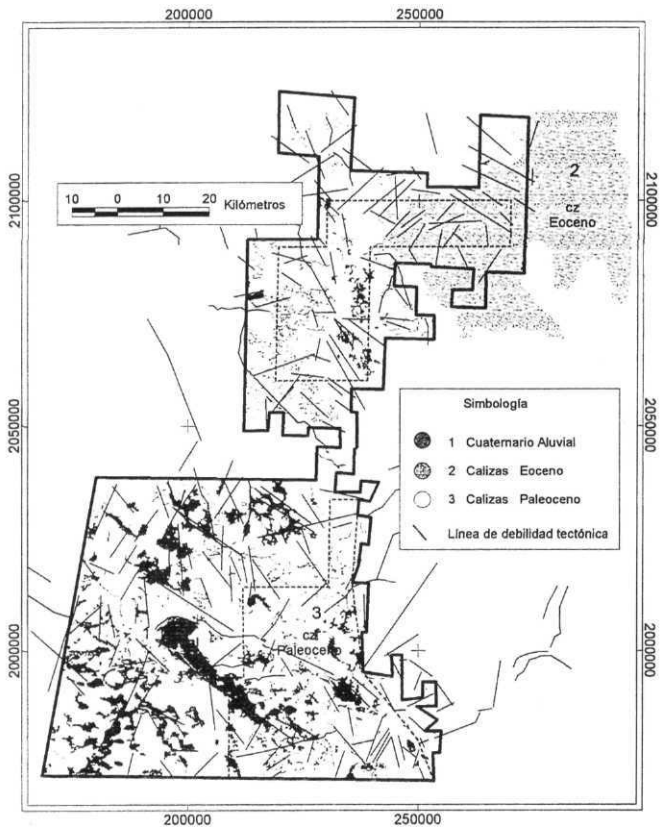

Figura 2. Mapa geológico y principales alineamientos tectónicos de la RBC.

Cuadro 1. Coberturas temáticas elaboradas en este estudio

Cobertura temática	Descripción	Fuentes cartográficas
Curvas (arcos)	Curvas de nivel cada 10 m.	INEGI 1:50,000
Hipsometría (polígonos)	Hipsometría. Rangos hipsométricos cada 10 m.	INEGI 1:50,000
Hidrografía superficial (arcos)	Hidrología superficial, ríos y escurrimientos superficiales.	INEGI 1:50,000 Elaboración propia
Hidrología superficial (polígonos)	Hidrología superficial. Cuerpos de agua.	INEGI 1:50,000 Elaboración propia
Reserva (arcos y polígonos)	Poligonal de la reserva según el decreto que la estableció. Zonas núcleo y áreas de amortiguamiento.	Cuadro de construcción Decreto presidencial.
Infraestructura de comunicación (arcos)	Vías de comunicación principales y secundarias.	INEGI 1:50,000 Elaboración propia
Geología	Unidades geológicas y litológicas.	INEGI 1:250,000 Elaboración propia
Edafología	Tipos de suelos según clasificación FAO-UNESCO modificada por DETENAL.	INEGI 1:250,000 Elaboración propia
Geomorfología	Principales formas del relieve.	Elaboración propia

La carta base fue obtenida de la digitalización de 18 cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) escala 1:50 000, que dan cubrimiento a la reserva, realizándose mediante un sistema de codificación numérica de los atributos según característica de arco o polígono. Posteriormente, se editaron las coberturas geográficas, conexión de arcos y polígonos, etiquetado de rasgos, eliminación de seudonudos y corrección de errores. La digitalización de las cartas topográficas incluyó las curvas de nivel cada 10 m.

Se interpretó un juego de 1 500 fotografías aéreas a color de 1995, en escala aproximada 1:25 000, para lo cual se utilizaron estereoscopios de campo y de espejos, las cuales fueron digitalizadas y corregidas (resección fotogramétrica) usando el programa PHOTOGIS que requiere dos insumos: *a)* coordenadas de control obtenidas en campo con GPS *Trimble* (con corrección diferencial posproceso) y de la cartografía topográfica para puntos identificables en las fotografías y *b)* el modelo digital del terreno en formato TIN *(Triangular Irregular Network).*

La carta geomorfológica fue elaborada con base en la interpretación de las fotografías aéreas y el análisis de la geometría de las curvas de nivel (Lugo, 1991), así como la generación del modelo de elevación del terreno *(TIN)* en ARC/INFO, el cual sirvió para verificar líneas de debilidad tectónica evidenciadas por escarpas y dolinas alineadas.

La carta de suelos fue generada tomando como base la información del INEGI escala 1:250 000; posteriormente se realizó una redefinición y agrupación de las unidades edáficas en complejos de suelos.

Los criterios para la definición de los complejos de suelos consideran los tipos de vegetación, los procesos que actúan en la formación del suelo en la región (tipo de relieve, el comportamiento del agua en el suelo y los tipos de arcilla; se encontraron dos

condiciones físicas: sitios secos (xéricos) y sitios húmedos y subhúmedos (hidromórficos).

La carta geológica fue elaborada a partir de la carta geológica de INEGI escala 1:250 000, a la cual se le ajustaron los límites de las unidades litológicas, utilizando el modelo de elevación de terreno y las fotografías aéreas. En ella se identificaron líneas de debilidad tectónica.

En la elaboración de la cobertura de hidrografía superficial, se reconocieron los escurrimientos de primer orden sobre las cartas topográficas escala 1:50 000 del INEGI y se complementó con la interpretación de las fotografías aéreas; permitió generar una cobertura de arcos. Las corrientes fueron clasificadas en intermitentes, perennes y pérdidas. La cobertura de cuerpos de agua (polígonos) fue obtenida a partir de la fotografía aérea (especialmente las aguadas) y complementada con los rasgos reconocidos en la cartografía de INEGI.

RESULTADOS

Suelos

En el área de la RBC existen complejos de suelos (Figura 3) del tipo de los vertisoles, gleysoles y fluvisoles sobre relieves de valles y depresiones inundadas o inundables; esta asociación ocupa una superficie de 126 000 ha (17.5%) de la reserva.

Este tipo de suelos tiene una cubierta vegetal de selvas bajas subperennifolias y selvas bajas inundables. Los suelos del tipo vertisoles son los más profundos de la región y son conocidos localmente como *ak'alches* y según la clasificación FAO-UNESCO (INEGI) tienen las siguientes variantes: cálcicos, sálicos, sódicos e hísticos; en zonas inundables se encuentran los gleysoles cálcicos.

Al margen de los escurrimientos superficiales sobre incipientes terrazas fluviales se desarrollan suelos de tipo fluvisoles cálcicos.

Otras asociaciones de suelos se desarrollan sobre formas del relieve positivo, como colinas, laderas y mesetas de desarrollo kárstico. En estos relieves evolucionan suelos jóvenes del tipo de los litosoles, los que se caracterizan por su escasa profundidad, alta pedregosidad e influencia del material parental. Las rendzinas son suelos de color pardo a rojizo, típicos de sustratos calizos. Los litosoles y las rendzinas ocupan una superficie aproximada de 596 000 ha (82.5%) de la RBC.

Geomorfología

La distribución espacial de las unidades descritas se muestra en la Figura 4. Las unidades geomorfológicas identificadas son: *a)* mesetas estructurales de desarrollo kárstico, *b)* laderas según el grado de inclinación, *c)* planicie estructural de nivel de base, *d)* valles kársticos (depresiones tectónicas) y fluviales en formación, *e)* relieve erosivo. La extensión aproximada de cada una de las unidades geomorfológicas de la reserva se resumen en el Cuadro 2.

En la RBC, las mesetas estructurales de desarrollo kárstico cubren aproximadamente el 65% de la superficie total, por lo que resultan ser la unidad geomorfológica dominante. Evolucionan a partir de un abombamiento de la plataforma caliza que alcanza los 380 m snmm (Figura 5). Sobre esta superficie elevada se desarrollan valles kársticos por encima de depresiones de origen tectónico. Las mesetas forman un relieve de colinas y microvalles de morfología variada.

Considerando el relieve superficial de las mesetas, éstas se clasificaron en cuatro tipos, según la densidad y altura de las colinas y el tamaño de los microvalles:

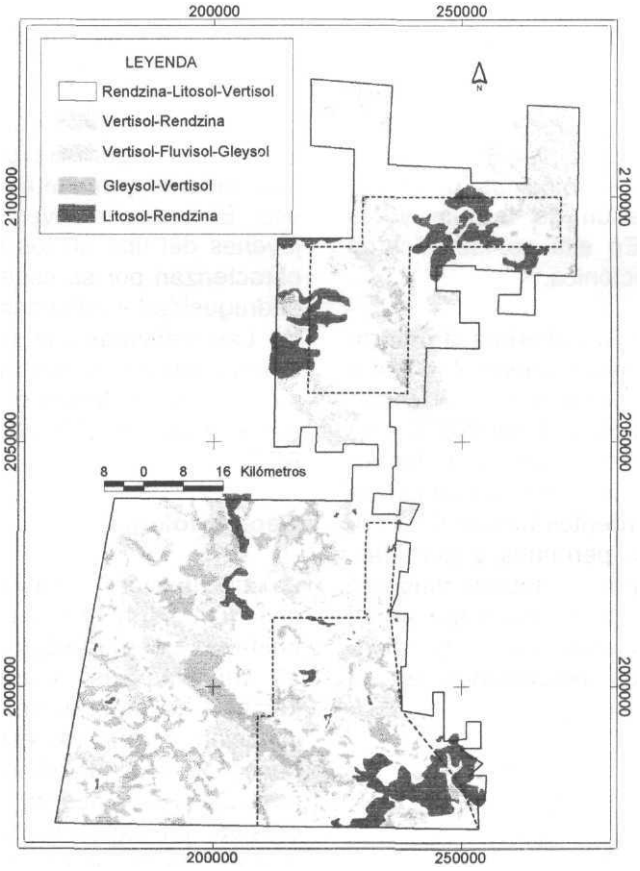

Figura 3. Mapa de la distribución de asociaciones de tipos de suelos en la RBC.

1. Las mesetas con mayor relieve tienen colinas con más de 50 m de altura y son poco extensas en la reserva (4.3%), se localizan en el centro y sureste de la misma, cerca del límite con la República de Guatemala (Figura 6) y están en el rango altimétrico más alto, entre los 300 y 390 msnm (la mayor altitud en la península de Yucatán); ello ha favorecido la formaciónn de barrancos entre las mesetas que alcanzan 100 m de profundidad. Las condiciones ambientales favorecen el desarrollo de la selva alta perennifolia, creando un ambiente único en la región. Estas mesetas se distinguen por presentar colinas simétricas de cimas redondeadas y laderas de pendiente fuerte.

2. Las mesetas con colinas de 20 a 50 m de altura se desarrollan en un piso altitudinal entre los 300 y 350 msnm. Su relieve se caracteriza por colinas asimétricas y de menor densidad; los microvalles existentes tienen mayor superficie que en las mesetas del primer tipo; es más frecuente la formación de dolinas y uvalas. Sobre las laderas se forman escurrimientos superficiales o barrancos jóvenes que miden 20 m de profundidad. Este tipo de mesetas se localiza al suroeste de la reserva y en la zona norte.

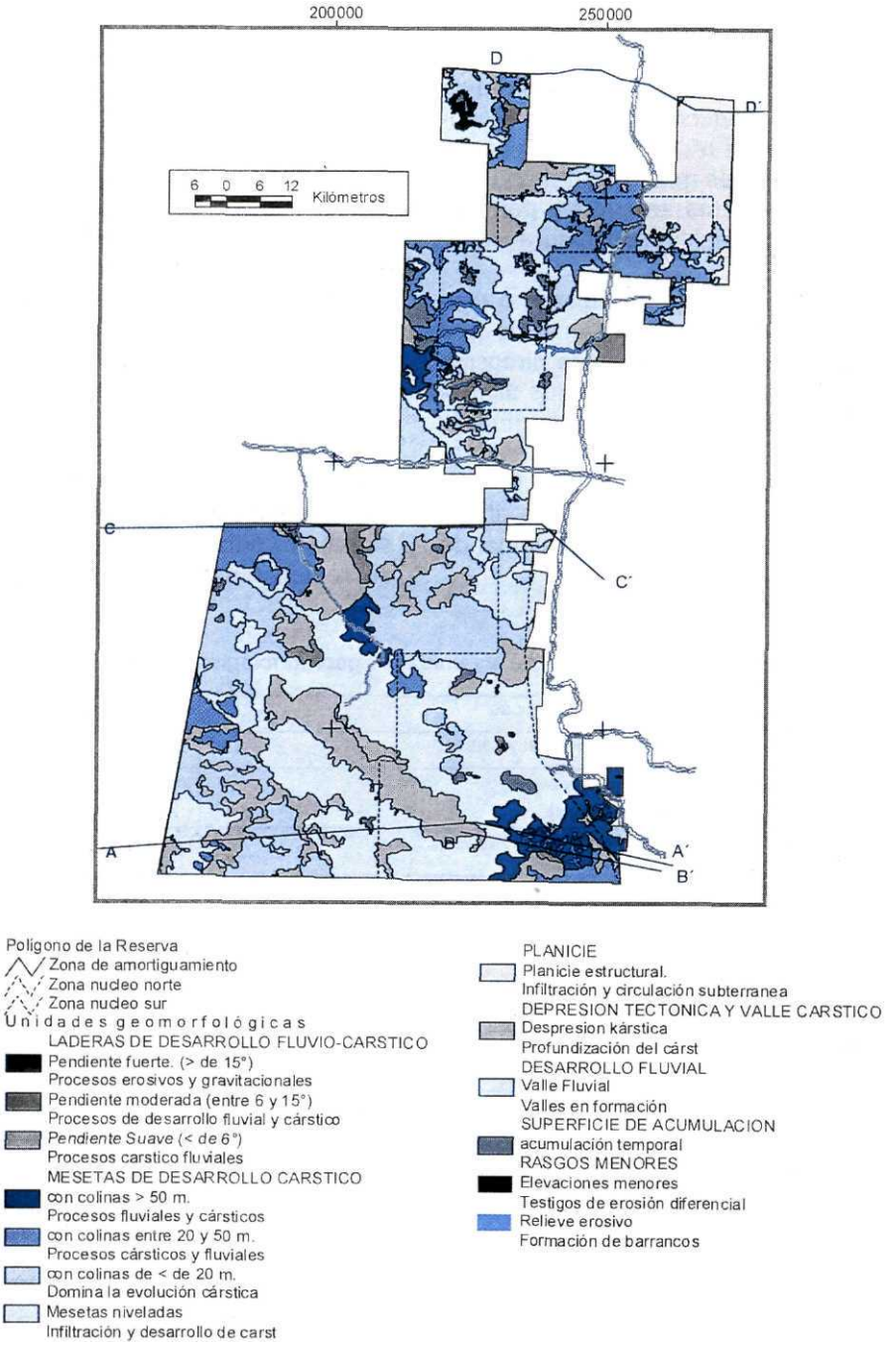

Figura 4. Mapa de tas principales unidades geomorfológicas de la RBC.
Las líneas indican la dirección de los perfiles topográficos.

3. Las mesetas cuyas colinas miden menos de 20 m de altura tienen colinas dispersas, se encuentran entre 200 y 300 msnm, son asimétricas y con laderas de poca pendiente que terminan en microvalles de mayor amplitud. Se distribuyen principalmente en el centro y occidente de la reserva. El sistema hidrológico superficial es más desarrollado que en los tipos de mesetas anteriores, pero sin llegar a constituir drenajes bien integrados.

4. Las mesetas niveladas se reducen a colinas testigo dispersas, se localizan entre 200 y 300 msnm. Tienen una marcada dirección noroeste-sureste en el sentido de los alineamientos principales, carecen de escurrimientos superficiales, por lo que no hay evidencias de disección fluvial, predomina la infiltración, ocupan una mayor superficie al sur de la reserva y tienen un rango altitudinal de 200 a 300 msnm.

En el área en estudio, la distribución de vertientes es un fenómeno limitado, debido a la tectónica, ocupan el 6.5% de la reserva y se encuentran en torno a las mesetas, y limitan valles y depresiones kársticas (Figura 7). Las laderas forman la vertiente oriental y occidental de la reserva, están cubiertas por selvas medianas y altas, se dividen en: a) Laderas de pendiente fuerte y abrupta con una inclinación superior a los 25°; se desarrollan barrancos de régimen temporal que alcanzan 100 m de profundidad. b) Laderas de pendiente moderada a fuerte (6 a 25°), existe escurrimiento temporal e infiltración, se desarrollan suelos del tipo de los litosoles y rendzinas; se localizan entre mesetas kársticas a diferente altitud. c) Laderas de pendiente débil a moderada (menos de 6°); por su baja inclinación se encuentran los cauces de régimen estacional de mayor longitud e

Cuadro 2. Superficie de las unidades geomorfológicas de la RBC

Unidades geomorfológicas	hectáreas	Porcentaje
Laderas de Desarrollo Fluvial y kárstico		
Laderas de pendiente fuerte y abrupta (> de 15°) (ocurrencia de procesos gravitacionales y erosivos)	1 114.86	0.15
Laderas de pendiente moderada a fuerte (6 a 15°) (ocurrencia de procesos de desarrollo fluvio-kárstico)	23 205.09	3 2 2
Laderas de pendiente débil a moderada (< de 6°) (ocurrencia de procesos kársticos y fluviales)	22 595.00	3.13
Mesetas de desarrollo Kárstico		
Mesetas con colinas de mas de 50 m de altura	31 294.35	4.34
Mesetas con colinas de hasta 50 m de altura	75 675.35	10.49
Mesetas con colinas de hasta 20 m de altura	159 755.38	22.14
Mesetas niveladas	273 652.68	37.93
Valles y planicies		
Planicie estructural	1 858.70	0.26
Sup. de acumulación temporal	14 032.79	1.94
Valle Fluvial	21 099.55	2.92
Valle kárstico (Polje)	90 452.80	12.54
Rasgos del relieve		
Elevaciones menores	1 866.24	0.26
Relieve erosivo	4 877.84	0.68
	721 480.64	100.00

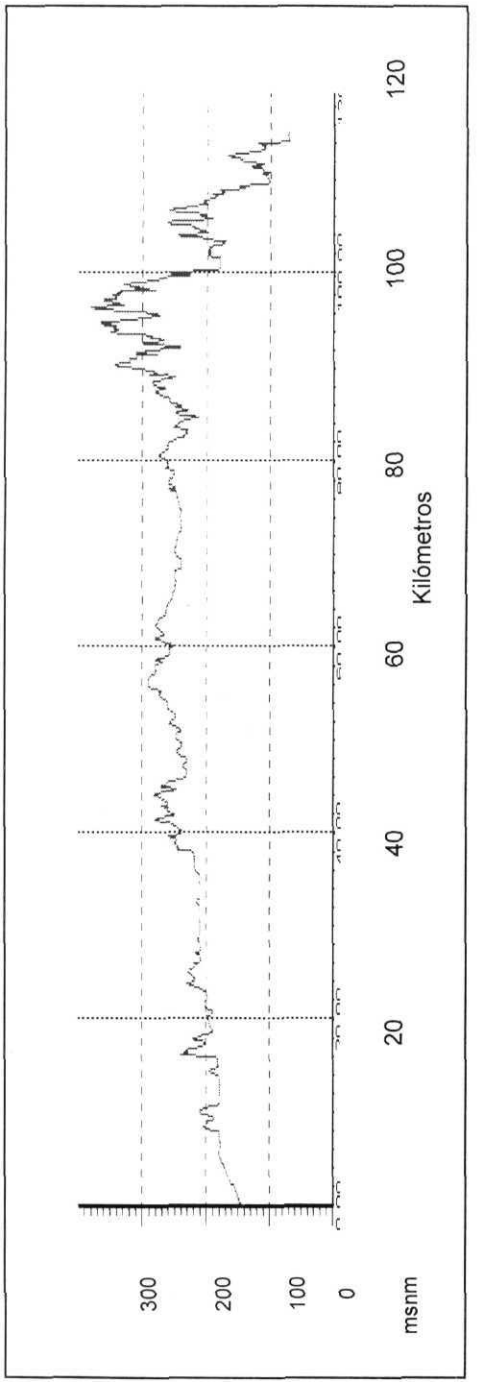

Figura 5. Perfil topográfico A-A´, se muestran en el extremo derecho las mayores elevaciones de la reserva; al centro e izquierda se observan pisos altitudinales formados por mesetas de desarrollo kárstico

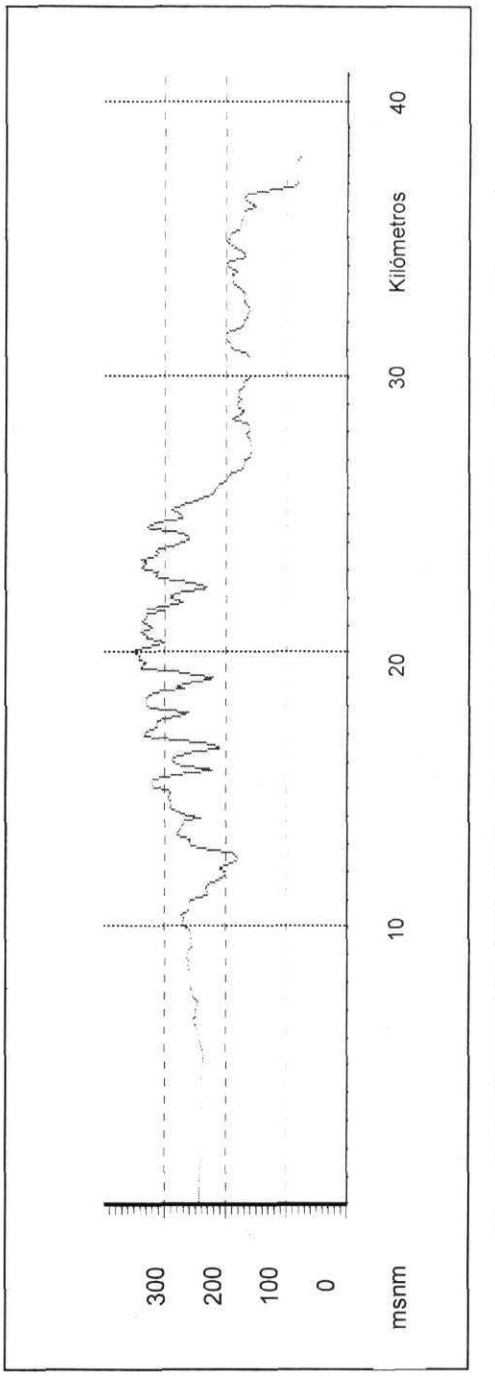

Figura 6. Perfil topográfico B-B´, detalle del extremo sureste de la reserva en donde se ubican cañones de más de 100 m de profundidad que cortan mesetas de desarrollo kárstico.

La planicie estructural de nivel de base es una superficie de altitud inferior a 100 msnm (Figura 8). Esta superficie se caracteriza por ser plana y no existen evidencias superficiales de escurrimiento, sólo áreas de inundación temporal y permanente.

Los valles de desarrollo kárstico están controlados estructuralmente, tienen un fondo plano atravesado por escurrimientos superficiales de régimen intermitente. Se encuentran sujetos a inundaciones periódicas durante la estación lluviosa, por lo que desplazan grandes volúmenes de agua superficial y subterránea. Al sur de la reserva se encuentra un gran colector, que es un valle kárstico de más de 45 km de longitud, se ubica sobre una línea de debilidad tectónica de orientación noroeste-sureste y es drenado por el río "El Laberinto" que es una corriente perenne que escurre en forma superficial y subterránea. En este valle fue emplazado uno de los centros prehispánicos más importantes del mundo maya, Calakmul.

Los valles fluviales son incipientes y se localizan entre las mesetas, se distinguen por tener un dren superficial principal con tributarios estacionales. Estos pequeños valles modelan líneas de debilidad tectónica.

El nivel de evolución del desarrollo kárstico en la región de Calakmul es diferenciado y puede clasificarse en tres grados, según su intensidad: *a)* El desarrollo kárstico es alto, cuando el relieve muestra evidencias morfológicas de haber sido modelado por disolución y la superficie se ha reducido a valles y planicies con pequeñas elevaciones aisladas. Se encuentra en las superficies con menor altitud, y con escurrimiento superficial reducido a un cauce central o lateral de régimen intermitente, sin tributarios epígeos (superficiales). Domina la infiltración a profundidad, por lo que el escurrimiento es hipógeo (subterráneo). *b)* El desarrollo kárstico es de nivel medio o indiferenciado, cuando alternan condiciones hídricas superficiales y zonas de infiltración, por lo que el relieve es complejo y está formado por mesetas y laderas. *c)* El desarrollo kárstico es bajo, cuando dominan condiciones de escurrimiento superficial y circulación epígea, se localiza sobre mesetas con mucho relieve y laderas de cierta pendiente, en las mayores altitudes de la zona de estudio (Figura 9).

Hidrografía

El comportamiento hídrico en la RBC tiene una importante función en la distribución y dinámica de las poblaciones de fauna y flora silvestres, así como en el fenómeno de colonización humana. La calidad del agua en la región es considerada mala, debido al exceso de sulfatos de calcio, que la hacen no apta para consumo humano, de tal forma, que las fuentes disponibles para consumo son aguas pluviales almacenadas en cisternas o aguadas. Considerando la permeabilidad de las rocas en Calakmul se pueden distinguir tres tipos de superficies: superficies de permeabilidad nula (acumulación permanente), superficies de permeabilidad baja (flujo lento y muy lento) y superficies de permeabilidad alta (desarrollo kárstico).

Las superficies de permeabilidad nula mantienen condiciones de inundación permanente, corresponden a cuerpos lacustres y dolinas inundadas; estas superficies reciben aguas pluviales durante la estación lluviosa y forman depresiones lacustres y palustres en cuyo fondo se acumulan suelos hidromórficos del tipo de los gleisoles.

Durante la estación húmeda anual, las superficies de inundación temporal (permeabilidad baja) acumulan aguas pluviales del escurrimiento superficial, formando depósitos de origen aluvial en superficies inundables. La mayor superficie en la RBC tiene permeabilidad alta, producto de la litología superficial (rocas calizas solubles fracturadas). La topografía formada por superficies con poco relieve favorece el desarrollo del *karst.*

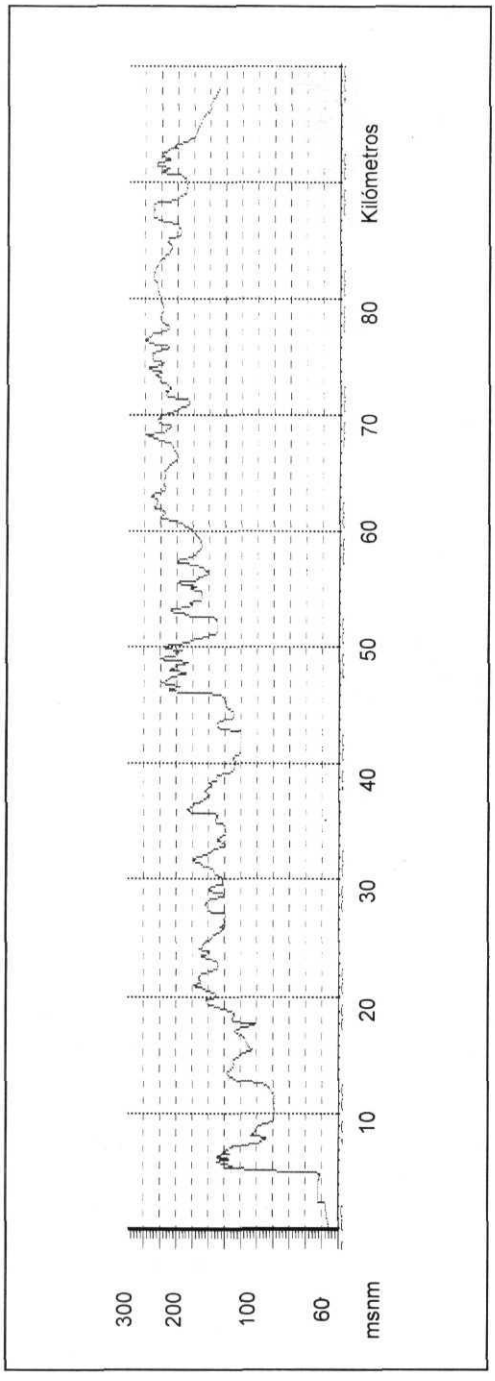

Figura 7. Perfil topográfico C-C´. Las superficies de laderas limitan mesetas y depresiones tectónicas.

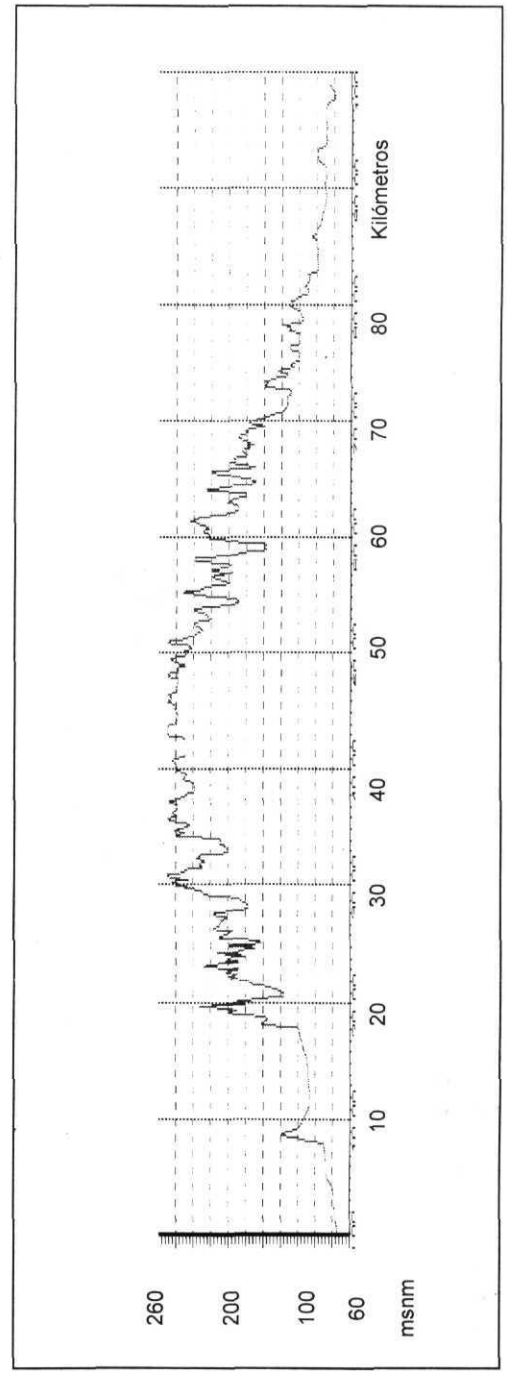

Figura 8. Perfil topográfico D-D´. Se observa la planicie estructural en ambas vertientes en dirección este y oeste con altura inferior a los 100 msnm, limitan el combamiento de las mesetas al norte de la zona en estudio.

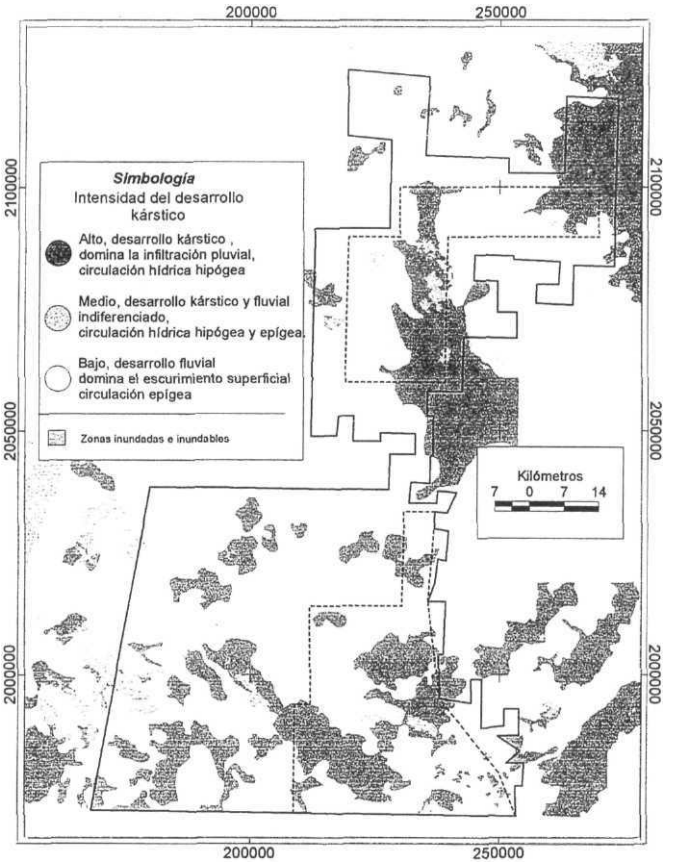

Figura 9, Mapa de la intensidad del desarrollo kárstico en la RBC.

El desarrollo del sistema fluvial superficial es de baja integración, típico de zonas kársticas; forma redes subdendríticas, surgencias y pérdidas. Los escurrimientos superficiales son intermitentes y ocurren cuando el terreno presenta una inclinación considerable (Figura 10).

En la zona de la reserva se forma un acuífero paleocénico cuya profundidad al nivel freático oscila entre los 60 y 165 m de profundidad. Las rocas calizas que lo forman son de origen lacustre (yeso y anhidrita) de la Formación Icaiche.

En la reserva se localiza el parteaguas peninsular, separando dos vertientes: la del Golfo de México y la del Caribe. Mediante la interpretación de las fotografías aéreas se localizaron 1 353 aguadas en la reserva (868 al norte y 485 al sur), por lo que la densidad aproximada es de 1.87 aguadas por hectárea. Aunque en el norte existe un mayor número de aguadas, éstas tienen menor superficie; el área promedio por aguada en el norte es de 1 373 m^2 y en el sur de 8 436 m^2. Con el fin de poderlas representar gráficamente en el mapa se muestran con un *bufferde* 1 000 m (Figura 11).

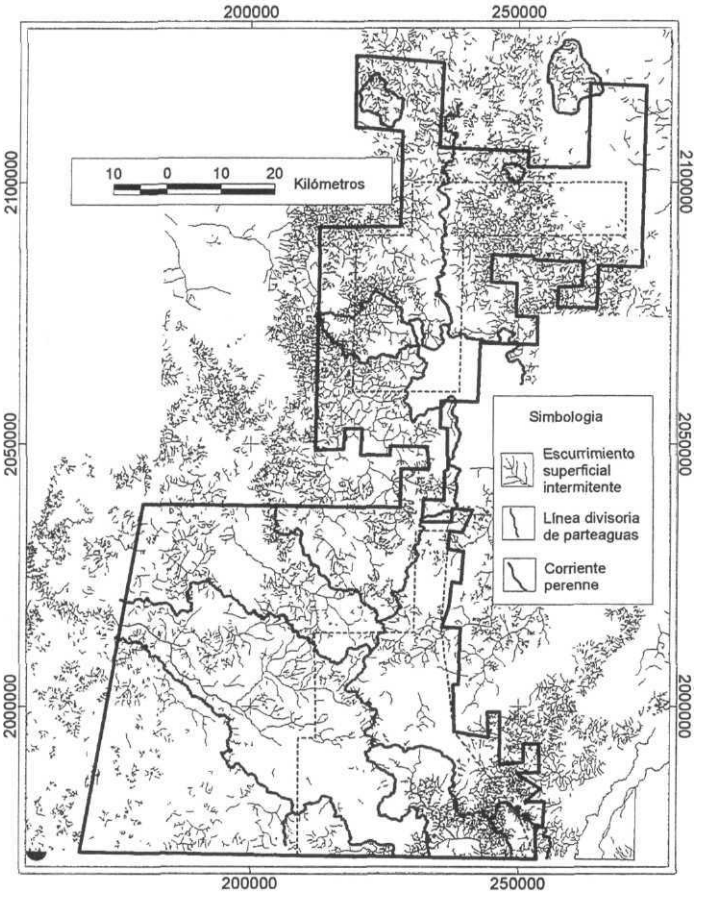

Figura 10. Mapa de la hidrografía superficial de la RBC.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la zona en estudio el desarrollo kárstico es resultado de la actividad tectónica, sin embargo, las condiciones físicas y bióticas que prevalecen en Calakmul dan lugar a hábitats que no están presentes en otros espacios de la península de Yucatán; por lo tanto la reserva cumple con los objetivos de conservación y preservación de la biodiversidad de las selvas del sureste de México.

La unidad geomorfológica con mayor precipitación, densidad de aguadas, relieve y altitud en la península de Yucatán, se localiza en el extremo sureste de la reserva, en el límite internacional con Guatemala; está cubierto por selva alta y mediana perennifolia con gran variedad de hábitats para la flora y fauna silvestre. Aunque está ubicada dentro de la zona núcleo y, por tanto, están legalmente restringidas las actividades humanas, está siendo afectada severamente por asentamientos humanos irregulares que eliminan la selva para inducir cambios en el uso del suelo con fines agrícolas y ganaderos.

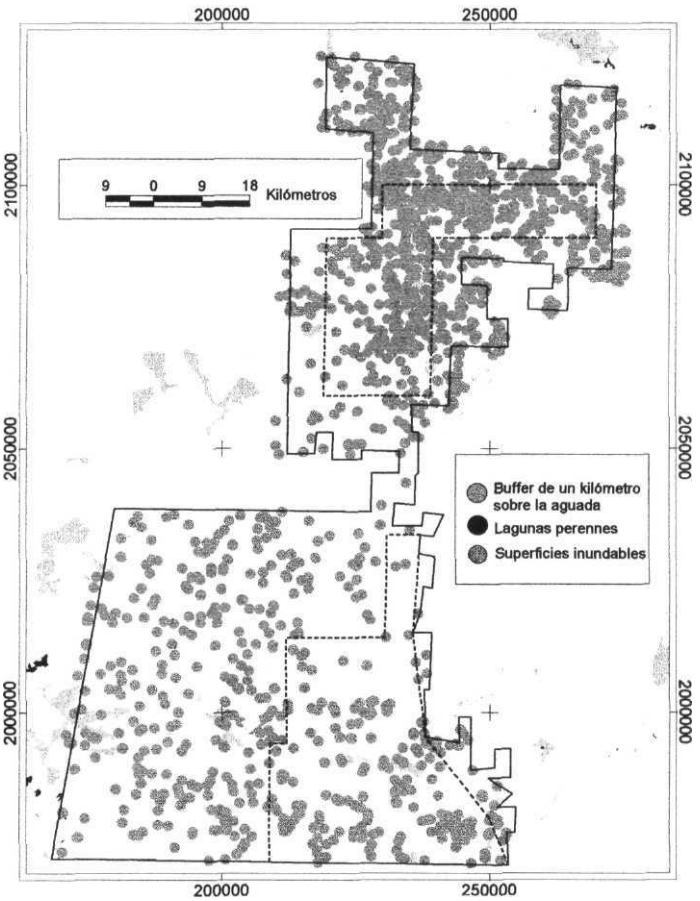

Figura 11. Mapa de la distribución de aguadas en la RBC. (Se construyó un buffer de un kilómetro para que fueran visibles en la escala representada.)

Las selvas de la RBC sirven de parteaguas peninsular; definen en su vertiente oriental (Caribe) y occidental (Sonda de Campeche) el curso de los escurrimientos superficiales y subterráneos, al formar las cuencas altas y zonas de recarga de acuíferos subterráneos.

En la reserva es evidente el gradiente de variación de la humedad, el cual se incrementa al sur. Sin embargo, las condiciones geomorfológicas agregan escenarios que hacen variar la distribución de la flora y la fauna silvestre. En el norte de la reserva, en donde prevalecen condiciones más secas y la vegetación es predominantemente subperennifolia y caducifolia, existen mesetas niveladas en las que se ubican amplias superficies de parteaguas que forman microcuencas endorreicas, en donde se desarrollan superficies de inundación temporal con formación de suelos del tipo de los gleisoles y vertisoles en presencia de comunidades vegetales hidrófitas.

Las selvas de Calakmul constituyen un regulador de los flujos hídricos superficiales y subterráneos, por lo que las ciudades ubicadas en zonas más bajas de la península (Campeche, Mérida, Chetumal y Cancún), son beneficiadas por la conservación de las

masas forestales de la región, que favorecen la infiltración hídrica que alimenta los acuíferos.

Las dolinas son elementos importantes del relieve, desde el punto de vista biológico, mantienen condiciones húmedas durante la temporada seca anual; son prácticamente las únicas fuentes disponibles de agua para la fauna silvestre en la estación seca. Existe una gran cantidad de dolinas inundadas en la reserva; sin embargo, muchas de ellas se secan durante el estiaje, por lo que se restringen las posibilidades de abasto de agua durante la temporada seca. Es posible que las aguadas del norte de la reserva sean más propensas a secarse que las del sur, por ser más grandes; lo que implicaría el desplazamiento de la fauna al sur durante el estiaje, por lo que debe cuidarse que no se rompa la conectividad entre el sector norte y sur de la reserva.

Las selvas de Calakmul no poseen buenas características para la colonización y ocupación humana, fundamentalmente por la mala calidad del agua para consumo humano y su escasez en la época de estiaje. A pesar de que se han realizado un gran número de proyectos hidráulicos para tratar de solucionar el abasto de agua a las localidades humanas, sigue siendo el factor limitante para lograr el desarrollo económico y social de los pobladores locales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Miguel Ángel Castillo y Janneth Padilla por su apoyo en la elaboración de las bases geográficas, a Celia López Miguel por la elaboración de perfiles topográficos. Las críticas y sugerencias de Juan Jacobo Schmitter Soto, Manuel Elias Gutiérrez, Eduardo Graniel, Carlos Melo y Martha Cervantes, han permitido mejorar el documento.

REFERENCIAS

📖 Butterlin y Bonet (1963), "Las formaciones cenozoicas de la península de Yucatán", *Ingeniería Hidráulica en México,* núm. 17, México, pp. 63-71.

📖 García Gil, G. y J. Pat, (2001), "Apropiación del espacio y colonización de la selva en la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche", *Revista Mexicana del Caribe,* año V, núm. 10, México, pp. 212-231.

📖 INEGI (1982), *Carta climatológica,* escala: 1: 250 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

📖 López Ramos, E. (1975), *Geología de México,* tomo III, Ed. Escolar, México.

📖 Lugo, J. (1991), *Elementos de geomorfología aplicada,* Instituto de Geografía, UNAM, México.

📖 Lugo, J. (1999), "El relieve de la península de Yucatán", *Atlas de procesos territoriales de Yucatán,* Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Arquitectura, México, pp.159-162.

📖 Orellana, R. (1999). "Evaluación climática", *Atlas de procesos territoriales en Yucatán,* Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Arquitectura, México, pp. 163-182.

📖 Pat, J. y V. Ku (2000), "Tendencias de cambio en el uso del suelo por los factores socioeconómicos, naturales y técnicos en la región de Calakmul, Campeche", *Memoria de Avances de investigación,* El Colegio de la Frontera Sur, Campeche, México.

📖 Revel Mouroz, J. (1980), *Aprovechamiento y colonización del trópico húmedo mexicano,* Fondo de Cultura Económica, México.

📖 Szekely, M. e I. Restrepo (1998), *Frontera agrícola y colonización,* Centro de Ecodesarrollo, México.