Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
ISSN 0188, Núm. 59, 2006, pp. 74-92

Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México

Eduardo Batllori-Sampedro*
Julio Iván González-Piedra**
Julio Díaz-Sosa**
José Luis Febles-Patrón*

Recibido: 22 de marzo de 2005
Aceptado en versión final: 23 de noviembre de 2005

Resumen. Se realizó una clasificación del territorio noroccidental del estado de Yucatán, basado en un enfoque físico-geográfico que considera la cuenca hidrogeológica de Chicxulub como unidad de planificación y desarrollo. La particularidad de esta cuenca radica en que posee condiciones de unidad geográfica natural muy específicas. En los 3 198 km^2 que abarca el área en estudio y de acuerdo con el ambiente geológico, el régimen climático, las características hidrológicas, los suelos existentes, las formaciones vegetales y los factores antropogénicos, se lograron diferenciar dos Unidades Geográficas Funcionales de primer orden: *a)* Llanura kárstica, litoral, marino-acumulativa, muy baja (H < 2 msnm), de edad cuaternaria y *b)* Llanura kárstica, denudativa, baja (H < 9 msnm), de edad terciaria. Del mismo modo, se identificaron cinco unidades de segundo orden, ocho unidades de tercer orden y 26 unidades de cuarto orden. Se describieron las principales características del clima, como un factor determinante de las regulaciones hidrológicas de la región, y se analizó la dinámica hidrológica superficial y subterránea de las principales unidades del paisaje. Se encontró que la situación actual de la costa es de fuerte inestabilidad, donde dominan los procesos erosivos en las playas y donde se predice un incremento acelerado del nivel del mar por fenómenos como el calentamiento global, además del fuerte impacto ocasionado por la infraestructura habitacional y productiva, la deforestación y la construcción de espolones y escolleras en el litoral. Se sugiere realizar estudios sobre las descargas de agua dulce, a través de manantiales submarinos en el litoral yucateco, sobre los procesos de formación del acuitardo costero, los procesos de disolución del karst yucateco, y caracterizar la dinámica hidrológica del anillo de cenotes y su influencia en la zona litoral.

Palabras clave: Caracterización hidrológica, karst, cuenca, costa noroccidental, Yucatán.

*Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Unidad Mérida. Km. 6, Antigua Carretera a Progreso, 97310, Mérida, Yucatán, México. E-mail: batllori@mda.cinvestav.mx
**Facultad de Geografía, Universidad de la Habana, Edificio Mella, Calle L, 353, entre 23 y 21, Municipio Plaza, 10400 Ciudad de la Habana, Cuba.

Hydrological characterization of the Yucatán´s northwest coastal region, Mexico

Abstract. A classification of the northwest territory of Yucatan was made based on a physical-geographic approach, which considers the Chicxulub hydrogeologic basin like planning and development unit. The particularity of this basin is due to its natural geographic specific conditions. In the 3 198 km^2 of the study area, and according to the geology, climate, hydrologic characteristics, vegetation types, and anthropogenic factors, were identified two First order Functional Geographic Units: *a)* marine, cumulative, karstic, very low plain coastal (H < 2 meters above sea level). from Quaternary age, and *b)* denudate, low karstic Plain (H < 9 masl), from Tertiary age. In a hierarchical way were identified five Second order, eight Third order, and twenty six Fourth order units. The main climate characteristics driving the hydrological regulations of the region were described, and it was analyzed the superficial and underground hydrological dynamics of the main landscape units. The current coast situation is strongly unsteady, dominated by erosive processes in beaches and with an accelerated predicted increase of sea level by global warming, in addition to the strong impact caused by habitation and productive infrastructure, deforestation, and construction of jetties in the littoral zone. It is suggested to make studies about fresh water discharges through submarine springs in the coast, the coastal aquitard formation and karst dissolution processes, and characterize the hydrological dynamics of the "ring of *cenotes* " and its influence in the coastal zone.

Key words: Hydrological characterization, karst, basin, northwest coast, Yucatán.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento científico de la porción noroccidental de la península de Yucatán es escaso y disperso, sin embargo, se ha logrado penetrar, a cierta profundidad, en los aspectos geológicos e hidrológicos fundamentalmente. Sobre este tema sobresale el trabajo de revisión y síntesis de información generada desde la década de los sesenta, realizado por Perry *et al.* (1995). En ese trabajo, los autores definieron a la "Cuenca Sedimentaria de Chicxulub" como una estructura kárstica, formada por el impacto de un meteorito en un área somera con depósitos de evaporitas y andesitas durante la transición del Cretácico al Terciario, dando origen a un cráter de aproximadamente 180 km de diámetro, bordeado por una banda semicircular de anillos múltiples con presencia de dolinas (cenotes) alineadas, producto de la disolución del material calizo depositado. Al norte, se presentan calizas del Pleistoceno y materiales del Holoceno, el cual constituye la barra arenosa litoral. Por debajo de esta última formación, se desarrolla un acuitardo costero de baja permeabilidad denominado localmente como "caliche". Su relieve es poco accidentado y su origen se asocia a descensos y ascensos relativos del Pleistoceno inferior-Holoceno. Se establece que los anillos son zonas de alta permeabilidad, tanto por la presencia misma de los cenotes, como por las rupturas de la barra arenosa litoral, en Celestún y Dzilám, y la alta concentración de manantiales donde el anillo intercepta la costa, aunado a la caída del nivel del agua subterránea, hacia el anillo (Perry y Velázquez, 1993). De esta manera, el anillo de cenotes afecta el tiempo de residencia de las masas de agua subterránea, tiende a aislar, en términos hidrogeológicos a la Cuenca de Chicxulub del resto de la península de Yucatán y afecta la habilidad de aquella porción del acuífero, dentro de la cuenca, para responder a las perturbaciones (incluyendo la contaminación). Lo anterior permitió establecer en este estudio el criterio de selección de los límites del sistema general, que se ana-

liza desde los puntos de vista geológico, geomorfológico, hidrogeológico y climático y que se representa por la denominada "Cuenca de Chicxulub", ubicada en la porción noroccidental de la península de Yucatán, México. La particularidad e importancia de esta "cuenca hidrogeológica funcional", como unidad de planificación y desarrollo, radica fundamentalmente en que reúne condiciones de unidad geográfica natural muy específicas y propias que sólo ella posee. Una de las vías más aceptadas y acertadas en los últimos tiempos, se refiere al desarrollo integral de "unidades geográficas funcionales", donde la estrategia fundamental es mantener el balance ecológico, no obstante, la explotación de recursos naturales renovables y no renovables (Mateo, 1984).

El objetivo general es conocer la dinámica y los procesos hidrológicos que tienen lugar en la cuenca de Chicxulub y su zona costera en particular, como base para propósitos de manejo. Los objetivos específicos son: *a)* lograr la subdivisión de la región de estudio en unidades geográficas funcionales; *b)* conocer las principales características del clima, como un factor condicionante de las regulaciones hidrológicas de la región; *c)* conocer el funcionamiento hidrogeológico de la región de estudio, y *d)* analizar la dinámica hidrológica de determinadas unidades geográficas funcionales de la región.

METODOLOGÍA

Localización del área en estudio

El área en estudio se localiza en la costa noroccidental de la península de Yucatán. El área total que ocupa es de 3 198 km^2 e incluye principalmente los municipios de Celestún, Hunucmá, Progreso de Castro y Mérida, pertenecientes al estado de Yucatán. Se encuentran también representadas dos áreas naturales protegidas: Reserva de la Biosfera de Ría Celestún y la Reserva Estatal de El Palmar, que en conjunto abarcan 1 092 km^2 (Figura 1).

Geomorfología

La cuenca hidrológica general o de Chicxulub, tiene una forma semicircular, cuyo límite funcional está constituido por una estructura conocida como anillo de cenotes. La máxima elevación en el área en estudio es de 9 msnm en los alrededores de la ciudad de Mérida. El gradiente altitudinal hacia Progreso es de 0.257 m/km, disminuyendo gradualmente hacia el occidente, siendo hacia Celestún de 0.106 m/km presentándose como una planicie muy tendida.

Clima

Los climas en la región se distribuyen, de norte a sur, desde los climas más secos áridos y semiáridos (BS_1 (h´)w(i´) y BS_0(h´)w"(x´) hasta los subhúmedos más secos cálidos y muy cálidos (Awo (i')gw''); Duch, 1988; Orellana *et al*., 1999.

Hidrogeología

El resultado del desarrollo geológico de la zona es la presencia, casi continua, de un manto rocoso superficial de extremada dureza. La porción más superficial del manto, denominada coraza calcárea, muestra un mayor grado de consolidación y dureza que la porción interna de la misma, que se caracteriza por la presencia de calizas blandas, conocidas localmente como "sahcab". La porción superficial se transforma en coraza calcárea, a la vez que se trata de un material soluble al agua enriquecida con ácido carbónico, favoreciendo la formación de cavidades subterráneas. Un rasgo morfológico importante de la coraza es su tendencia al resquebrajamiento y a la fragmentación, tanto por efecto de cambios de temperatura como por la acción mecánica de raíces de árboles (Duch, 1988). Las calizas del período Terciario permiten que la lluvia se infiltre rápidamente, disolviendo la roca y formando un relieve kárstico. Extensos siste-

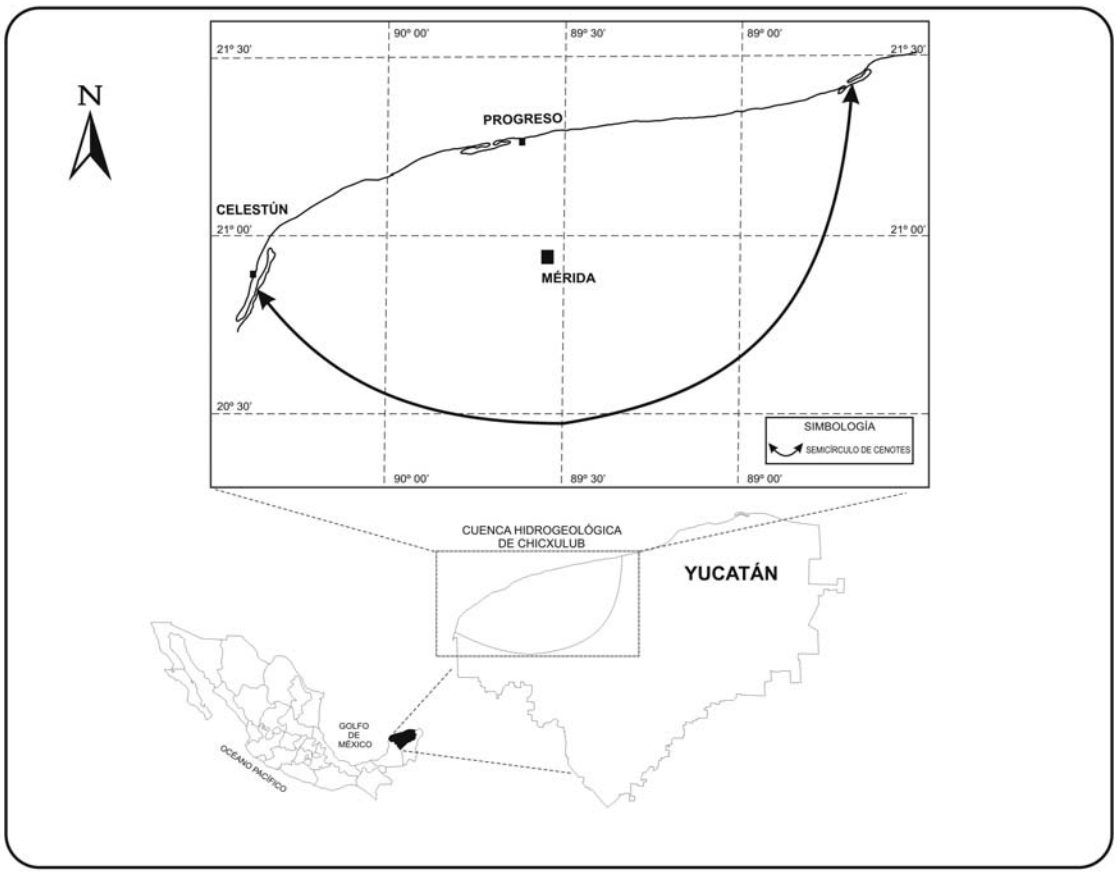

Figura 1. Localización de la región costera noroccidental del estado de Yucatán.

mas de cavernas se han desarrollado en la zona de dispersión cercana a la costa o mezcla de agua dulce subterránea más superficial con la salada inferior, debido a la intensa actividad geoquímica que presenta. Estas cavernas se originaron a partir de que la zona de dispersión oscilaba en respuesta a las variaciones de nivel medio del mar durante el Pleistoceno. De esta manera, los cenotes costeros son la expresión más joven del karst peninsular. El anillo de cenotes conforma una red cavernosa muy compleja, que actúa como un vertedero y línea de conducción de grandes masas de agua. Un elemento regulador de la hidrología costera es la capa de caliche que confina al acuífero en esa porción y que permite el paso del agua al exterior, a través de fisuras y manantiales muy localizados. Por encima de este caliche costero, se desarrolla un pequeño acuífero libre en la barra arenosa litoral (Perry *et al*., 1989 y 1995; Marín, 1990; Velázquez, 1995).

Suelos

El suelo está representado por los regosoles (según clasificación FAO/UNESCO), asociados a la barra arenosa y las playas; el solonchak y el histosol se asocian con la zona inundable de manglares y presentan fuerte hidromorfismo en los estratos más superficiales; y, por

último, los suelos tipo litosol y rendzinas se encuentran asociados a la zona de selva baja caducifolia (Duch, 1988).

Flora y fauna

La flora y fauna de la región es muy rica y variada. Del extenso listado florístico se han logrado identificar 90 especies, la mayoría endémicas, en el campo, como *Echites yucatenensis* y *Cephalocereus gaumer*i. De igual forma *Coccothrinax readii* y *Thrinax radiata* se encuentran en peligro de extinción (Durán, 1987; Espejel, 1984; Rico-Gray, 1982). De las 230 especies de aves identificadas, una buena proporción son migratorias y entre las residentes se encuentran el *Campylorhiynchus yucatanicus,* que sólo se encuentran en la zona de petenes. Existen también 94 especies de mamíferos, 15 son carnívoros, como el jaguar; se observa también la presencia del mono araña y del venado. Los anfibios y reptiles se encuentran representados por 78 especies, donde destacan tres especies de tortugas marinas y dos de cocodrilos, considerados en peligro de extinción. Entre los principales tipos de vegetación se encuentran: de duna costera, bosque de manglar, petenes, pastizal, tular, selva inundable, selva baja caducifolia y vegetación secundaria (Pronatura, 1996).

Actividades humanas

Las principales actividades humanas que se realizan en esta región costera, son la pesca, la cacería, los servicios turísticos, la extracción de sal y la agricultura. La afluencia de capitales a los puertos y la depauperación de los campesinos henequeneros fomentó una migración masiva hacia las costas, a partir de la década de los años setenta, incrementándose la población hasta un 300% (Fraga, 1993). Los asentamientos humanos se desarrollan en áreas ganadas a la ciénaga, mediante rellenos insalubres, con materiales perecederos y en pobreza extrema. El fecalismo al aire libre y la basura representan un serio problema de salud pública. El perfil epidemiológico muestra que las enfermedades traqueo-pulmonares y gastrointestinales son las más frecuentes.

Impactos ambientales

Los principales impactos ambientales, derivados del desarrollo socioeconómico costero son: *a)* obstrucción de flujos superficiales por carreteras y bordos; *b)* azolvamientos acelerados en manantiales, ciénagas y lagunas; *c)* pérdida de heterogeneidad ambiental en la duna costera, las ciénagas, los petenes y la selva baja; *d)* conexión permanente con el mar en ciénagas; *e)* salinización de aguas subterráneas por extracciones extremas del recurso, y *f)* contaminación por actividad humana.

Caracterización geográfica

Para lograr la subdivisión de la región en estudio en unidades geográficas funcionales, se procedió a realizar un análisis de las características físicas (geología, geomorfología, hidrogeología, suelo, clima, vegetación y actividades humanas) y morfométricas (forma y área de la cuenca; Mateo, 1984). Se revisaron los mapas disponibles (topográfico, a escala 1:50 000, y temáticos, a escala 1:250 000; INEGI, 1984), las fotografías aéreas e imágenes de satélite (Aerofoto, 1948; INEGI, 1979 y 1991), complementándose el trabajo con verificación en el campo. De esta manera, se identificaron los factores bióticos y abióticos que condicionan la formación de los paisajes.

Clima

Para conocer las principales características del clima de los diferentes complejos físico-geográficos, se consideraron seis estaciones climatológicas (Celestún, Sisal, Kinchil, Hunucmá, Maxcanú y Chicxulub) y dos observatorios meteorológicos (Progreso y Mérida), con una densidad de 400 km^2/estación. La información general se completó con datos de precipitación media de 12 estaciones climáticas distri-

buidas en la cuenca de Chicxulub (SMN, 1994; CNA, 1995; Orellana *et al*., 1999). Las variables climáticas analizadas fueron precipitación, temperatura, humedad relativa, tensión de vapor, presión atmosférica, insolación, velocidad y dirección de los vientos dominantes y evaporación, obteniendo el valor promedio anual, la variabilidad temporal y espacial, así como la distribución mensual y estacional dentro del año.

La precipitación media anual para el período hiperanual se determinó a través del análisis de homogeneidad (pruebas de Fisher y t´student), como condición importante para el tratamiento de series anuales de lluvias, así como las pruebas de ciclicidad y tendencia. Otro aspecto analizado para la lluvia, fueron las intensidades (mm/min), los tiempos de duración y las frecuencias o tiempos de retorno. El período de lluvias analizado comprendió los años 1968 a 1993 (26 años).

Dinámica hidrogeológica de la región

Para conocer la dinámica hidrológica de la región se procedió a una revisión de mapas de hidroisohipsas para diferentes temporadas ("lluvias" y "secas" de 1987, 1988 y 1989), donde una fuente importante para su elaboración fueron los datos generados por Marín (1990). De esta manera, de acuerdo con la zonificación de la dinámica de las aguas subterráneas, se aplicaron las ecuaciones generales del balance hídrico con un enfoque geográfico-espacial para determinar la importancia relativa de cada componente de la ecuación y su relación con la biota presente.

A través de la relación Ghyben- Herzberg, se estimó la profundidad a la interfase salina para conocer el espesor de la capa de agua dulce aprovechable (Custodio y Llamas, 1996).

Dinámica hidrológica de las Unidades Geográficas Funcionales

Para analizar la dinámica hidrológica específica de determinadas unidades geográficas, se instaló un sistema de control geodésico (INEGI, 1991) que permitiera tener una referencia precisa al nivel medio del mar de los diferentes sitios de muestreo, distribuidos en transectos perpendiculares a la costa en Celestún, Palmar, Sisal, Chuburná y Progreso. Se registró mensualmente la profundidad, la salinidad y la temperatura del agua entre 1990 y 1996, para analizar la dinámica hidrológica superficial temporal en lagunas, ciénagas, sabana y selva inundable.

También se describe la dinámica hidrológica subterránea temporal en algunos cenotes, manantiales y petenes (islas de vegetación alta con un manantial, rodeados por agua salobre o hipersalina) del área.

RESULTADOS

Caracterización geográfica

En los 3 198 km^2 que abarca el área en estudio, se lograron diferenciar dos unidades geográficas funcionales de primer orden:

- Llanura kárstica, litoral marino-acumulativa, muy baja (H < 2 msnm), de edad cuaternaria, con dos variantes: eólico-acumulativa (de edad holocénica, cordón litoral) y biogénico-acumulativa (de edad pleistocénica, pantanos costeros).
- Llanura kárstica, denudativa, baja (H < 9 msnm), de edad terciaria, con dos variantes: kárstica estacionalmente inundada (de edad pliocénico-pleistocénico inferior) y kárstica seca (de edad miocénico-pliocénico).

Del mismo modo, en la zona en estudio se identificaron cinco unidades de segundo orden, ocho de tercer orden y 26 de cuarto orden (Tabla 1 y Figura 2).

a) La llanura kárstica, litoral, marino-eólico, acumulativa, representa la estructura geológica que protege a todo el sistema de

humedales costeros y es la que más impacto ha sufrido en playas, dunas y plataforma marina debido a las actividades humanas.

b) La llanura kárstica, marino-biogénico, acumulativa, representa una zona de alta productividad biológica por los extensos manglares y ciénagas que se desarrollan y que ha sufrido los impactos secundarios derivados de la actividad humana.

c) La llanura kárstica biogénico-acumulativa, con tulares y manglares, hábitat de una gran biodiversidad, donde sobresalen los petenes y manantiales.

d) La llanura kárstica denudativa, baja, estacionalmente inundada con selva inundable y extensas sabanas.

Tabla 1. Descripción de las unidades geográficas funcionales de la región costera noroccidental del estado de Yucatán

Unidad de primer orden	Unidad de segundo orden	Unidad de tercer orden	Unidad de cuarto orden
1. Llanura litoral kárstica, marino-acumulativa, muy baja (H < 2 msnm), de arenas calcáreas sueltas y suelos cenagosos, con complejo de vegetación de costa arenosa, parcialmente matorral xeromorfo costero y halófitas, medianamente degradada, de edad cuaternaria.	A) Llanura litoral eólico-marino, acumulativa, muy baja (H < 2 msnm), de arenas sueltas calcáreas y suelo tipo regosol profundo, con vegetación de costa arenosa parcialmente matorral xeromorfo, herbáceas costeras y plantaciones de coco, medianamente degradada, de edad holocénica. Área: 44.74 km^2. Proporción del total: 1.396%.	*a)* Playas acumulativas arenosas.	*a)* Berma. Superacuática con pendiente suave y buen drenaje. *b)* Cara de playa. Superacuática, con pendiente suave y buen drenaje. *c)* Fosa. Subacuática, depresión. *d)* Barra interna. Subacuática, cresta.
		b) Duna costera.	*a)* Cresta de las dunas acumulativas, eólico-marino, con complejo de vegetación de matorral xeromorfo costero y coco, eluvial. *b)* Depresiones de las cadenas de dunas permanentes y estacionalmente inundadas, salinizadas, con vegetación halófita y fuerte antropización por actividades mineras extensivas, asentamientos humanos y vías de comunicación, eluvial. *c)* Pendiente, eluvial.
		c) Plataforma litoral.	*a)* Plataforma litoral permanentemente inundada, con régimen de marea y vegetación sumergida de macroalgas y pastos marinos; fuerte antropización por actividades pesqueras ribereñas y tráfico de embarcaciones, subacuática de pendiente suave. *b)* Surgencias kársticas subacuática y pie de pendiente.

	B) Llanura kárstica, biogénico-marino, acumulativa, muy baja, (H< 1 msnm), permanentemente inundada con régimen de marea, fuerte hidromorfismo, parcialmente salinizada, con suelos tipo solonchac e histosol profundo, con vegetación de manglar, medianamente degradada de edad pleistocénico medio-holocénico. Área: 283.77 km^2. Proporción del total: 8.873%.	*a)* Lagunas costeras y ciénagas.	*a)* Laguna abierta de Celestún y Chelem. *i)* Cresta. Superacuática. *ii)* Pendiente. Subacuática. *iii)* Depresión. Subacuática. *b)* Canales de drenaje antropizados, con mangle chaparro y disperso, subacuático, de pendiente suave. *c)* Lagunas cerradas con régimen de marea, subacuático. *d)* Manglar de borde, subacuático. *e)* Manantial, subacuático de pie de pendiente.
	C) Llanura kárstica, biogénico-acumulativa, muy baja (H < 1 msnm), estacionalmente inundada, suelos histosol y solonchac profundos, parcialmente salinizada, con vegetación acuática, manglar y manglar con elementos de selva mediana, medianamente degradada de edad pleistocénico inferior y medio. Área: 330.8 km^2. Proporción del total: 10.344%.	*a)* Manglar de cuenca con pastizal.	*a)* Cresta, superacuático, con drenaje eficiente. *b)* Pendiente con drenaje deficiente, superacuático. *c)* Valle, con drenaje deficiente, superacuático.
		b) Petén.	*a)* Manglar de borde con selva mediana, superacuático, pendiente suave y con drenaje eficiente. *b)* Manantial, subacuático y pie de pendiente.
2. Llanura kárstica-denudativa baja (H< 9 msnm), plana, sobre rocas carbonatadas, de karst desnudo a parcialmente desnudo, estacionalmente húmedas con litosoles y rendzinas, selva baja caducifolia con cactáceas y otros xerófitos con elementos de vegetación hidrófita, medianamente antropizado, de edad terciaria.	D) Llanura kárstica parcialmente desnuda, estacionalmente inundada, baja (H < 3 msnm), con rendzinas e histosol somero, selva baja inundable y vegetación acuática, de edad pliocénico-pleistocénico inferior. Área: 295.05 km^2. Proporción del total: 9.226%.	*a)* Selva baja inundable con tular.	*a)* Cresta, superacuático, con drenaje eficiente. *b)* Pendiente con drenaje deficiente, superacuático. *c)* Valle, con drenaje deficiente, superacuático.
			a) Cenotes, superacuático y pie de pendiente.
	E) Llanura kárstica desnuda, baja (H < 9 msnm), con rendzinas y litosol escaso, selva baja caducifolia y con cactáceas, vegetación acuática, de edad miocénico-pliocénico. Área: 2 243.74 km^2. Proporción del total: 70.161%.	*a)* Selva baja caducifolia.	*a)* Pendiente suave con altillos y hondonadas de buen drenaje, eluvial. *b)* Cenotes, superacuático y pie de pendiente.

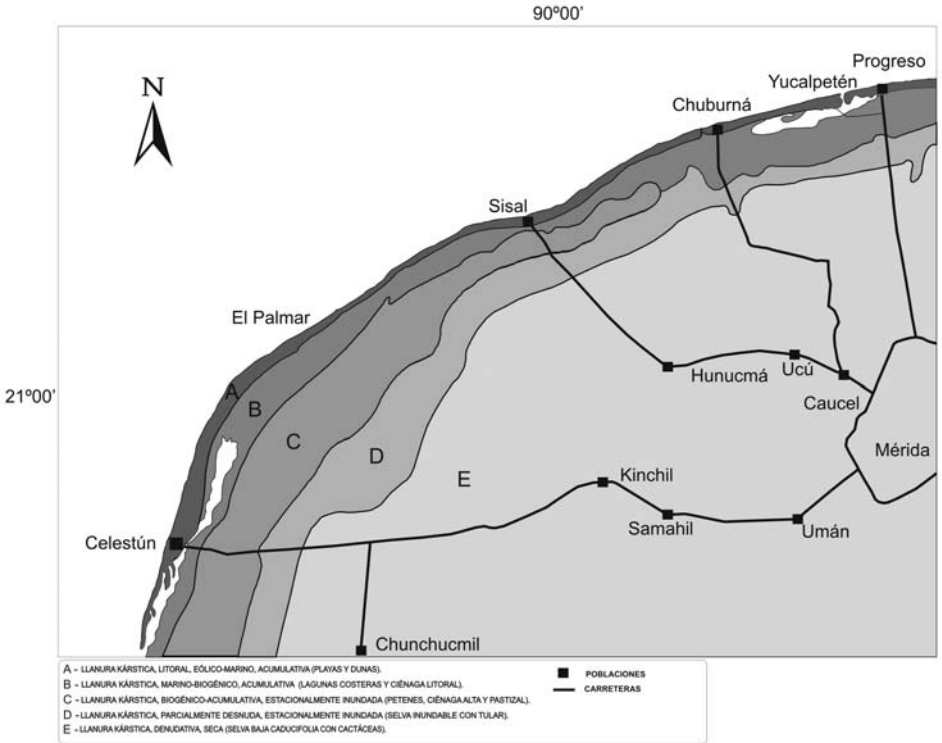

Figura 2. Unidades geográficas funcionales de la zona costera noroccidental del estado de Yucatán.

e) La llanura kárstica denudativa seca, con selva baja caducifolia y principal zona de recarga del acuífero yucateco.

Comportamiento climático para las Unidades Geográficas Funcionales de Primer Orden

La precipitación total anual promedio para el período hiperanual de una cuenca hidrológica, está representado por el valor promedio para un período largo (siempre > a 20 años), en que se compensen los años húmedos y secos. Para el caso de Progreso (llanura litoral marina) se consideró una serie de 66 años, y para Mérida de 72 (llanura kárstica denudativa). El valor medio en Mérida es de 957.43 mm con un coeficiente de variación de 0.163, mientras que para Progreso es de 458.82 mm y 0.375, respectivamente. El régimen pluvial de Progreso muestra ciclos, donde se compensan años secos y años húmedos, entre 9 y 12 años, mientras que Mérida presenta ciclos que varían de 9 a 11 años.

Los meses de mayor lámina de lluvia van desde mayo hasta octubre, definiéndose el período húmedo dentro del año, mientras que de noviembre a abril se considera el período seco. Por lo general, puede estimarse que para la llanura litoral marina (zona costera), el período húmedo representa entre el 85 y el 90% del total de la lluvia, respectivamente. Sin embargo, en la llanura kárstica denudativa (hasta 30 km tierra adentro), el período húmedo representa del 78 al 82%. Es característico, además, que los meses más lluviosos de todo el año sean agosto, septiembre y octubre, siendo los más secos marzo y abril. La lluvia invernal de enero y febrero está ausente en los años secos, al igual que las lluvias en la primavera. Los picos máximos de precipi-

tación de primavera tardía se presentan, por lo general, en los años húmedos.

A partir del análisis de intensidad-duración-frecuencia (periodo 1968-1993), el promedio de lluvias por año para Progreso y Mérida es de 42.4 y 94.8, respectivamente. En Mérida predomina la lluvia de 30 minutos, y con menos frecuencia la de 60 y 10 minutos, mientras que en Progreso la lluvia de mayor frecuencia es de 60, 10 y 30, minutos respectivamente. Una lluvia con duración de cinco minutos y un tiempo de retorno de 100 años, presenta una intensidad de 12 mm/min, en Mérida, y de unos 3 mm/min, en Progreso. Las intensidades de mayor ocurrencia (tiempo de retorno de dos años), para un tiempo de duración de cinco minutos es de 0.8 a 1 mm/min para ambas localidades. Para las lluvias con una duración de 30 minutos, de mayor frecuencia en Mérida y con un tiempo de retorno de 100 años, corresponde una intensidad de 3 mm/min, mientras que en Progreso, las lluvias de 60 minutos y para el mismo tiempo de retorno, presentan una intensidad menor de 1.5 mm/min (Tabla 2).

La temperatura en toda la región en estudio presenta una relativa homogeneidad espacial (coeficiente de variación de 5 %), no obstante, existe cierta variación estacional (6 a 10%). La temperatura medial anual en la región es de 24.5 a 25.5° C. La evaporación de superficie libre presenta valores anuales muy cercanos a 1 900 mm, en toda el área en estudio. La variabilidad anual oscila entre 19 a 16% en la zona costera, mientras que en la continental es de 14%. Cabe destacar que la diferencia máxima entre las localidades es alrededor de 90 mm (5%), indicando una homogeneidad espacial. En cuanto a la distribución mensual, los meses de mayor evaporación son abril y mayo, mientras que diciembre y enero presentan la menor evaporación.

Entre los dos componentes principales del balance hídrico, la lluvia satisface solamente el 39% del poder evaporante de la atmósfera del territorio, sin embargo, la alta infiltración del agua en la roca calcárea y la alta permeabilidad de sus suelos pedregosos permite una rápida recarga del manto freático, consolidando un carácter árido con vegetación caducifolia y xerófila, particularmente en la porción continental.

Otras posibles regularidades hidrológicas de largo período, se deducen mediante registros arqueológicos e hidrológicos, que han logrado fechar las sequías severas, particularmente en el año -400 a.C y 250 d.C, así como entre el año 800 y 1000 de nuestra era, donde se presentó una de las peores sequías durante el período Clásico Terminal Maya (Gunn *et al*., 2000; Quezada, 2001).

Dinámica hidrogeológica de las Unidades Geográficas Funcionales de Primer Orden

En el área pueden distinguirse dos localidades o zonas geológicas que presentan importantes diferencias en la dinámica hidrológica (Tabla 1 y Figura 3). Entre la llanura litoral marina y la llanura kárstica denudativa, el acuífero intercepta al nivel topográfico, vertiendo agua rica en sales y ocasionando, a través de la evaporación, la precipitación de carbonatos y la consolidación de los materiales, propiciando su endurecimiento y formando una estructura masiva tipo caliche, que cementa las fisuras y oquedades de la coraza superficial, dando lugar al acuitardo costero.

La Zona I (unidades de segundo orden A, B, y C): de sedimentación reciente (Pleistoceno inferior- Holoceno) representada por los depósitos conchíferos que forman las playas y las cuencas de sedimentación palustre y estuarino, en ciénagas y rías (paisaje litoral eólico-marino y biogénico), con un espesor variable de 1.5 a 3 m. sobre roca caliza compacta, fracturada y fisurada, la cual sobreyace el acuitardo costero. Esta zona comprende de 8 a 10 km de ancho promedio, permanentemente humedecida y presenta coeficientes de infiltración cercanos a cero, predominando el

proceso de evaporación de superficie libre. Su zona freática y vadosa están poco diferenciadas por su cercanía al mar y donde la interfase salina es muy superficial. Esta zona representa el 20.6% del área total en estudio (Figura 3).

La Zona II (unidades de segundo orden D y E), limita al norte con la anteriormente descrita y se extiende al sur; es de evolución kárstica incipiente, del Pleistoceno inferior Plioceno-Mioceno (unidades denudativas); representa una coraza calcárea que aflora, resquebrajada y fragmentada, con fisuras y conductos tubulares, por los que circula el agua infiltrada hacia la caliza blanda subsuperficial. Esto hace posible que domine el proceso de infiltración por fisura, como un componente importante del sistema de ecuación del balance hídrico y el cual se estima entre un 25 y 40% de la lluvia. Esta zona representa el 79.4% del área total en estudio (Figura 3).

Las aguas subterráneas en la cuenca presentaron niveles hidrostáticos en el período húmedo, de 1987, de 1.25 msnm en el extremo SE (Mérida) hasta 0.55 msnm en la zona costera oriental (Progreso), con una pendiente hidráulica de 0.0233 m/km, evidenciándose las líneas de flujo en dirección norte. En el extremo noroccidental de 1.66 msnm (Kinchil) hasta 0.50 msnm (Celestún), con una pendiente hidráulica de 0.0258 m/km, donde las líneas de flujo van en sentido SE-NW. En el período húmedo de 1989, posterior al huracán Gilberto, las pendientes se mantienen muy similares, siendo para Mérida-Progreso de 0.0227 m/km y de Kinchil- Celestún de 0.0222 m/km.

Durante el período seco, cuando los niveles alcanzan sus mínimos valores, las diferencias en las pendientes con el período húmedo no son muy grandes. Mérida con 1.02 msnm y cerca de Progreso con 0.50 msnm, resultando una pendiente hidráulica de 0.0173 m/km; mientras que para Kinchil-Celestún es de 0.018 m/km. En el período seco y posterior al paso del huracán Gilberto (1989), la pendiente hidráulica en el transecto Mérida-Progreso es de 0.0252 m/km y de Kinchil a Celestún de 0.0247 m/km.

Las oscilaciones anuales del nivel hidrostático varían de 0.20 a 0.40 m y las pendientes hidráulicas tienen poca variación, lo que demuestra la estabilidad en los cambios de niveles en la región. Aun en presencia de fuertes elevaciones piezométricas, cuando ocurren fenómenos meteorológicos severos –como huracanes– estas pendientes se mantienen muy estables. El espesor de la lámina de agua dulce oscila desde los 15-18 m, en la costa, hasta los 45-66 m cercano a Mérida y Kinchil (relación Ghyben- Herzberg).

Los niveles del agua subterránea por debajo de la isolínea topográfica de los 2 msnm (cercano a la costa) presentan gradientes hidráulicos de 0.028 m/km en la generalidad del área, siendo de 0.046 m/km en septiembre (temporada húmeda), y de 0.016 m/km en abril (temporada seca; 1990-1996). Lo anterior muestra el efecto del acuitardo costero, que confina al acuífero en esa zona y lo somete a presión, particularmente en temporada de lluvias y cuya expresión superficial son fisuras

Tabla 2. Curvas de intensidad-duración-frecuencia para Mérida y Progreso (mm/min)

Estación	Promedio de días con lluvia p/año	Tiempo de duración de lluvias de mayor frecuencia (min)	5 min 100 años mayor	30 min 100 años	60 min 100 años	5 min 2 años
Progreso	42.4	60, 10, 30, 120	3.1	1.9	1.5	0.8
Mérida	94.8	30, 60, 10, 5	>12.0	3.0	2.1	1.0.

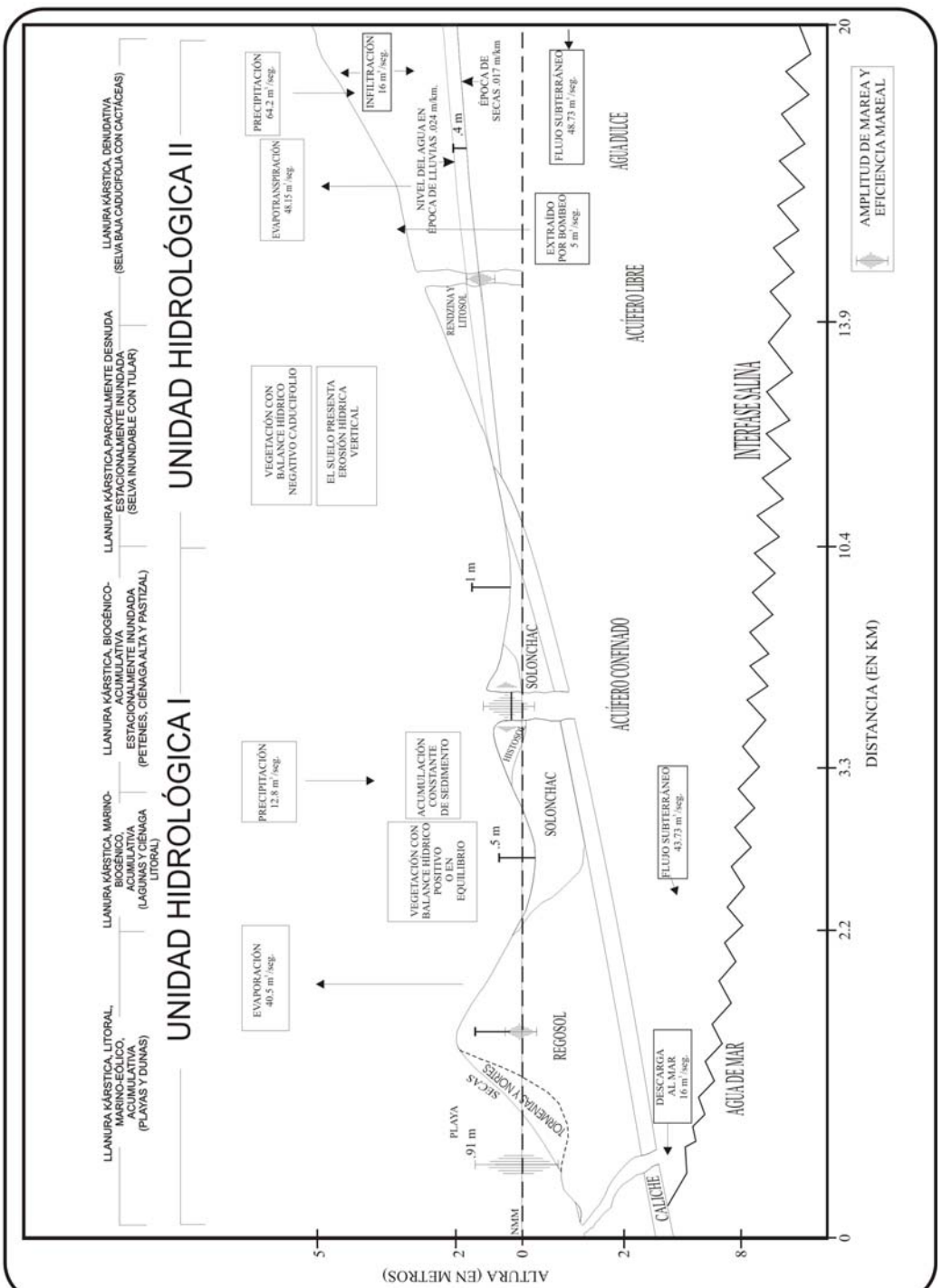

Figura 3. Dinámica hidrológica de las unidades geográficas funcionales de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México.

muy pequeñas (como la mayoría de manantiales del centro del anillo de cenotes) y grandes cenotes de varios metros de diámetro (como los manantiales ubicados en las porciones costeras del anillo de cenotes de Celestún y Dzilám), como principales accidentes del acuitardo costero.

Balance hidrológico de las Unidades Geográficas Funcionales de Primer Orden

Según la zonificación de la dinámica de las aguas subterráneas explicada con anterioridad, para la Zona I se aplica la ecuación general de balance hídrico, que corresponde con el período hiperanual y los cambios en el almacenamiento tienden a cero, al compararse los periodos húmedos con los periodos secos,

cuando $\Delta t \rightarrow \infty$ y $\Delta w \rightarrow 0$, entonces:

P + Asubt + Asup= ET + A´subt + A´sup (Tabla 3).

En este caso, se consideró que las afluencias y efluencias superficiales se compensan en el período hiperanual. Para el cálculo de A´subt se consideran las características propias del desagüe subterráneo (por manantiales en el mar) y se tomó como valor típico 0.18 $m^3/s/km$ de costa. El balance para la zona I representa una entrada subterránea que proviene de la zona II de 43.73 m^3/s (1 377x 10^6 m^3), aproximadamente. El gasto de evaporación total (actuando todo el poder evaporante de la atmósfera) es de Qe = 40.53 m^3/s o 1 276 x 10^6 m^3 anuales, considerando plena saturación del área considerada.

Para la zona II y considerando un coeficiente de infiltración de 0.25 (Marín, 1990), se aplica la siguiente ecuación:

cuando $\Delta t \rightarrow \infty$ y $\Delta W \rightarrow 0$, entonces:
P + Asubt = Ip + Et + O + A´subt (Tabla 3).

En donde A´subt de la zona II se considera como Asubt de la zona I por ser contigua una a la otra. Por lo tanto, A subt para la zona II es igual a 48.73 m^3/s, lo que representa un caudal de 1 535 x 10^6 m^3 /anuales. Se consideró que para la región de entrada a la zona II la conductividad hidráulica resultante sería de K = 0.31 m /s. "O" se refiere a las extracciones

Tabla 3. Valores propuestos de balance hidrológico para la zona I y II

Zona I

Parámetros (mm)	Gasto (m^3/s)	Valor anual (x 10^6 m^3)
P= 600	12.8	403.2
ET = 1900	40.53	1 276.69
A´subt=750	16.0	504
A subt=2050	43.73	1 377.5

Zona II

P = 800	64.2	2 022.3
Ip = 0.25xP = 200	16.05	505.58
Et = 0.75xP = 600	48.15	1 516.73
O = 5 m^3/s (estimado)		157.5

donde: P= precipitación pluvial; Asubt= afluencia de agua subterránea; ET= evaporación total; Et = evapotranspiración; A'subt = salida de agua subterránea; O = extracciones; Ip = infiltración profunda.

por actividades humanas que en la región son sumamente bajas.

En lo que concierne al volumen total almacenado en el acuífero regional, y más específicamente en el área en estudio, con un área aproximada de 3 200 km^2 y una porosidad promedio del 25%, el volumen total almacenado sería del orden de los 12 000 x 10^6 m^3, con un espesor promedio de 15 m de agua. Si se considera que lo infiltrado (fundamentalmente en la zona de recarga) es de aproximadamente 506 x 10^6 m^3/anuales y lo que llega a la zona II, por el sur, es de 1 535 x 10^6 m^3/anuales, su sumatoria es de 2 041 x 10^6 m^3 y representa sólo el 17% del total almacenado, lo que denota una lenta renovación de las aguas en todo el acuífero de la región de estudio, en especial, en la parte interna de la "Cuenca de Chicxulub".

Comportamiento hidrológico de las Unidades Geográficas Funcionales de Segundo Orden

En relación con las características hidrodinámicas superficiales de las llanuras biogénicas y kárstica denudativa, inundada estacionalmente (Tabla 1), se observó que el nivel máximo de inundación, en ausencia de huracanes, no sobrepasa la isolínea de altitud topográfica de 1 msnm. De manera general, el nivel del agua superficial más alto (con respecto al nivel medio del mar) se registra en la selva inundable; disminuyendo gradualmente hasta la laguna costera o ciénaga, donde se observan los niveles más bajos. La profundidad de la inundación disminuye durante la temporada de "secas" (marzo, abril, mayo y junio) y aumenta paulatinamente hasta la temporada de "nortes" (octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero).

Las mayores concentraciones de sal se registran en la ciénaga (valores medios de 31.8 ups con un rango de oscilación máxima en la época de "secas" de 96 ups); mientras que las más bajas en los petenes y la selva inundable (valores medios de 1.5 ups). Durante la temporada de "secas" puede haber condiciones de hipersalinidad en la ciénaga (103.5 ups); y luego, durante la temporada de "nortes", la salinidad disminuye (4 ups). La temperatura promedio del agua es más alta en la ciénaga (30.2° C y con un rango de oscilación que va de 23 a 38° C) disminuyendo hacia la selva inundable (28.3° C y oscilación de 21.5 a 34° C).

Las máximas elevaciones del nivel del agua ocurren durante septiembre y octubre con aguas más salobres y de menor temperatura, mientras que las mínimas se registran al final de la época de "nortes" y durante las "secas", con aguas más saladas y mayores temperaturas. La concentración de sal se incrementa conforme a la mayor cercanía a la costa.

En la ciénaga litoral, paralela a la costa, existe un desnivel topográfico que va desde 0.40 msnm, en el oriente del área en estudio (Chuburná), hasta -0.77 msnm, en el poniente (Celestún), con una pendiente de 0.021 m/km, que permite un escurrimiento de agua a las áreas más bajas. En la región del oriente (Chuburná y Sisal) existen las mayores elevaciones del nivel de agua superficial (0.47 y 0.38 msnm, respectivamente), mientras que hacia el poniente (Celestún) las menores elevaciones (0.06 y -0.03 msnm). De esta manera, se encuentran gradientes hidráulicos que van de 0.0086 m/km a 0.010 m/km, de acuerdo con la temporada, siendo mayor en "secas". Asimismo, la variación temporal del nivel de inundación está representada por la época de "secas" y "nortes", principalmente, correspondiendo a las menores y mayores inundaciones. En términos temporales, el comportamiento de la salinidad disminuye al aumentar la inundación durante la temporada de "lluvias" y "nortes", mientras que aumenta cuando la inundación baja durante la temporada seca.

Por otra parte, en términos espaciales, existe un gradiente de mayor a menor salinidad desde Chuburná (con un promedio de 47.9 ups) hasta Celestún (con 6.6 y 10.4 ups). En Chuburná la salinidad presenta un rango de varia-

ción anual de 90.5 ups (de 11.5 ups, en febrero, a 102 ups, en junio), mientras que en la parte interna de la laguna de Celestún el rango anual es de 12.7 ups (de 2.6 ups, en abril, a 15.3 ups, en julio). Los valores de correlación por salinidad muestran una fuerte asociación en el área oriental con gran influencia salina, debido principalmente a escurrimientos por encima de la llanura litoral y a las bocanas que conectan el mar con la ciénaga (La Carbonera, Chuburná Puerto y Yucalpetén), mientras que la laguna de Celestún presenta ambientes más dulces, logrando cierta asociación con el Palmar, conformándose como el área salobre occidental. La temperatura promedio del agua disminuye de Sisal (31.1° C) hasta Celestún (27.4° C), registrándose nuevamente la menor variación en la parte interna de la laguna de Celestún.

Los principales cambios morfológicos costeros ocasionados por el huracán Gilberto (1988), se debieron a la apertura de 24 bocas en la barra costera, que conectaron la llanura biogénica con el mar, con anchos variables desde poco menos de 100 m y con profundidades de 2.5 m, hasta menos de 30 m de ancho con profundidades por debajo de 1 m. Los cambios morfológicos más importantes observados en una de las bocanas, localizada en la Reserva El Palmar, antes de que se cerrara durante la temporada de "nortes", fue el desarrollo de un amplio canal paralelo a la costa, protegido por una incipiente barra arenosa. La repuesta inmediata al cierre de la bocana fue el descenso de la salinidad (de 37 a 5.5 ups) y el incremento de la profundidad del agua en la ciénaga (alrededor de 25 cm). El período de hipersalinidad (con valores mayores a 40 ups) antes del cierre de la bocana, de unos seis meses (abril a septiembre), disminuye después del cierre de la boca a dos meses (junio y julio).

Por su dinámica hidrológica superficial, relacionada con las fluctuaciones estacionales del nivel de agua, se observa una fuerte asociación entre la unidad geográfica de segundo orden D y C (Tabla 1), donde los valores máximos de inundación de estas unidades se presentan de junio a noviembre y no sobrepasaron la isolínea de altitud de 1.0 msnm. Se caracterizan por sus aguas salobres y dulces, temperaturas bajas y una dinámica independiente de la marea, excepto en los manantiales y cenotes. Se definen como áreas palustres. La unidad B se caracteriza por presentar la máxima inundación de octubre a febrero, asociada al incremento del nivel del mar y con características salobres a salinas. En las lagunas y ciénagas con contacto permanente con el mar, el nivel de agua oscila en relación con la marea y presentan variaciones de salinidad muy marcadas. Se definen como áreas estuarinas. En general, el extremo oriental del área (incluyendo las unidades B, C, D y E) se constituye como una zona hipersalina y sobrecalentada, mientras que el extremo occidental se constituye como una zona salobre y templada.

Comportamiento hidrológico de las Unidades Geográficas Funcionales de Tercer Orden

Además de la variación estacional del acuífero, en los cenotes y manantiales, localizados en retenes, existen respuestas por perturbaciones de corto período, como las mareas. Estas respuestas no se aprecian en la ciénaga litoral (aquéllas sin conexión directa con el mar) y en el manglar de cuenca, donde la dinámica hidrológica está determinada principalmente por vientos locales, la precipitación pluvial, la evaporación y la marcha anual de la marea.

La respuesta observada a través de las fluctuaciones del nivel freático permite clasificar al acuífero subterráneo costero en dos tipos: *a)* acuífero kárstico, litológicamente homogéneo, que subyace al caliche costero, representado por manantiales y cenotes; *b)* acuífero edáfico, que sobreyace al caliche costero, representado por la barra arenosa, con suelos

tipo regosol, y el peten, con suelos tipo histosol.

Algunos cenotes pueden caracterizarse como lagos kársticos maduros, con respuestas más del tipo de acuífero edáfico, ya que a pesar de estar inmersos en el acuífero kárstico su dinámica es independiente de él y obedece a cambios producidos por la precipitación y evaporación, así como a vientos locales.

En relación con el comportamiento hidrológico de algunos petenes del área en estudio (Palmar, Dzulá, Tzintzín, Bolón, Lagartero y Elepetén), la respuesta de los manantiales a la oscilación de marea es altamente significativa, de manera inmediata y con una reducción de la amplitud de marea reflejada en la oscilación en el manantial de un 40 y 24%, en condiciones de marea viva y muerta (amplitudes de marea de 0.60 y 0.20 m, respectivamente). La respuesta de esta oscilación en el suelo orgánico del petén es muy baja durante la marea muerta, desde una reducción de más del 97% en el borde del petén con el manglar adyacente, hasta un 50% en el interior del mismo; mientras que en condiciones de marea viva, en el borde del petén ocurre una reducción de 95% y en el interior del petén de 46%. Es notorio entonces, que a mayor oscilación de marea, mayor será la oscilación de la tabla de agua en el suelo del petén. Existe un fuerte desfasamiento temporal entre el nivel máximo en el manantial y el nivel máximo en el borde del petén, quedando el manglar de cuenca adyacente independiente de las oscilaciones de la tabla de agua en el petén.

Antiguamente algunos petenes fueron canalizados para extraer algunos recursos madereros y de fauna silvestre. La canalización se realizaba desde el manantial hasta el manglar de cuenca adyacente. El efecto más importante de esta acción es la caída del nivel hidrostático promedio en el manantial y, por ende, también en los suelos del petén, propiciando la erosión. El efecto de canalización está representado por un abatimiento del nivel hidrostático general, mientras que el desazolve de manantiales, sin canalizar, ocasiona una mayor elevación del nivel y, por consiguiente, un mayor escurrimiento radial superficial de agua hacia la ciénaga. Puede considerarse, entonces, al suelo del petén como un brocal natural, que confina las aguas del manantial y lo protege de la intrusión salina.

En relación con la interfase salina en manantiales localizados a casi 3 km de la costa, en la Reserva de El Palmar, se ha detectado el límite superior de la zona de mezcla a una profundidad de -8 msnm. En temporada de "nortes" el límite inferior de la interfase es prácticamente imperceptible y se prolonga a más de -24 msnm, presentando un rango de salinidad de 2.2 ups a 11.2 ups en la superficie y el fondo del manantial, respectivamente, mientras que en la temporada de "secas" el límite inferior se registra a -18 msnm, con un rango de salinidad de 3 ups y 38 ups, en la superficie y el fondo del cuerpo de agua, respectivamente. La variación de la salinidad en los manantiales parece estar relacionada con la oscilación del nivel hidrostático y la amplitud de marea, así como a la temporada de observación.

CONCLUSIONES

Son dos las principales interacciones que se pueden mencionar en relación con el manejo hidrológico de la cuenca; el primero se refiere a las descargas de agua contaminada hacia las aguas subterráneas y su transporte hacia la zona costera, generando problemas sanitarios y, el segundo, se refiere a la intrusión salina del mar hacia el interior de la cuenca, reduciendo el espesor del agua dulce disponible, al colocar en riesgo el abasto de agua de calidad para la vida humana, la flora y la fauna regional. Este impacto se produce por la ruptura del acuitardo costero (por la construcción y el dragado de dársenas portuarias, como en Yucalpetén) y la sobreexplotación para sistemas de riego y abasto urbano. En este sentido, el acercamiento de manejo se

materializa en la zona de borde entre las zonas de recarga y descarga de la cuenca, particularmente en el paisaje costero caracterizado como sabana y/o selva inundable, donde se expanden actualmente actividades agropecuarias cada vez con mayor intensidad. Es en este paisaje, donde el proceso de formación del acuitardo costero es relevante para el mantenimiento del gradiente hidráulico estacional del acuífero y el nivel de la interfase salina, y donde el proceso de purificación de masas de agua contaminada que proviene del interior del territorio, amortiguan el impacto que pudiera producirse en los bosques de manglar y las aguas litorales, actuando como biofiltros. De igual forma, se debe tener un mayor control en los trabajos de dragado en la unidad litoral marina –eólica– acumulativa, representada por playas, dunas y plataforma marina.

Desde la perspectiva geomorfológica, se tienen registros de una pérdida rápida de las tierras costeras bajas, debido a la erosión acelerada de las costas, sujetas a retroceso. Las zonas sujetas a inundación, con la sobreelevación del nivel del mar por mareas de tormenta, indican que se está llevando a cabo la introducción de la cuña marina con una distribución no uniforme y de manera irregular. La zona de petenes que es una planicie de inundación y, por tanto, es de alto riesgo de ocurrencia de dicho fenómeno. Si el nivel del mar aumentara un metro, el agua de mar alcanzaría una penetración de 16 km tierra adentro, equivalente a más de 500 km^2, y el ascenso del mar podría acelerarse por la destrucción del manglar. La situación actual de la costa es de fuerte inestabilidad, donde los procesos erosivos en las playas dominan y donde se predice un incremento acelerado del nivel del mar por fenómenos, como el calentamiento global, además del fuerte impacto que la infraestructura habitacional y productiva, construida sobre la primera duna costera y frente a la playa, ha ocasionado, junto con la deforestación y la construcción de espolones y escolleras en la zona litoral.

A la luz del conocimiento hidrológico actual de la península de Yucatán, el efecto combinado de la sequía con el incremento del mar traería como consecuencia, una obvia reducción de la recarga de agua al acuífero subterráneo por la disminución de la precipitación pluvial, elevando la interfase salina, aunado a lo anterior y debido al incremento del nivel del mar, la cuña marina subterránea se desplazaría hacia el sur por varios kilómetros, con una reducción drástica del espesor del manto freático aprovechable para el uso humano y para la vida silvestre, particularmente la flora, la cual tendería hacia un predominio de selva baja caducifolia espinosa y con cactáceas y otras xerófitas, con una pérdida gradual de fertilidad en el suelo y sujeto a la erosión, particularmente los litosoles y rendzinas extendidos en la región. De continuar la infiltración al manto freático de las aguas residuales municipales, domésticas e industriales sin tratamiento, así como las infiltraciones de las aguas de riego con fertilizantes, pesticidas y plaguicidas de todo tipo, la intrusión salina desde la costa y la explotación de las aguas del acuífero para actividades agropecuarias, urbanas e industriales en expansión incrementarán la vulnerabilidad del acuífero de manera alarmante. Ante la incertidumbre que rodea los serios problemas que puedan surgir, es imperativo que el gobierno incluya, en sus planes a largo plazo, el factor del aumento global de temperatura. Será necesario probar que las propuestas de desarrollo en la cuenca hidrológica y su zona costera son viables, aun con los cambios climáticos que se predicen, por lo que se sugiere realizar estudios sobre las descargas de agua dulce, a través de manantiales submarinos en el litoral yucateco, sobre los procesos de acumulación de solutos que conforma el acuitardo costero, los procesos de disolución del karst yucateco y caracterizar la di-

námica hidrológica del anillo de cenotes y su influencia en la zona litoral.

REFERENCIAS

Aerofoto (1948), Fotografías aéreas de la costa noroccidental de Yucatán, a escala 1:20 000.

Custodio, E. y M. Llamas (1996), *Hidrología subterránea*, tomo II, sección 13, 2ª. ed., OMEGA, pp. 1318-1389.

CNA (1995), *Registro de datos climáticos de Estaciones y Observatorios del estado de Yucatán*, Comisión Nacional del Agua, México.

Duch, J. (1988), *La conformación territorial del estado de Yucatán. Los componentes del medio físico*, Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional de la Península de Yucatán, México.

Durán, R. (1987), "Descripción y análisis de la estructura y composición de la vegetación de los Petenes del noroeste de Campeche", *Biótica*, 12(5), pp. 181-189.

Espejel, I. (1984), "La vegetación de las dunas costeras de la península de Yucatán. I. Análisis florístico del estado de Yucatán", *Biótica*, 9(2), pp. 183-210.

Fraga, J. (1993), *La inmigración y sus principales efectos en la costa yucateca. Estudio de caso en Celestún y Sisal*, tesis de Maestría en Ciencias Antropológicas, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

García, E. (1988), *Modificaciones al sistema climático de Köppen*, 2ª. ed., México.

Gunn, H., B. Faust y W. Folan (2000), "Modelo de regresión paleohidrológica de los últimos 3 000 años, y su relación con las prácticas agrícolas de los antiguos mayas", in Lutz, W., L. Prieto and W. Sanderson (eds.), *Population, development, and environment on the Yucatan Peninsula: from ancient Maya to 2030*, IIASA, CINVESTAV, Mérida, Yucatán, México, pp. 2-32.

INEGI (1984), Mapa topográfico a escala 1:50 000 y mapas temáticos a escala 1:250 000, México.

INEGI (1979), Fotografías aéreas de la costa de Yucatán, a escala 1:75 000, México.

INEGI (1991), Fotografías aéreas de la costa de Yucatán, a escala 1:75 000.

Lutz, W., L. Prieto and W. Sanderson (eds.; 2000), *Population, development, and environment on the Yucatan Peninsula: from ancient Maya to 2030*, IIASA, CINVESTAV, Merida, Yucatán, México.

Marín, L., E. Perry, K. Pope, C. Duller, C. Booth and M. Villasuso (1989), "Hurricane Gilbert: its effects on the aquifer in northern Yucatán, Mexico: International Association of Hydrogeologists", *Proceedings of the 28th International Geologic Congress*, Washington, Hannover, Verlag Heinz Heise, pp. 111-128.

Marín, L. (1990), *Field investigations and numerical simulation of ground-water flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatán, Mexico*, PhD. Thesis, Department of Geology, Northern Illinois University, Dekalb, Illinois, USA.

Mateo, J. (1984), *Apuntes de geografía de los paisajes*, Imprenta Andre Voison, Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, Cuba.

Orellana, R., M. Balam e I. Bañuelos (1999), "Evaluación climática", en García de Fuentes, A., J. Córdoba y Ordóñez, P. Chico Ponce de León (eds.), *Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán*, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México, pp. 174-175.

Perry, E., E. Smith, J. Gamboa, A. Reeve, R. Sanborn, L. Marin and M. Villasuso (1989), "Geologic and environmental aspects of surface cementation, North Coast, Yucatán, Mexico", *Geology*, no. 17, pp. 818-821.

Perry, E. and G. Velázquez (1993), *Determination of flow directions in the ring of cenotes in the Yucatán State, Mexico*, (abs): Geos (Unión Geofísica Mexicana), v. 13, no. 5.

Perry, E., L. Marin, J. McClain and G. Velázquez (1995), "Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatán, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater", Geology, no. 23, pp. 17-20.

PRONATURA (1996), "Sistema de monitoreo ambiental y centro de datos de Biodiversidad para los Humedales de la Costa del estado de Yucatán, México", *Informe técnico*, North American Wetlands Conservation Council, PRONATURA, CINVESTAV-IPN, México.

Quezada, D. (2001), *Entre la tierra y el mar: la sociedad maya*, Ed. Dania Pérez, Fundación Fernando Ortiz, Colegio Yucatanense de Antropólogos, Mérida, Yucatán, México.

Rico-Gray, V. (1982), "Estudio de la vegetación inundable del noroeste del estado de Campeche, México. Los Petenes", *Biótica* 7(2), pp. 171-190.

SMN (1994), *Datos de los pluviógrafos de los Observatorios de Progreso*, Mérida y Valladolid, México.

Velázquez, G. (1995), *Estudio geoquímico del anillo de cenotes*, tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM, México.