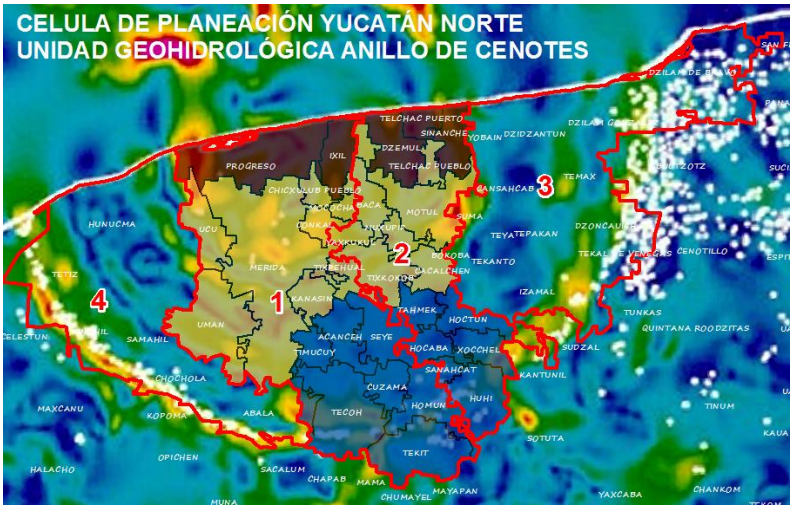
LA ZONA GEOHIDROLÓGICA DEL ANILLO DE CENOTES Y REGIÓN METROPOLITANA DEL ESTADO DE YUCATÁN FOMENTO DE SERVICIOS AMBIENTALES.



Dr. Eduardo Batllori Sampedro
Centro de Investigación y Estudios Avanzados, Unidad Mérida
Departamento de Ecología Humana
13 de mayo del 2019

Índice:

I).- Introducción **3**

II).- Zonas Geohidrológicas del Estado de Yucatán **5**

III).- Estructuras de Gestión en la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes. **11**

IV).- Caracteristicas de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes **35**

V).- Geohidrología general **149**

VI).- Condiciones socio - económicas del la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes. Región Metropolitana de Mérida. **233**

VII).- Pasivos hidrológico-ambientales generados por el desarrollo en la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes. **282**

VIII).- Conclusiones **346**

IX).- Programa Hídrico Especial de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes del Estado de Yucatán. **352**

X).- Evaluación del Progrma Programa Hídrico Especial de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes del Estado de Yucatán **370**

XI).- Bibliografía consultada y relacionada. **374**

XII).- Alternativas de Gestión del Acuífero Costero **398**

I).- INTRODUCCIÓN.

La sobrevivencia humana depende de una gran variedad de recursos naturales. El agua ciertamente es un buen ejemplo, el aire es otro importante, así como los recursos energéticos. El agua posee propiedades únicas y esenciales para toda la vida en el planeta. Es un factor básico en el crecimiento de las comunidades naturales y la civilización humana.

El Estado de Yucatán carece de aguas superficiales, como los ríos, debido a la naturaleza cárstica de las rocas de la entidad; el agua de lluvia se infiltra rápidamente y desciende al manto freático, que constituye un acuífero de buena calidad. Esta agua subterránea viaja hacia la costa y aflora como agua superficial mediante manantiales para inundar las depresiones costeras que se mezclan con el agua de mar en lagunas y ciénagas, al final de la temporada de lluvias y durante los vientos fríos del norte.

Una característica particular de la zona costera de Yucatán, relacionada con la descarga de aguas subterráneas, es la presencia de una capa geológica denominada acuitardo que confina al acuífero subterráneo, eleva el nivel de agua hacia las tierras altas y lleva a una mayor profundidad las aguas saladas del fondo. La población yucateca tiene en las aguas subterráneas el principal abastecimiento de este vital líquido para satisfacer, en exceso, las necesidades de la población y sus actividades productivas.

La explotación de este recurso no representa hasta ahora una amenaza seria en términos de sobreexplotación, ya que es muy abundante. Sin embargo, las aguas subterráneas son muy vulnerables a la contaminación que proviene de las aguas residuales domésticas, municipales, agropecuarias e industriales, las cuales carecen de un eficiente sistema de tratamiento para su disposición, de acuerdo con las normas establecidas.

En la Península de Yucatán existen niveles de deterioro de los recursos hídricos por diferentes vías de contaminación. A ello se añaden otros dos aspectos igualmente preocupantes:

En primer término, el desarrollo acelerado de la actividad socioeconómica de la franja costera y de infraestructura de todo tipo, vinculadas al turismo, a la pesca y otras actividades productivas y de servicios, con una tendencia en aumento a la transformación ambiental de las áreas tierra adentro cercanas a la costa.

Como segundo aspecto, no menos importante que el primero, se tiene el creciente desarrollo de las regiones que comprenden el sector agropecuario y con especial atención en el área metropolitana, donde todo parece indicar que se comienzan a generar problemas ambientales muy serios.

La contaminación del acuífero constituye actualmente el factor limitante más importante para el hombre y requiere que se enfoque de un modo integral, donde los tratamientos del agua y de los desechos se enlacen en un sistema de “recirculación” y fomenten el desarrollo tecnológico de una industria ambiental local. Los esfuerzos que habrán de dedicarse ahora a la reducción y a la prevención de la contaminación proporcionarán tal vez la retroalimentación que impedirá que se degraden por completo los recursos de la tierra y de la selva; por ello deben estimularse económicamente aquellas industrias y actividades que mantienen la calidad de la existencia social. La base del desarrollo

económico se debe desplazar de la explotación a la recirculación, del desechar al volver a usar, y de la cantidad a la calidad.

Un aspecto importante a considerar son los servicios ambientales que nos ofrecen los ecosistemas, entendidos como los beneficios tangibles e intangibles que la sociedad obtiene de las condiciones y procesos que se desarrollan en dichos ecosistemas, éstos últimos sostienen la biodiversidad y la producción biológica, que se traduce en bienes (como el alimento) y servicios (como la depuración de aguas contaminadas) y que el ser humano utiliza directa e indirectamente a partir de sus funciones (Evaluación del Milenio, 2009).

En este sentido es necesario llevar a cabo acciones que permitan conservar los servicios de soporte como la recarga y descarga de acuíferos, los cuales son vitales para la producción de los demás servicios ambientales, como los servicios de provisión, que en este caso se refieren al agua para consumo humano y riego agrícola, así como de transporte. Si bien el agua subterránea es la única fuente de agua en el Estado, la calidad de esta limita su aprovechamiento, así sólo las aguas cálcico – carbonatadas son las más adecuadas para el consumo humano y se extienden a lo largo de la planicie, sin embargo, las sódico – clorurada y las cálcico – sulfatadas en ocasiones, dada su concentración de sales no son las más idóneas para el consumo. Existen otras consideraciones como la conductividad eléctrica tan alta que demuestra las elevadas concentraciones de sales, particularmente dañinas para los cultivos agrícolas.

La estabilidad del sistema hidrológico regional se refleja en forma de servicios de regulación, como la capacidad de drenaje, la depuración de masas de agua, las barreras contra la intrusión salina y el gradiente hidráulico, el cual es un servicio fundamental dadas las características cársticas de la roca que conforma el Estado, ya que la alta permeabilidad de los suelos y transmisividad del acuífero, las descargas al mar de las aguas subterráneas sería muy rápida, de aquí que estratos geológicos conformados como acuitardos (es decir, donde el paso de agua es extremadamente lento) y que en el caso de la zona costera, confina a las aguas subterráneas permitiendo un flujo de agua muy regulado a través de manantiales u ojos de agua, controlando los gradientes o potenciales de agua hacia el interior y manteniendo las aguas saladas que penetran por el mar muy por debajo. Esto aunado a la recarga del acuífero, principalmente en aquellas áreas donde la precipitación es elevada, como en el oriente y sur de la entidad. Lo anterior tiene también relación con la capacidad de drenaje del territorio, particularmente donde hay presencia de suelos delgados y pedregosos, como los litosoles y rendzinas, tan extendidos en la entidad.

Por último y no menos importante se encuentran los servicios culturales, los cuales se refieren a los beneficios no materiales que la sociedad obtiene de los ecosistemas a través de experiencias espirituales, cognitivas, de desarrollo y de reflexión, así como estéticas, como: paisaje y recreación; diversidad biológica y patrimonio histórico, entre los que destacan los cenotes, cavernas y humedales costeros.

II).- ZONAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ESTADO DE YUCATÁN

La particularidad e importancia de la cuenca hidrológica, o para el caso de la Península de Yucatán, las Zonas Geohidrológicas, como unidad de planificación y desarrollo, radica fundamentalmente en que reúne condiciones de unidad geográfica natural muy específicas. Entre éstas características están: 1**).-** Su carácter de independencia relativa, por sus límites naturales bien definidos; y **2).-** Su dinámica funcional integrada, dada fundamentalmente por los intercambios de materia y energía que tienen lugar en la dinámica de los componentes del clima y del agua. De esta manera, se puede realizar un análisis de las múltiples interacciones y transformaciones de sustancias y energía y el complicado proceso de funcionamiento de éstos geosistemas, desde el movimiento mecánico del material suelto y el ciclo del agua hasta el componente biótico, aspecto este último que incluye el enfoque ecológico y de ecosistema como unidad funcional en la relación población-ambiente.

La estructura geológica es un factor de control dominante en la evolución de las formas del relieve y se refleja en ellas. Los procesos geomórficos dejan su impresión distintiva sobre las formas del terreno y cada proceso desarrolla su propio conjunto característico de formas de relieve. La interpretación cabal de los paisajes actuales es imposible sin una apreciación total de las influencias múltiples de los cambios geológicos y climáticos ocurridos durante el cretácico al pleistoceno-holoceno.

Los principales agentes geomórficos que actúan en el área de estudio son el agua de infiltración, el agua subterránea, el viento, las olas, corrientes litorales, mareas, el hombre y otros organismos, ya que son capaces, todos ellos, de remover el material de una parte de la corteza terrestre para depositarlo en otra, por lo que se les considera como agentes exógenos. A su vez, los agentes endógenos que han actuado en el área de estudio se refieren al vulcanismo y el diastrofismo. Una peculiaridad geomórfica en el área de estudio es la presencia de un agente "extraterrestre", como lo denomina Thornbury (1977), el término se refiere a la caída de un meteorito que, como lo aseguran varios investigadores, impactó a la península de Yucatán hace algunos millones de años.

Los principales procesos que se llevan a cabo son la meteorización superficial de la roca, tanto física (expansión térmica), como química (disolución), la erosión (hídrica y eólica), la remoción en masa (hundimiento) y la acumulación (biogénica, eólica y de precipitación de solutos), donde el clima tiene una gran influencia sobre estos procesos geomórficos.

La actividad endógena es creadora de las deformaciones de la superficie terrestre, su estudio es fundamental para conocer la disposición estructural del relieve y la distribución del carácter litológico. Como proceso antagónico, intervienen los procesos exógenos que se encargan de nivelar el relieve mediante la erosión de las elevaciones y acumulación o relleno de sedimentos en las depresiones. Ambos componentes, el relieve y el clima organizados sin disociarse, conducen a determinados sistemas de denudación-erosión-acumulación-corrosión, pero con el dominio de alguno de ellos, quedando como procesos secundarios los restantes. Dichos mecanismos modelan conjuntos estructurados espacialmente, además de estar vinculados con familias de formas afines por su origen.

El estado de Yucatán corresponde a una cuenca hidrológica fundamentalmente abierta, con un acuífero cárstico de tipo libre, de ahí que al manto de agua se le denomine como freático, donde los niveles de agua varían de más de 120 m en la parte de lomeríos, 30 m en la parte de la planicie, hasta menos de 5 m en una franja de 15 Km de ancho paralela

a la costa, en esta zona, sin embargo, el acuífero se encuentra confinado por un acuitardo costero.

De acuerdo con Velásquez (1986), el estado de Yucatán presenta tres provincias fisiográficas: I Costera; II Planicie Interior y; III Cerros y Valles. La costera contiene a las playas y márgenes costeros del estado y se caracteriza por manifestar aguas sódico-cloruradas, como resultado de la intrusión salina que ahí se lleva a efecto. La Planicie Interior comprende las porciones oriente, norte y poniente, contiene aguas de la familia cálcico-bicarbonatadas, de buena calidad para todo uso y una alta productividad; en su porción noroccidental se encuentra el área de impacto del meteorito mencionado anteriormente, denominado "Cráter de Chicxulub" y que conforma el llamado anillo de cenotes. La provincia Cerros y Valles comprende a la parte central y sur del estado y tiene como características principales a las rocas más antiguas, suelos más desarrollados y vegetación más alta y densa; así como una profundidad muy grande al manto de agua. También se distingue por contener aguas cálcico-sulfatadas, debido a la presencia de evaporitas.

Los rasgos fisiográficos presentes en el estado son de tipo cárstico y corresponden de forma general a un estado de erosión intermedio dentro del ciclo geomorfológico. En las calizas existen cavidades y conductos de disolución que varían desde pequeños poros y fisuras, hasta cavernas o grutas muy grandes y extensas. El colapso de los techos de las cavernas da lugar a la formación de numerosas depresiones redondeadas denominadas dolinas, localmente conocidas como rejolladas cuando carecen de agua y como cenotes cuando dejan al descubierto el manto de agua subterránea. La superficie de las rocas está formada, con pocas excepciones y salvo en las barras de arena en la costa, por una capa muy compacta conocida localmente como laja o caliche. En gran número de cortes superficiales de caminos, bancos de material y otras excavaciones, se observa un material friable, blanquecino, denominado en el ámbito local como sahcab o sascab y que corresponde a una roca sin consolidar, cuya consistencia parece indicar que el lodo calcáreo del cual procede se depositó como calcita y, por lo tanto, no ocurrió la cristalización de aragonita, proceso necesario para la consolidación de la roca.

Luego de la revisión y análisis de la información disponible en la Comisión Nacional del Agua para las zonas geohidrológicas, el material cartográfico de INEGI sobre geología, aguas subterráneas, topografía, aguas superficiales y de regiones fisiográficas, así como de otras fuentes (Wilson, E.M., 1980, Duch, 1988, Lesser, J.M., y Weidie, A.E., 1988, Perry, E., L. Marín y J. McClain y G. Velázquez, 1995; Butterlin, S. y F. Bonnet. 1963, Villasuso y Méndez, 2000, POETCY, 2006, Jaime Urrutia 1994), se decidió considerar, para los efectos de este escrito, que la península de Yucatán está dividida en cuatro zonas geohidrológicas: Región Costera; Anillo de Cenotes; Planicie Interior y Cerros y Valles.

Esta zonificación pone en una situación interesante a las regiones económicas y distritales, con relación a las acciones de planificación y política ambiental, identificando y clasificando áreas críticas de interés. Además de la región costera y el anillo de cenotes (antigua zona henequenera) existen también áreas de intenso uso humano que deben ser ordenados para preservar el ambiente (zona metropolitana).

Fuera de los ríos Hondo, Champotón y Candelaria, la península de Yucatán carece de corrientes superficiales, particularmente en la porción norte. Hacia el sur, sólo se

manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficial o aguadas.

Las cualidades esenciales de las zonas geohidrológicas están dadas por:

(1) Sus rasgos distintivos, como las sierras, fracturas, cenotes, cavernas, acuíferos, selva caducifolia, manglar y litoral.

(2) Los procesos que tienen lugar, en términos de los flujos de materia y energía que manejan el sistema como la luz solar, el reciclamiento de nutrientes y el flujo de agua, que limitan la productividad del sistema.

(3) Las modulaciones, como factores variables que limitan la capacidad de carga en el corto plazo (día a día), como la temperatura, la marea oceánica, la disponibilidad de nutrientes minerales, gases disueltos o presencia de químicos tóxicos.

(4) Las características o aspectos que distinguen una zona de otra, como la riqueza de especies, las condiciones generales del agua y la apariencia visual del paisaje.

El entendimiento de estos factores es útil para diseñar un programa de manejo integral de los ecosistemas contenidos en la zona geohidrológica. La alta permeabilidad de las rocas que constituyen el subsuelo de estas zonas, y lo poco profundo del manto de agua, asignan a la península de Yucatán un índice de vulnerabilidad que va de alto a extremo.

Es necesario entonces integrar la zona geohidrológica costera con aquellas asociadas como el semicírculo de cenotes o planicie interior, por ejemplo, por la sencilla razón de que el flujo de agua desde tierras altas es el factor primario de control de las condiciones de los sistemas costeros. De esta manera, el mantener la calidad y la cantidad de flujo a través de la regulación de las prácticas de uso del suelo debe ser considerado como prioritario. La capacidad de carga de la región costera es controlada por todos los factores que influyen en la estructura y el funcionamiento de los paisajes y ecosistemas al interior de la zona geohodrológicas del cual forma parte.

Uno de los pasos a seguir para la gestión integrada del agua en esta zona geohidrológica, es el de entender más sobre los aspectos geohidrológicos básicos, entre los cuales está el balance hídrico del mismo.

De manera general el agua entra al suelo en forma de lluvia, granizo, rocío, neblina, hielo o nieve derretidos y es extraída del suelo mediante la evaporación de superficie libre y los sistemas de transpiración de las plantas, cuando el agua logra al entrar al sistema, saturar la capacidad de campo o de almacenamiento en la matriz del suelo, el agua tenderá a gravitar hacia el subsuelo percloando hasta el manto freático. Se establece entonces lo que se conoce como ciclo hidrológico. La evaporación directa del suelo con cubierta vegetal es pequeña en comparación con la pérdida de agua por transpiración y aquí radica la importancia ecológica de la vegetación como componente del ciclo hidrológico (Figura II.1). El intercambio de materia y energía entre los diferentes estadios del agua en el ciclo puede ser identificado y cuantificado a través del balance hídrico, donde se observan los ingresos y egresos y los cambios de almacenamiento para un periodo de tiempo determinado en un complejo territorial dado. En la zona geohidrológica del anillo de cenotes se presentan 2 áreas bien identificadas (área litoral inundable al norte y terrenos cársticos denudativos al sur) que permiten la utilización de la ecuación general

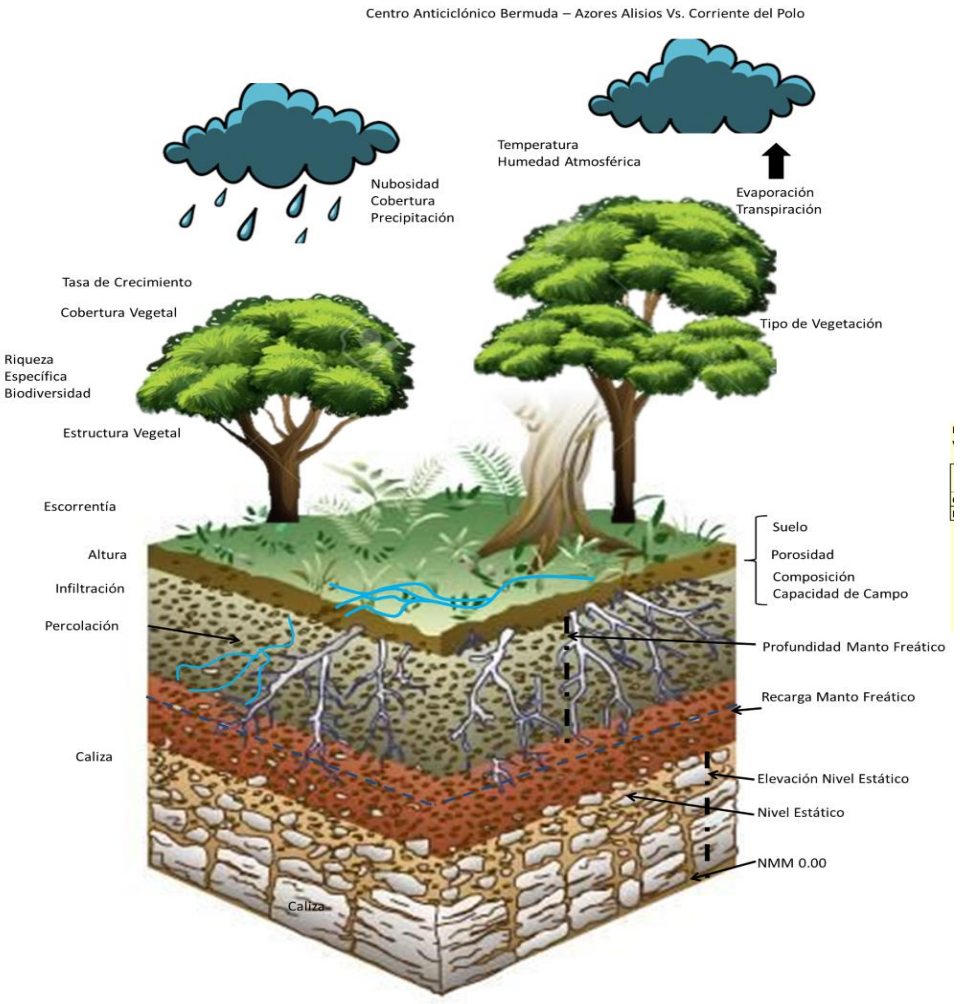
del balance hídrico, basado en el principio de conservación de la materia, en este caso, el agua. Los elementos de la ecuación general del balance hídrico para un tiempo determinado son:

$$\pm\Delta w = (P + A_{sub} + A_{sup}) - (I_p + E_T + E_t + O + A'_{sub} + A'_{sup})$$

Donde *:

$\pm\Delta w$	=	Cambio de almacenamiento, mm.
P	=	Precipitación, mm.
A_{sub}	=	Afluencia subterránea, mm.
A_{sup}	=	Afluencia superficial, mm.
I_p	=	Infiltración profunda, mm.
E_T	=	Evaporación Total, mm.
E_t	=	Evapotranspiración, mm.
O	=	Extracciones, mm.
A'_{sub}	=	Efluencia subterránea, mm.
A'_{sup}	=	Efluencia superficial, mm.

Figura II.1.- Representación esquemática del ciclo hidrológico.



En 1996, R. Méndez (CNA, Jefatura de Aguas Subterráneas), realizó el calculo de balance para el estado de Yucatán, tomando como base el registro de usuarios de aguas

subterráneas. Los volúmenes de uso concedidos y asignados en Mm3/año, son para la agrícola 300, Público urbano con 235, el industrial con 16 y la generación de energía eléctrica con 19, con lo cual se obtiene una extracción de casi 570 Mm3/año, vigente hasta 1995. De acuerdo con la información existente solo se permite establecer resultados aproximados de los flujos subterráneos de los otros estados, 250 Mm3/año por Campeche y 1,350 Mm3/año por Quintana Roo. En condiciones naturales el volumen de descarga al mar es de 8004.9 Mm3/año, en tanto que en condiciones actuales de explotación social el volumen de descarga es de 7,435 Mm3/año. Se estima un volumen de retorno por riego de 45 Mm3/año y se consideró un volumen registrado ante CNA de 9.5 Mm3/año como descarga de aguas residuales, con lo que la descarga al mar se incrementa a 7,490 Mm3/año, correspondiendo a 19.8 Mm3/año/km de costa, lo que representa un caudal instantáneo de 237 m3/sg. Con la aplicación de la Ley de Darcy, se determinó un volumen de calidad de 2,604 Mm3/año y de 1,972 Mm3/año para los cuerpos de agua costeros, mismos que junto con 570 Mm3/año que actualmente se extraen del acuífero, constituyen los volúmenes de conservación, por lo que solo 2,340 Mm3/año quedan como la disponibilidad efectiva o real.

Si los incrementos de la demanda planteados para el periodo 2000-2010 llegan hasta 1,138 Mm3/año (cantidad solicitada para el programa de riego de 100,000 ha por 1,000 Mm3/año, de igual forma, el público – urbano requiere un estimado de 131 Mm3/año, 17 Mm3 para la generación de energía eléctrica), los cuales sumados a 570 Mm3, el total de la demanda seria de 1,708 Mm3/año, es decir, se requerirá toda la disponibilidad hídrica efectiva mas una parte de la dedicada a la conservación, con lo que se pone en riesgo el desarrollo regional.

En el semicírculo de cenotes, que tiene un acuífero con un espesor de 40 m, la explotación actual del agua subterránea asciende al 23 % de la disponibilidad efectiva, y se espera que se incremente a un 48 % en el 2020, en el mejor escenario. Para el caso de la planicie interior, la explotación es del 27 % y se espera un incremento de mas del 1000 % de la disponibilidad efectiva en el 2020, por lo que requeriría de las descargas naturales necesarias para la conservación del ecosistema. Si a lo anterior le sumamos las características salinas de las aguas subterráneas costeras, la vulnerabilidad de la Cuenca se incrementará significativamente.

Tabla II.1).- Balance hidráulico en condiciones actuales:

Entradas	Mm3/año	Salidas	Mm3/año
Precipitación	44,876.91	Evapotranspiración	38,371.94
Subterránea	1,500.00	Flujo al mar	7344.47
Retorno	54.50	Bombeo	715
Total	46,431.41	Total	46,431.41

Fuente: R. Méndez, 1996

Tabla II.2).- Disponibilidad hídrica efectiva o real actual:

Disponibilidad Hídrica	Volúmenes de conservación Mm3/año			Disponibilidad efectiva
	Calidad	Ambientales	Comprometidos	
7,344.47	2,604.88	1,972.30	715	2,197.49

Fuente: R. Méndez, 1996 modificado Batllori, 2001.

Tabla II.3).- Proyecciones al 2020

Zonas Geohido-logicas	Recarga Total (Rt)	Bombeo (B)	Descargas naturales necesarias				Disponi-bilidad (D)	B/D %
			Flujo Subterrá-neo (Sh)	Aporte a Corrien-tes (Dc)	Evapo-Transpira-ción (ET)	Total Mm3 (Dnn)		
Planicie Interior	9,645	1,459	3,278	-	4,976	8,074	112	1,300
Circulo De Cenotes	3,068	411	278	-	1,519	1797	860	47

Fuente: CNA (2001, Diagnóstico para la Región XII)

Para el caso del presente estudio se presentarán datos también para los años 1987 y 1988, ya que se cuenta con información a cierto detalle de precipitación y evaporación, pero principalmente se cuenta con datos de variación de niveles del manto freático derivado de los estudios de la Tesis Doctoral de Luis Marín, del Instituto de Geofísica de la UNAM (1990), que incluye un ciclo anual y la presencia de un evento hidrometereológico extremo como el huracán Gilberto, en Septiembre de 1988.

En particular, el presente escrito está dirigido a realizar una revisión del estado de conocimiento de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes como zona de interés prioritario.

III).- ESTRUCTURAS DE GESTIÓN EN LA ZONA GEOHIDROLÓGICA DEL ANILLO DE CENOTES.

La Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes esta fuertemente vinculada con el denominado Cráter de Chicxulub, el cual se ha considerado, por parte de la Alta Comisionada de la UNESCO en México, con potencial para ser suscrito como Patrimonio Natural de la Humanidad, e incorporarlo al Sistema de Geoparques de la ONU, debiéndose realizar los arreglos institucionales entre la federación y el estado de Yucatán para alcanzar dicha distinción y asegurar su conservación. En tal sentido, el 27 de agosto del 2015, se iniciaron las pláticas con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, para preparar la iniciativa para proponer ante la UNESCO al Cráter de Chicxulub como Patrimonio Natural de la Humanidad, conformando una red de expertos nacionales e internacionales sobre el tema.

La estructura del Cráter de Chicxulub, su tamaño y morfología, han sido estudiados en las tres últimas décadas utilizando métodos gravimétricos, magnéticos, magnetotelúricos, reflexión sísmica, así como utilizando perforaciones con recuperación continua de núcleos, estudiando las propiedades petrofísicas de las litologías de impacto, así como su geoquímica, petrogeología, micropruebas, paleontología y análisis isotópicos, composición estratigráfica, radiometría, bioestratigrafía, polaridad magnética y estudios de isotopos estables e hidrogeología, hidrogeoquímica, zoología, y botánica, así como estudios etnobiológicos e históricos de la importancia cultural de los cenotes en las comunidades mayas.

Ha involucrado aproximaciones de estudio inter y multidisciplinarias, con investigadores de diversos campos de las geociencias, astronomía, física, química, biología, hidráulica, ecología, ciencias marinas, atmosféricas, planetarias y sociales. Ahora los retos tienen que ver con estudios de la dinámica del impacto, formación del cráter, efectos globales de la liberación de energía y ondas sísmicas y los modelados del comportamiento de materiales sujetos a altas presiones y temperaturas, efectos globales en sistemas de soporte de la vida y evolución del sistema solar representan retos interesantes en geociencias. Las principales referencias bibliográficas se presentan al final de este documento.

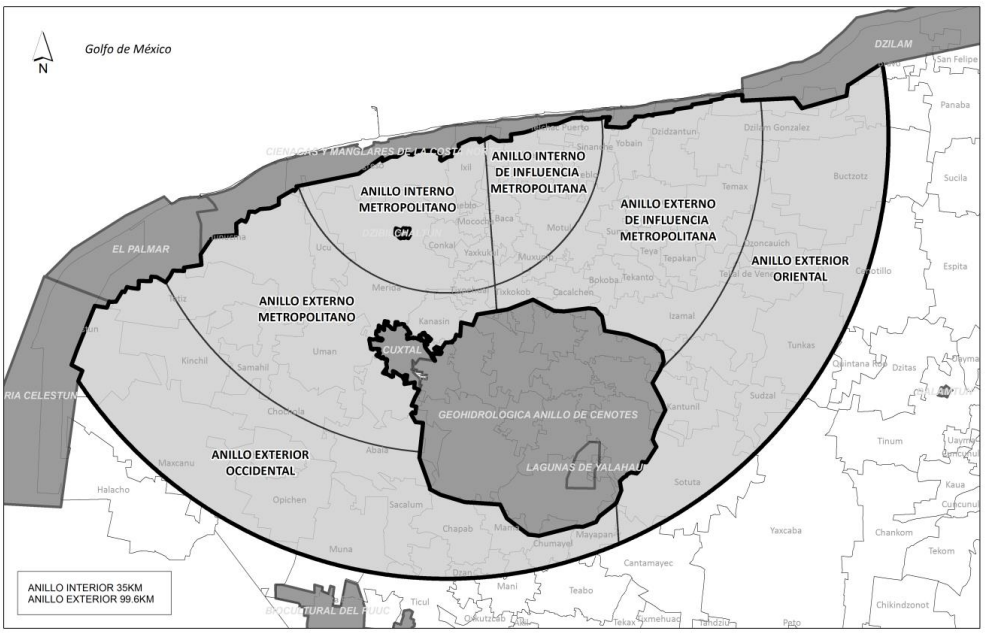
Para garantizar la protección de los ecosistemas integrantes del patrimonio natural de Yucatán, como lo es el Cráter de Chicxulub, y alcanzar el desarrollo sostenido, en beneficio de la población, resulta necesario procurar la compatibilidad del uso y conservación de los recursos naturales con las actividades que en ella se realicen, por lo que es necesario incorporar al Cráter de Chicxulub al sistema estatal de Áreas Naturales Protegidas.

Se cuenta ya con avances en la redacción del Decreto de creación de la Reserva Estatal del Cráter de Chicxulub, el cual ha sido presentado al pleno de Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Anillo de Cenotes y Zona Meteropolitana de Yucatán, órgano auxiliar del Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán.

La Reserva propuesta se representa en la figura siguiente, y se observan las Áreas Naturales Protegidas de Dzibilchaltún, de carácter federal, Cuxtal, de carácter Municipal y la Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes, que se encuentran en su interior. La Reserva propuesta se extiende sobre tierras pertenecientes al régimen ejidal y

terrenos particulares y de fundo legal urbano, con una superficie total de 11,430.73 km2 o su equivalente a 1,143,073.00 hectáreas.

Figura III.1).- Polígono de la propuesta de Reserva Estatal Cráter de Chicxulub.



Al exterior del Cráter de Chicxulub se presentan una variedad de áreas naturales protegidas y áreas prioritarias sujetas a conservación mediante tratados internacionales, como el acuerdo Ramsar. En la zona costera se encuentran la Reserva de la Biosfera Ría de Celestún, de carácter federal, así como las Reservas Estatales de El Palmar, Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán y Bocas de Dzilám. Y como se mencionó anteriormente, al interior se encuentra el Parque Nacional de Dzibilchaltún, así como el área natural protegida municipal de Cuxtal, en el Municipio de Mérida, aunado a la Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes, junto con el Parque Estatal de Yalahau.

De igual manera, el 2 de febrero del 2009, se inscribió, sin ser Área Natural Protegida, al conjunto de humedales tipo kárstico conocido como Anillo de Cenotes, y ha sido reconocido como Humedal de Importancia Internacional establecido con arreglo al artículo 21 de la Convención Ramsar, abarcando una superficie de 300,000 ha, incluyendo 99 cenotes en 27 Municipios.

La relevancia del Anillo de Cenotes está ampliamente reconocida por el Programa de Regiones Prioritarias para la Conservación de la Biodiversidad de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), como: Región Hidrológica Prioritaria 102. Anillo de Cenotes, el cual se conforma como red cavernosa muy compleja, que actúa como un vertedero y línea de conducción de grandes masas de agua. En su conjunto, y sin incluir la propuesta del Cráter de Chicxulub y del anillo de cenotes de Ramsar, suman 483,946.13 hectáreas de áreas naturales protegdas al interior del Anillo de Cenotes o Cráter de Chicxulub, lo que representa el 13.12 % de la superficie estatal, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III.1).- Superficie total de ANP en Yucatán y su proporción dentro de la Zona Gepohidroógica del Anilloo de Cenotes.

ANP	Tipo	Superficie total DECRETO ha	Fecha decreto
Parque Nacional Dzibilchaltún	Federal	539.00	14-abr-87
Zona sujeta a Conservación Ecológica 'Reserva Cuxtal'	Municipal	10,757	14-jul-93
Parque Estatal Lagunas de Yalahau.	Estatal	5,683.28	08-jun-99
Reserva de la Biosfera Ría Celestún	Federal	81,482.00	27-nov-00
Reserva Estatal de Dzilam.	Estatal	69,039.29	28-dic-05
Reserva Estatal El Palmar	Estatal	47,931.45	19-oct-09
Ciénagas y manglares de la costa norte de Yucatán	Estatal	54,776.73	09-mar-10
Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes	Estatal	213,737.38	28-oct-13
Total superficie decretada		**483,946.13**	
Total Territorio Yucateco	3,686,513.59		
Territorio ANP	631,294.85		Has.
Porcentaje	17.12 %	13.12%	%

En la promoción del desarrollo de las regiones del Estado de manera armónica, conforme sus características urbanas o rurales y sus procesos de cambio, se requiere establecer instrumentos de planeación que, articulados a la protección del medio ambiente, contribuyan a desconcentrar las actividades gubernamentales y de suministro de servicios, así como propiciar la diversificación productiva con enfoque regional; y acordes con el ordenamiento territorial, garanticen la protección del medio ambiente y el desarrollo sustentable.

La zona geohidrológica del Anillo de Cenotes y/o Cráter de Chicxulub se configura como una unidad geográfica funcional, que permite aplicar un manejo integral y sustentable del agua en esta porción del acuífero libre del Terciario (eoceno y mioceno-plioceno) del Estado de Yucatán, identificando tres componentes constitutivos:

1).- Un área de recarga, representada por la zona de alta variabilidad hidrológica con aguas cálcico – carbonatadas de buena calidad al sureste de la Ciudad de Mérida, que incluye los Municipios de Huhí, Cuzamá, Homún, Seye, Tecoh, Acanceh, entre otros;

2).- Un área de escurrimiento subterráneo de agua en la parte central que pasa por debajo de la zona metropolitana de Mérida y Municipios de influencia, con áreas preferenciales de flujo a manera de ríos subterráneos en el anillo de cenotes y;

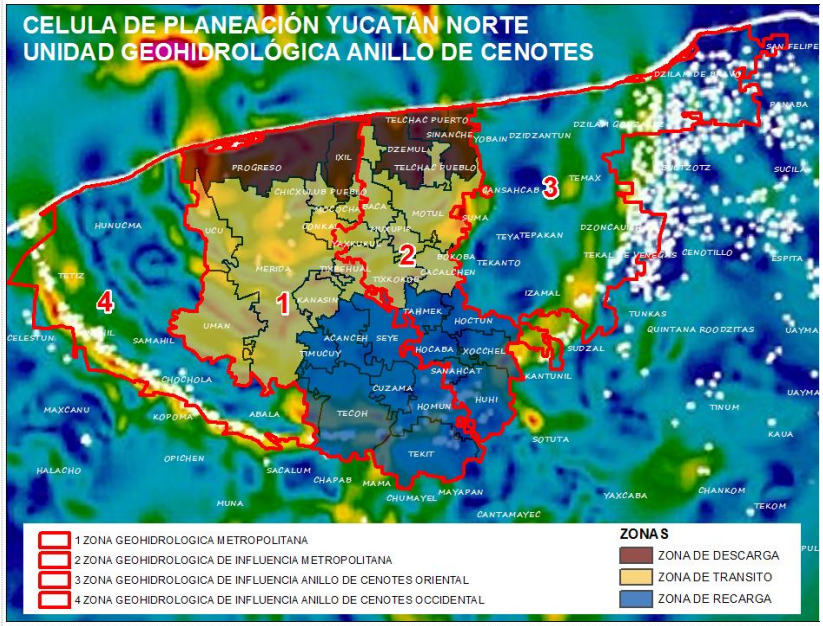
3).- Un área de descarga en la zona costera, confinando al acuífero (del Cuaternario: Pleistoceno y Holoceno) mediante un acuitardo que permite regular el vertimiento de agua a través de manantiales a un sistema de humedales como en los Municipios de Progreso, Ixil y Telchac Puerto, al tiempo que permite desarrollar un pequeño gradiente altitudinal de

los niveles de agua con respecto al nivel medio del mar, empujando la interfase salina (agua sódico – clorurada) a más de 50 metros por debajo del mismo en el área de recarga, constituyendo un espesor de agua dulce útil para la sociedad.

Si bien la cantidad de agua almacenada puede cubrir las necesidades crecientes de la población y de las actividades productivas, la calidad de agua se encuentra amenazada dada la alta vulnerabilidad del acuífero a los contaminantes que se generan y que puede comprometer la sustentabilidad del desarrollo de la región metropolitana y área de influencia en el mediano y largo plazo.

Debido a la importancia de esta zona, en la XXV reunión del Grupo de Trabajo Especializado en Saneamiento de Yucatán (Organo Auxiliar integrado al Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán), celebrada el 28 de marzo de 2012, se acordó la conveniencia de instalar el Comité Técnico de Aguas Subterráneas de la Zona Metropolitana de Yucatán (COTASMEY) del Anillo de Cenotes, que contemple en el marco del Consejo de Cuenca, la gestión integrada de los recursos hídricos en dicha zona y el anillo de cenotes, entendido esto tal como lo establece el artículo 3, fracción XXIX de la Ley de Aguas Nacionales, como el proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales, considerando bajo este concepto primordialmente agua y bosque.

Figura III.2.- Espacio geográfico de actuación del COTASMEY



El objeto de los COTAS es la formulación, promoción y seguimiento de la ejecución de programas y acciones que contribuyan a la preservación, estabilización o recuperación en cantidad y calidad de las aguas subterráneas.

El área de actuación del COTASMEY en el denominado anillo de cenotes, que coincide con el Cráter de Chicxulub, se ubica la ciudad de Mérida y su zona metropolitana, y los municipios que representan el área de recarga del acuífero que abastece a la zona metropolitana, su área de tránsito, así como los correspondientes a su área de descarga

que pueden ser afectados, con la finalidad de lograr una gestión integrada del agua en atención a la problemática hídrica que presenta. Dentro del Anillo de Cenotes, o Cráter de Chicxulub, existen 53 municipios, los cuales se dividen en cuatro subzonas en función del microrelieve presente y características propias como área de recarga, tránsito y descarga:

Tabla III.2).- Muncipios que incluye el COTASMEY, característica hidrológica y zonificación

Subzonas	Subzona 1	Subzona 2	Subzona 3	Subzona 4
RECARGA	Seye	Tahmek		
	Acanceh	Hoctún		
	Timucuy	Xocchel		
	Homún	Hocabá		
	Cuzamá	Sanahcat		
	Tecoh	Huhí		
	Tekit			
TRANSITO	Chicxulub pueblo	Motul	Dzilam González	Tetiz
	Mocochá	Telchac Pueblo	Temax	Samahil
	Mérida	Baca	Cansahcab	Kinchil
	Ucú	Muxupip	Dzoncauich	Chocholá
	Conkal	Yaxkukul	Suma	Abalá
	Tixpéhual	Tixkokob	Tepakán	
	Kanasín	Cacalchén	Teya	
	Umán		Tekal de Venegas	
			Takantó	
			Bokobá	
			Izamal	
DESCARGA	Ixil	Sinanché	Dzilam de Bravo	Hunucmá
	Progreso	Telchac Puerto	Dzidzantún	
		Dzemul	Yobaín	

En el ámbito geográfico del Cráter de Chicxulub, dentro del Anillo de Cenotes, la población asciende a 1´350,627 habitantes, que representan el 69% de la población del estado de Yucatán, destacando la subzona 1 del COTASMEY, integrada por 17 municipios, donde habita el 57% de la población estatal; lo que destaca la importancia de dicha subzona1, donde se ubica el área de recarga, transición y descarga de la zona metropolitana de Mérida, que la sitúa como el espacio geográfico de mayor presión en el uso del agua de toda la Península de Yucatán y que requiere de soluciones a su problemática hídrica, a través de acciones que contribuyan a la conservación y preservación de las aguas subterráneas para garantizar su disponibilidad en el futuro.

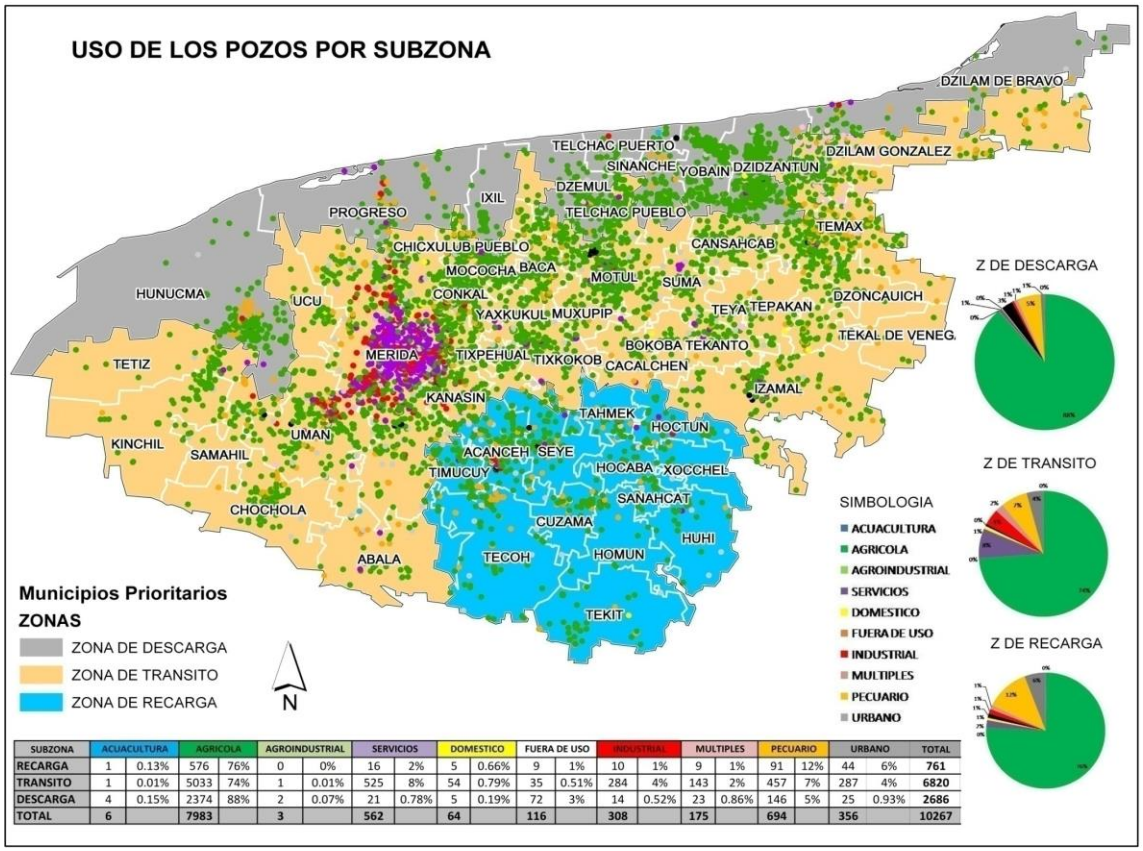
De acuerdo con la clasificación anterior e información del REPDA de la CONAGUA para el año 2014, el volumen que se extrae para los diversos usos en el Cráter de Chicxulub (al interior del círculo de cenotes) es de 495 Hm^3, que corresponde al 42% del volumen que se aprovecha en el estado de Yucatán y al 19% del total en la Península de Yucatán.

Tabla III.3).- Usos del agua en el Estado de Yucatán.

Usos del agua en el estado de Yucatán (miles de m3/año).

	Agrícola	Doméstico	Acuacultura	Servicios	Industrial	Pecuario	Público Urbano	Múltiples	Total
Subzona 1	37,108	19	0	7,206	24,310	2,011	178,127	59,221	308,000
Subzona 2	17,071	1	36	99	1,304	779	8,863	42,937	71,090
Subzona 3	24,719	0	0	54	64	869	6,600	44,772	77,079
Subzona 4	23,693	0	73	118	18	3,204	3,566	8,093	38,765
Subzonas 1-4	**102,591**	**19**	**110**	**7,477**	**25,696**	**6,863**	**197,155**	**155,022**	**494,934**
Resto del estado	293,006	5	4	384	11,626	9,182	48,849	328,251	691,309
Total	**395,597**	**25**	**114**	**7,861**	**37,322**	**16,046**	**246,004**	**483,273**	**1,186,242**

Figura III.3).- Distribución y usos de los pozos por subzona geohidrológica del COTASMEY



SUBZONA	ACUACULTURA		AGRICOLA		AGROINDUSTRIAL		SERVICIOS		DOMESTICO		FUERA DE USO		INDUSTRIAL		MULTIPLES		PECUARIO		URBANO		TOTAL
RECARGA	1	0.13%	576	76%	0	0%	16	2%	5	0.66%	9	1%	10	1%	9	1%	91	12%	44	6%	761
TRANSITO	1	0.01%	5033	74%	1	0.01%	525	8%	54	0.79%	35	0.51%	284	4%	143	2%	457	7%	287	4%	6820
DESCARGA	4	0.15%	2374	88%	2	0.07%	21	0.78%	5	0.19%	72	3%	14	0.52%	23	0.86%	146	5%	25	0.93%	2686
TOTAL	6		7983		3		562		64		116		308		175		694		356		10267

Entre los usos principales al interior del cráter de Chicxulub son, sin duda, el Uso Múltiple (fundamentalmente agropecuario, con ganado bovino y riego de pastos), seguido por el público urbano y el agrícola, los cuales suman 454 Hm^3 y que se surten de agua a partir de 8,514 pozos, lo que representa más del 80 % del total de pozos registrados en el área.

En cuanto a descargas de aguas residuales, en esta misma zona se generan 20 Hm^3 de aguas residuales no municipales, destacando el sector industrial y de servicios, sin embargo, es el sector municipal quien genera las mayores descargas con 108 Hm^3 de aguas residuales, para un total de 128 Hm^3, que representa el 70% de los 183 Hm^3 que se generan anualmente en el estado de Yucatán.

Tabla III.4).- Descargas de aguas residuales en la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

Descargas en el estado de Yucatán (m3/año).

	Acuacultura	Servicios	Industrial	Pecuario	Total
Subzona 1	7,278	3,927,387	11,760,322	1,442,249	17,137,236
Subzona 2	0	133,304	901,660	749,740	1,784,704
Subzona 3	7,147	48,368	383,782	168,856	608,153
Subzona 4	28,708	62,402	70,058	626,718	787,885
Subzonas 1-4	**43,133**	**4,171,460**	**13,115,822**	**2,987,563**	**20,317,978**
Resto del estado	0	1,778,791	3,338,785	1,688,400	6,805,976
Total	**43,133**	**5,950,251**	**16,454,607**	**4,675,963**	**27,123,954**

De los sistemas de irrigación agrícola y de usos múltiples se estima que poco mas de 38 Hm^3 se inflitren al subsuelo generando problemas de contaminación con agroquímicos utilizados, como herbicidas e insecticidas, colocando en grave riesgo la salud de la población. Otros contaminantes que se vierten al interior del circulo de cenotes son las aguas residuales de granjas porcícolas y avicolas, incluyendo las aguas de los molinos de nixtamal, así como lixiviados derivados de los residuos sólidos urbanos depositados en vertederos a cielo abierto.

Existe una fuerte polarización socioeconómica en la zona geohidrológica, en donde la zona metropolitana de Mérida y su área de influencia han sido sometidas a un acelerado proceso de expansión urbana y de especialización económica, que ha provocado impactos desiguales en el resto de la entidad.

Como se mencionó anteriormente, en la zona metropolitana de Mérida se concentra el 57% de la población total y casi 60% de la población urbana del estado, cuenta con los mejores niveles de bienestar y calidad de vida, así como de equipamiento y servicios en materia de educación, salud, servicios bancarios, empleo, transporte, vialidad, abasto, comercio, deporte, vivienda, servicios de agua potable, drenaje, electrificación, entre otros.

Sin embargo, en las 431 localidades rurales que completan la integración de la Región II del Comité de Planeación del Estado de Yucatán (COPLADEY), al estar dispersas se dificulta la dotación de servicios, particularmente en los Municipios de Abalá, Tahmek, Ixil, Tecoh, Acanceh y Timucuy, entre otros, donde se presentan procesos de hacinamiento, pobreza, exclusión y marginación que limitan las posibilidades de desarrollo humano, particularmente en aquellos grupos vulnerables, como las mujeres, niños, ancianos, personas con alguna discapacidad, así como la población indígena.

III.1.- Acciones realizadas por el COTASMEY para el conocimiento geohidrológico del Anillo de Cenotes.

En el mes de octubre del año 2013, se realizó, en conjunto con voluntarios de IBM, un taller que permitiera desarrollar un Mapa Estratégico para la Gestión del la Calidad del Agua en el ámbito del COTASMEY.

El COTASMEY (Comité Técnico de Aguas Subterráneas para la Zona Metropolitana de Yucatán) es un organismo que comprende 35 miembros que incluyen agencias federales, estatales del gobierno así como centros de investigación, asociaciones civiles y empresas interesadas en promover el manejo adecuado de las fuentes de agua dulce de la Zona Metropolitana de Yucatán a fin de preservar los principales acuíferos que abastecen de agua a la población, así como también, garantizar el uso sustentable de este recurso.

Entre los objetivos planteados por el equipo de IBM –COTASMEY, están:

1. Analizar las oportunidades para aplicación de la Tecnologías de la Información (TI) en la creación de un sistema de gestión integral de monitoreo de calidad del agua en Yucatán, a través del conocimiento, comprensión y análisis de los enfoques actuales del seguimiento y gestión de la calidad del agua entrevistando a algunos de los principales organismos que comprenden COTASMEY.

2. Proponer un plan de trabajo para implementar la gestión inteligente del agua para COTASMEY

3. Proponer una estrategia tecnológica para un mejor manejo y monitoreo del agua.

Figura III.4).- Metodología propuesta por el equipo IBM y el COTASMEY

En relación con el organismo COTASMEY se identificó lo siguiente:

Tabla III.5).- Objetivos propuestos por el COTASMEY y organizaciones involucradas en la consolidación de los objetivos.

COTASMEY objetivos principales		
* Aprobación del presupuesto de inversión hídrica en Yucatán.	* Evaluación de resultados actualizados de investigaciones científicas en los aquíferos de Yucatán.	*Implementación de un programa conjunto de monitoreo de la calidad del agua en el estado de Yucatán.
		* Implementación de una estrategia de Educación relacionada con la conservación y uso de los recursos hídricos.
Organizaciones involucradas en la consolidación de los objetivos		
A nivel Federal (**CONAGUA**, SEMARNAT, PROFEPA, ECONOMíA, SEDESOL)	Centros de investigación: CICY, CINVESTAV, **UADY**, Universidad Marista, INIFAP	**SEDUMA**, CICY, CINVESTAV, UADY, Universidad Marista, **CONAGUA**, SEMARNAT, Plan estratégico de Yucatán, Colectivo Sinergia A.C., Sociedad Yucateca de Ingeniería Sanitaria y Ambiental A.C., **Secretaría de Salud Yucatán.**
A nivel estatal**(SEDUMA, JAPAY, SALUD**)		

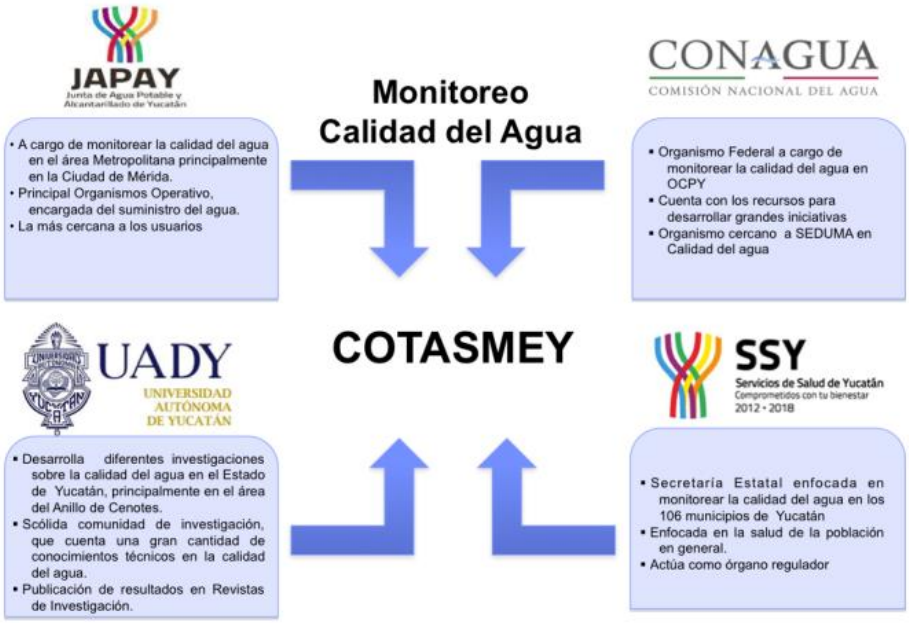
En la tabla siguiente se presentan las Organizaciones que integran el COTASMEY. En verde se señalan las agencias entrevistadas por el equipo de consultores de IBM.

Tabla III.6).- Organizaciones que integran el COTASMEY

SEDUMA										
Secretaría técnica: CONAGUA										
Asamblea general (tiene la capacidad de toma de decisiones)									Consejo consultivo	
Organizaciones estatales	Sector Industrial	Servicios	Ganadería	Universidades	Centros de Investigación	Agriculture	ONG's	Normatividad	Gobierno estatal	Gobierno federal
JAPAY	CANAIVE	CANACO	Federación de pequeños porcicultores	*UADY*	CICY	Productores de Tecoh	Plan estratégico de Yucatán A.C	SEDUMA	Fomento Agropecuario y Pesquero	CONAFOR
SMAPAP	CANACINTRA	Servicios y Turismo		Universidad Marista	CINVESTAV		Colectivo Sinergia A.C	SEMARNAT	Política Comunitaria y Social	CDI
		Grupo de turismo de Cuzamá	Asociación Ganadera Local de Porcicultores de Mérida		INIFAP			PROFEPA	Fomento Turístico	SAGARPA
					UADY CIRHN			CONAGUA	Fomento Económico SSY Indemaya Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología Coordinación Metropolitana de Yucatán Municipios	SEDESOL Salud Economía

En el cuadro siguiente se presentan las actividades que llevan a cabo algunas de las principales agencias que integran COTASMEY en relación con el monitoreo de la calidad del agua, para el año 2013.

Figura III.5).- Dependencias que realizan monitoreos de agua en el Anillo de Cenotes



En la siguiente tabla se observan los parámetros evaluados por las agencias entrevistadas de COTASMEY.

Tabla III.7).- Parámetros evaluados por las dependencias que realizan monitoreo de agua.

Parámetros/Organismos	JAPAY	CONAGUA	SSY	UADY (Julia Pacheco)	UADY (Arturo Graniel)	UADY (Ángel Polanco)
Temperatura	x	x		x	x	x
Temperatura del Agua	x	x		x	x	x
Nivel del agua		x				
Conductividad	x	x		x	x	
Oxido Reducción	x	x		x	x	x
Salinidad		x			x	
Coliformes Totales	x	x			x	x
Coliformes Fecales	x	x			x	x
Sulfatos	x	x		x		
Nitratos	x	x		x		
Plomo		x				
Cadmio		x				
pH	x	x	x	x	x	x
Turbiedad	x	x				
Cloro Residual	x		x			
Nitrogeno Moniacal		x				
Nitritos		x				
Fosforo		x				
Sólidos Disueltos		x		x	x	
Sodio		x		x	x	
Potasio		x		x	x	
Magnesio		x		x	x	
Alcalinidad	x	x				
Dureza Total	x	x				
Dureza de Calcio	x	x				
Dureza de Magnesio	x	x				
Cloruros	x					
Pesticidas Organoclorados					x	x
Pesticidas Organofosforados					x	
Isotópos					x	x

Parámetros Básicos propusetos en base a entresvistas con COTASMEY

Parámetros Complementarios propusetos en base a entresvistas con COTASMEY

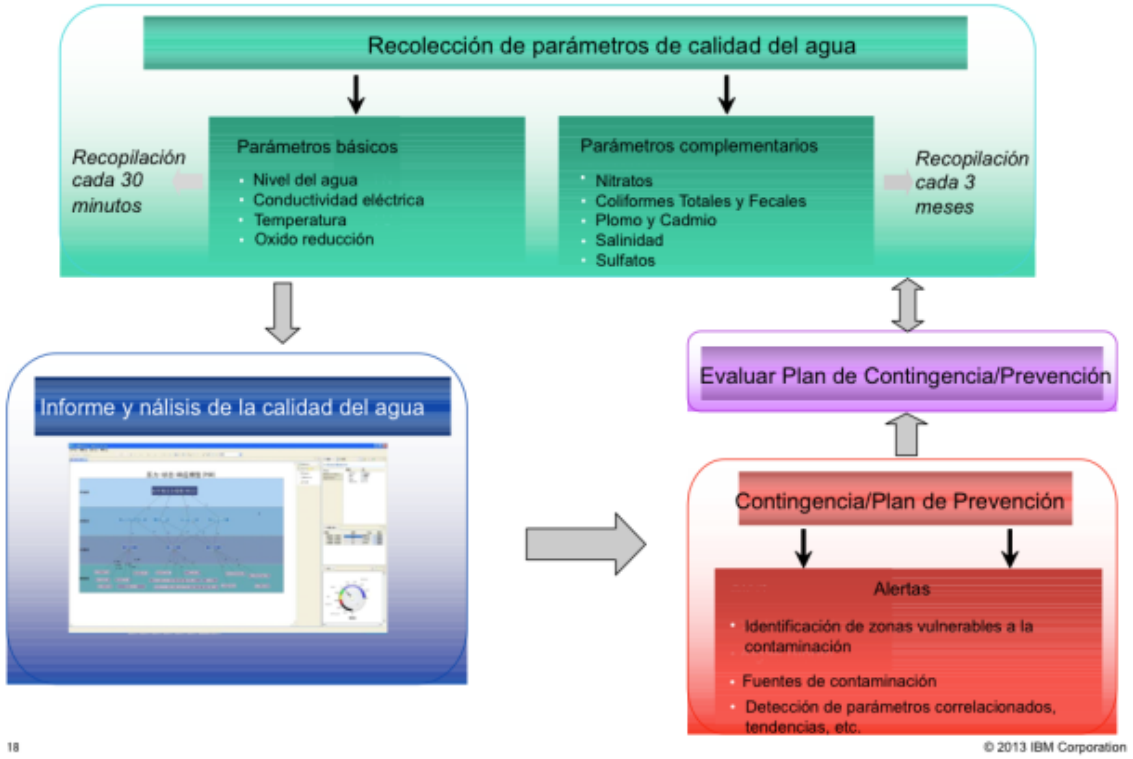
Dentro de los Objetivos Estratégicos de la calidad del agua propuestos por el COTASMEY, están los siguientes:

a).- Políticas de gestión del agua mediante la comprensión del Sistema Hidrológico en Yucatán

1. Evaluar la calidad del agua de uso doméstico, comercial, agrícola e industrial.
2. Evaluar la relación entre la precipitación y el reabastecimiento de agua dulce a los acuíferos y las descargas a las zonas costeras
3. Conocer el proceso intrusión salina de los acuíferos y su vulnerabilidad a la contaminación
4. Desarrollar un sistema de información geográfica para visualizar mapas de importancia para la gestión de la calidad del agua (por ejemplo, cobertura de vegetación, suelos, etc.)

b).- Proceso deseado del monitoreo de la calidad del agua, como se observa en la siguiente figura:

Figura III.6).- Proceso deseado de monitoreo en la zona geohidrológica del anillo de cenotes.



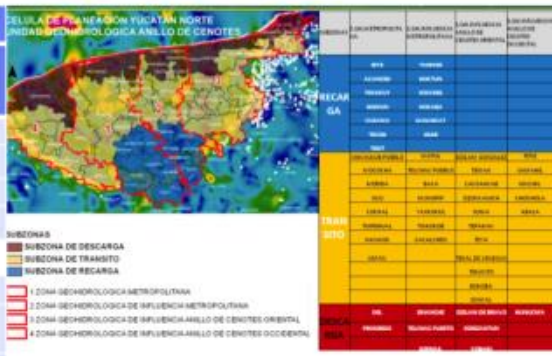
Se propuso en esos talleres el monitoreo de parámetros clave de desempeño (KPI´s por sus siglas en ingles) de la calidad del agua para las áreas prioritarias designadas a través de COTASMEY

Tabla III.8).- Parámetros clave de desempeño de la calidad de agua.

■ Reporte de la Calidad del agua KPI

		Trimestral	Diario	Semanal	Semanal	Trimestral
	KPI	Infiltración (lluvias)	Mareas	Cambios en interfases	Penetración en cuña marina	Contaminación
Parámetros Básicos	Nivel del agua	X	X			
	Conductividad Eléctrica		X	X	X	
	Salinidad			X	X	X
	Reducción Oxido			X	X	X
Parámetros Complementarios	Nitratos	X				X
	Coliformes Totales y Fecales	X				X
	Plomo y Cadmio					X
	Temperatura					X
	Sulfatos					X

■ Calidad del agua KPI por Sub Zonas



Sub Zona uno COTASMEY (región Metropolitana)
Sub Zona dos COTASMEY (área de Influencia Metropolitana)
Sub Zona tres COTASMEY (área de Influencia Este. Dzilam de Bravo)
Sub Zona cuatro COTASMEY (Area de influencia Poniente. Hunucmá)

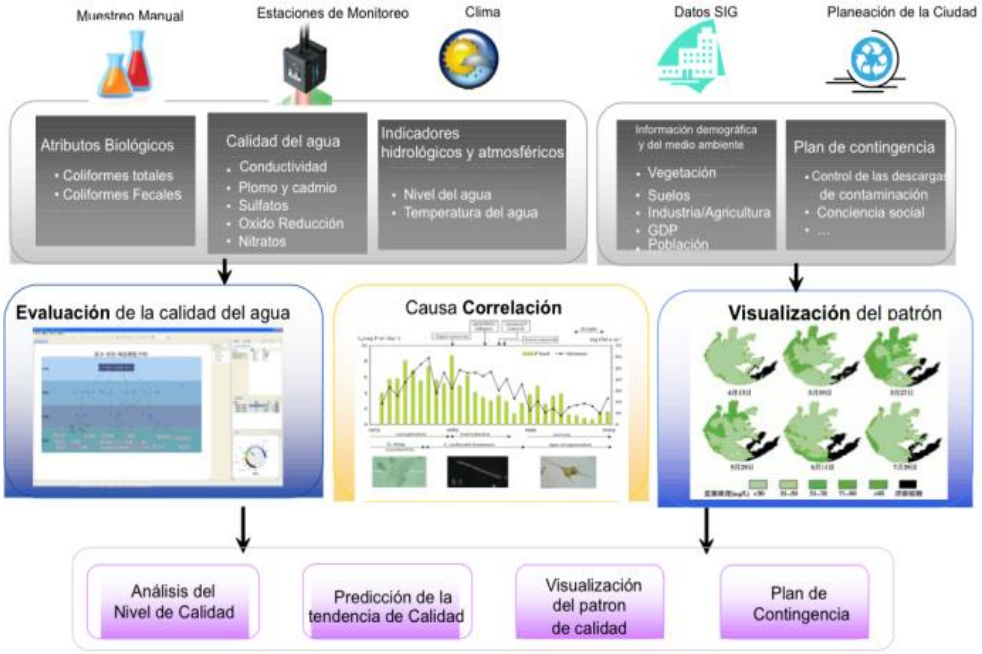
Áreas de Muestreo Específico: Con SIG, se pueden identificar áreas críticas de acuerdo con la información existente (ej. INEGI, CONAGUA, JAPAY).

Parámetros adicionales: en un futuro, parámetros adicionales podrían ser tomados en puntos específicos de muestreo dependiendo en los resultados de análisis previos o en caso de identificarse una zona de riesgo (Ej. pesticidas, metales pesados, etc.)

Se recomendó consolidar los parámetros clave para evaluar la calidad del agua de las zonas prioritarias designadas por COTASMEY. Actualmente las diferentes dependencias se avocan a la evaluación de diferentes parámetros acorde a sus propios objetivos.

Para lograr la funcionalidad del análisis de datos y lograr la calidad de agua deseada, se propone un sistema de monitoreo integral que utilice aplicaciones TI.

Figura III.7,a y b).- Sistema de monitoreo que utilize tecnología de la información.
a)

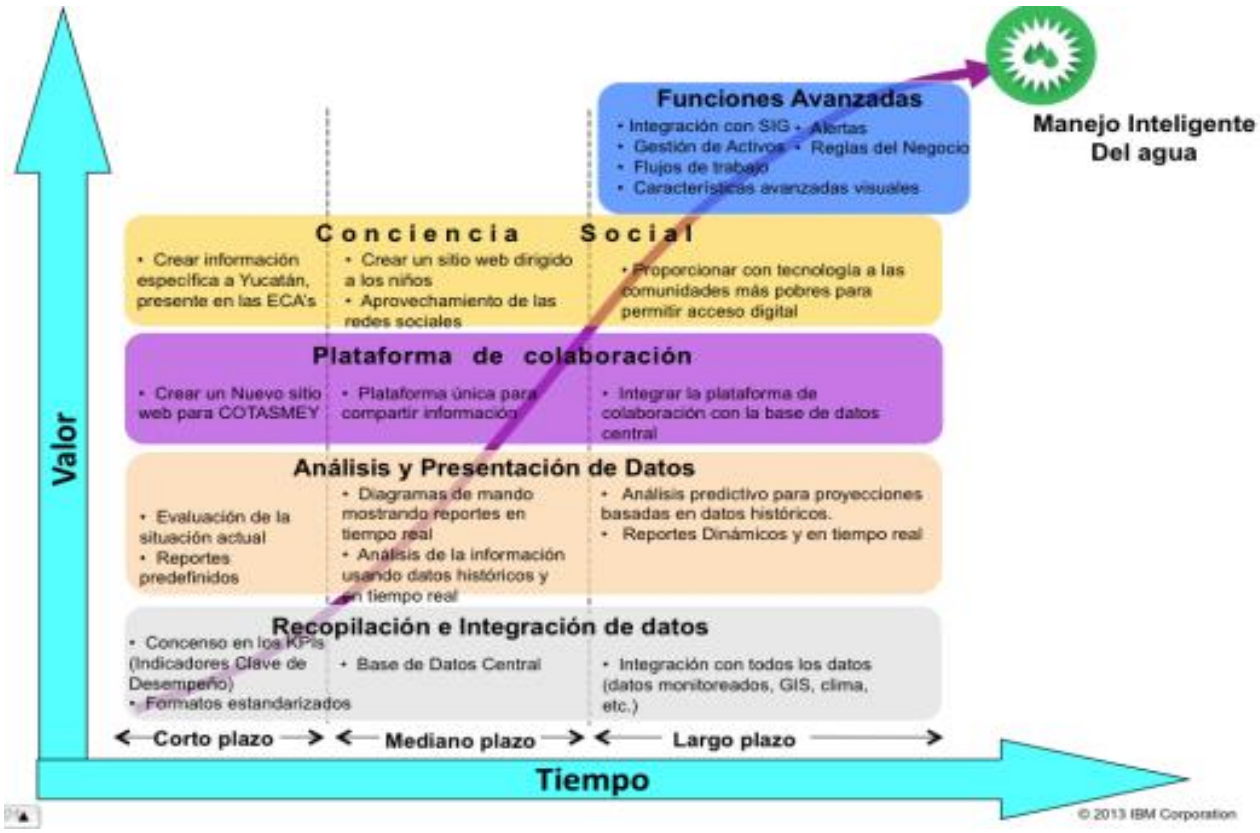


Y que genere un flujo inteligente de información del agua.

b)

Se generaron algunas recomendaciones del plan de acción propuesto con base a las oportunidades de colaboración y trabajo entre organismos de COTASMEY.

Figura III.8).- Recomendaciones al Plan de Acción propuesto para el manejo del agua

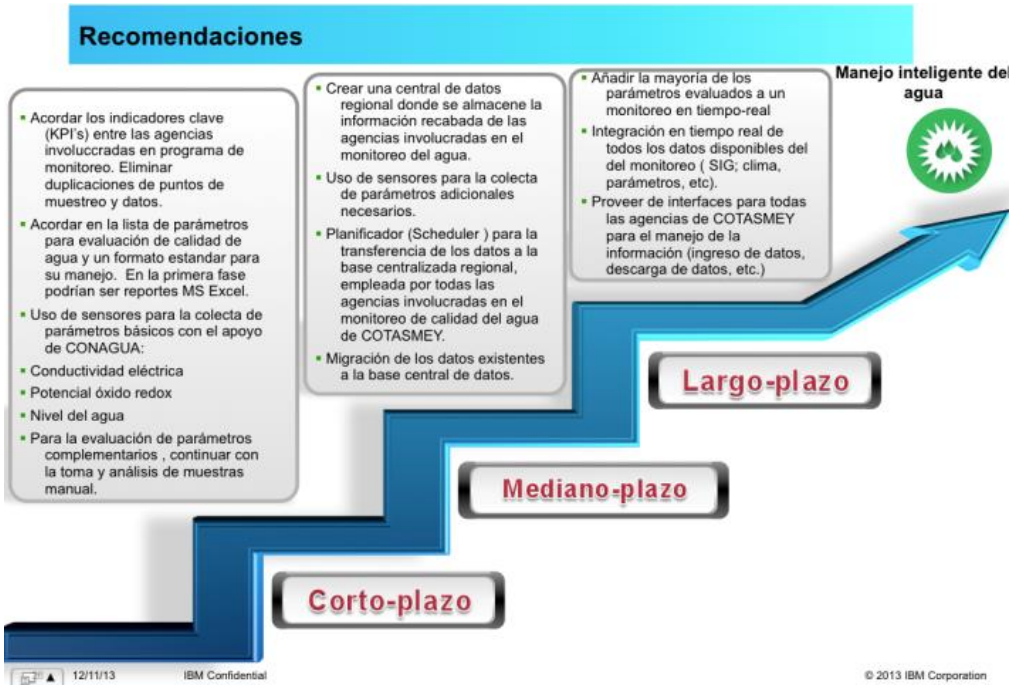


Del mismo modo, se identificaron una serie de retos para lograr el manejo inteligente del agua:

1. Los datos disponibles del monitoreo de la calidad del agua realizada por las diferentes agencias federales, estatales, así como centros de investigación no coinciden en indicadores clave (KPI's) y presentan diversos mecanismos no estandarizados de colecta y almacenamiento de datos.
2. El tiempo tras el cual está disponible la información y resultados acerca del monitoreo de la calidad del agua entre las agencias entrevistadas no es el más adecuado u óptimo.
3. No existe una sola visión de la información sobre la calidad del agua, a pesar de existir una sólida base de información e investigación al respecto.

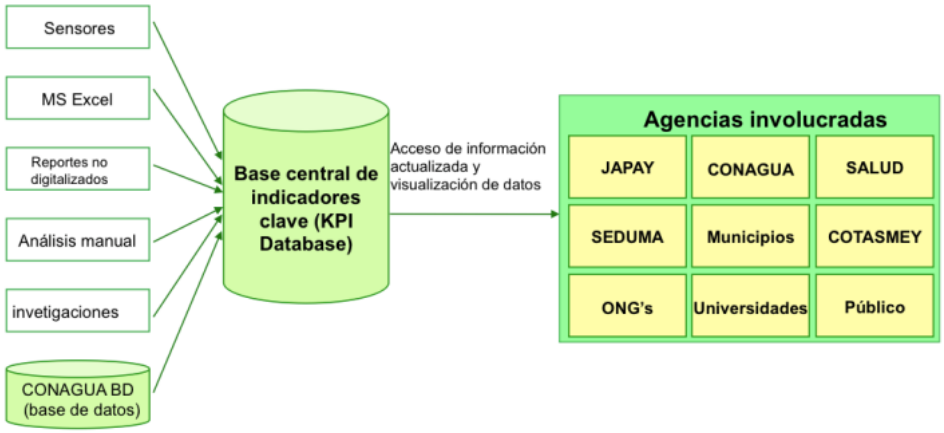
De tal forma que la meta propuesta a alcanzar es el de reunir y utilizar datos en tiempo real de una gran base central de información de monitoreo de la calidad de agua basada en un número establecido de puntos de muestreo. En el esquema siguiente se establecen unas recomendaciones para el manejo inteligente del agua:

Figura III.9).- Recomendaciones para el manejo inteligente del agua.



De aquí que la arquitectura propuesta para el manejo integral de información sobre calidad del agua de COTASMEY era:

Figura III.10).- Arquitectura propuesta para el manejo de la información sobre calidad de agua.



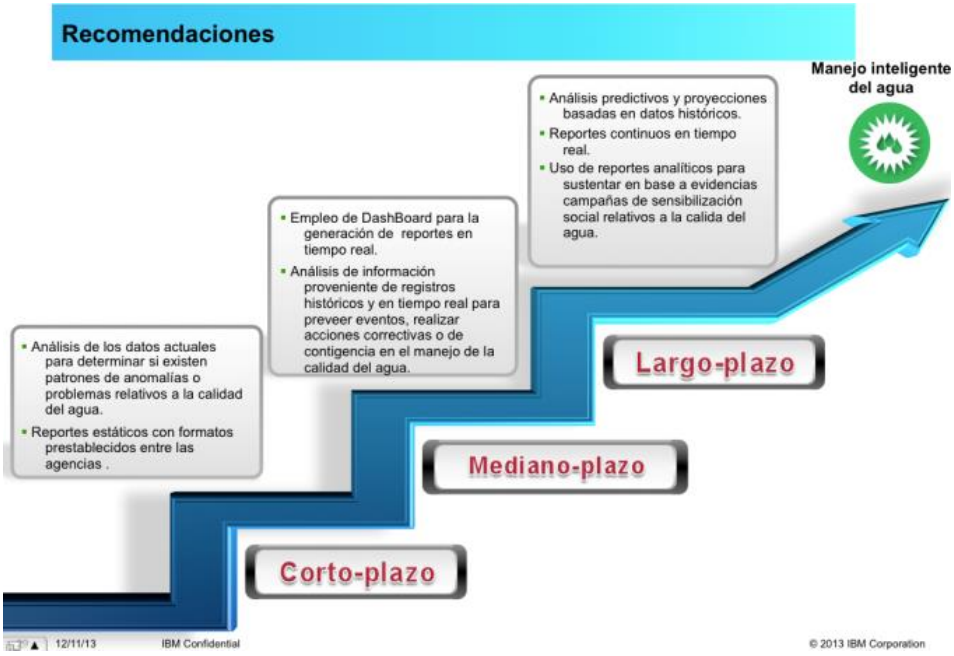
Sin embargo, existen algunos retos detectados para la colecta e integración de datos basada en las entrevistas con algunas de las agencias principales que conforman COTASMEY:

1. Cada organismo tiene su propio nivel de análisis de los parámetros de calidad del agua en función de sus necesidades.
2. La periodicidad de las mediciones varía considerablemente entre agencias.
3. Las herramientas utilizadas para el análisis de datos dependen de los requerimientos de cada organización.

4. Los datos históricos con los que cuentan algunas de las agencias no están disponibles en formato digital. El análisis de esta información histórica con respecto a la información actualizada dificulta o impide en su totalidad la realización de proyecciones.
5. El acceso a los reportes para cada nivel de mando en las agencias que evalúan la calidad del agua no se encuentran disponiblse de manera inmediata.

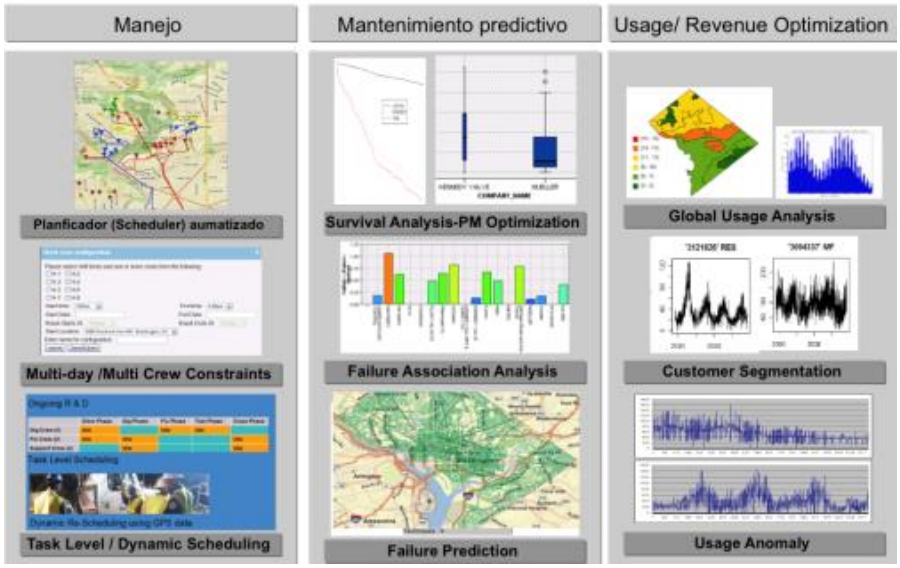
Por lo que se emitieron algunas recomendaciones para el manejo de datos sobre la calidad del agua a través de COTASMEY.

Figura III.11).- Recomendaciones para el manejo de datos de calidad de agua.



La relevancia de la obtención de resultados analíticos tiene que ver con el manejo del agua, aspectos predictivos y de optimización en su uso.

Figura III.12).- Manejo de información y disponibilidad de datos



De igual modo, se detectó ciertos retos y oportunidades del manejo conjunto de datos entre agencias que integran COTASMEY.

1. Intercambio de información entre los miembros es importante, pero también un reto.
2. Cada organización tiene sus propios programas en términos de conservación y calidad del agua.
3. Los miembros pueden beneficiarse de las técnicas de cada uno

Así que las recomendaciones en relación con la colaboración e intercambio de información entre las agencias involucradas en COTASMEY se describen en el esquema siguiente:

Figura III.13).- Recomendaciones sobre colaboración e intercambio de información.

Para lograr una sensibilización social en el tema, se han identificado retos, con base a las entrevistas realizadas a algunas de las principales agencias de COTASMEY, como los siguientes:

1. Existen retos en el desempeño eficaz de los programas que son específicos para la región y la disponibilidad de la información actualizada y local que permitan mejores resultados.
2. La habilidad para llevar a cabo campañas más efectivas puede ser influenciada por el nivel de educación y el nivel socioeconómico de la población, en especial en las comunidades rurales.
3. El Acceso a infraestructura tecnológica (computadoras e Internet) varía dependiendo de la zona o municipios.

De aquí que algunas recomendaciones para el trabajo colaborativo en la sensibilización social se presentan en el esquema siguiente:

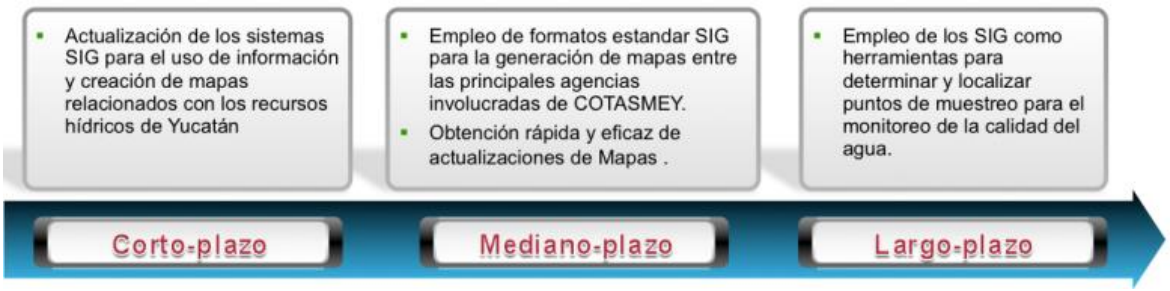
Figura III.14).- Recomendaciones para el trabajo colaborativo.

Por lo que es importante la integración de Sistemas de Información Geográfica en el monitoreo de la calidad del agua. Existen ciertas oportunidades y retos a vences:

1. La mayoría de las agencias entrevistadas de COTASMEY cuentan con sistemas SIG, los cuales son empleados de acuerdo con sus objetivos particulares. (Ej. SEDUMA posee un sistema SIG que emplea principalmente para la elaboración de mapas empleados por distintos departamentos de la agencia, la información que utiliza para la generación de dichos mapas proviene de fuentes como INEGI, CONAGUA, entre otras).

2. El potencial que presentan los sistemas SIG no ha sido explotado, sobre todo en el monitoreo de la calidad del agua, actualmente su uso en este aspecto es limitado entre las agencias entrevistadas.

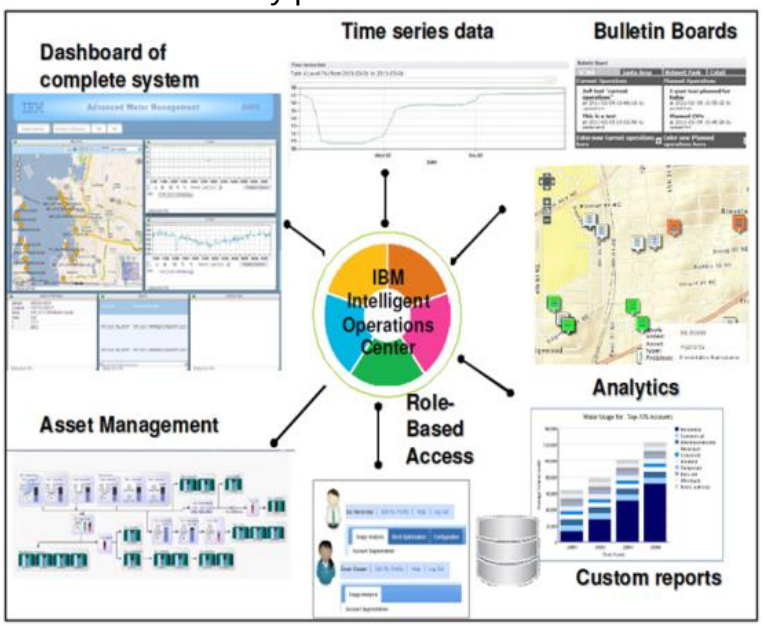
Figura III.15).- Recomendaciones sobre el uso de SIG:



Sin embargo, hay otras características avanzadas identificadas, como el empleo de un mismo dashboard entre las agencias involucradas en el monitoreo en tiempo real de la calidad del agua, lo cual permitiría:

1. Definir las reglas/flujo de trabajo para tomar decisiones basados en información actualizada (live data).
2. Cambiar mecanismos incluyendo flujos de trabajo para tomar acciones basadas en anomalías detectadas
3. Integrar un sistema SIG en una plataforma de colaboración para el monitoreo de la calidad del agua.

Figura III.16).- Sistema de Monitoreo y potencialidades.



De tal forma que en el esquema siguiente se presenta el diagrama final del manejo inteligente del agua desarrollado con el voluntariado de IBM.

Figura III.17).- Diagrama final del manejo inteligente del agua

Siendo el tema de la gobernanza para la gestión hídrica una de las líneas estratégicas del COTASMEY, en el año 2014 se llevó a cabo una cooperación descentralizada con la Región de Pays de la Loire, Francia-Yucatán con el tema de "Fortalecimiento a la gestión del recurso hídrico", con la intención de profundizar en el conocimiento de técnicas y métodos enfocados en:

1) Promover acciones de ordenamiento territorial comunitario con la participación de los usuarios de recursos naturales diferenciados por género y grupos étnicos, e impulsar alianzas intermunicipales en las áreas naturales protegidas para coadyuvar a la gestión integral del territorio y fortalecer mecanismos locales de servicios ambientales y

2) Definir estrategias de sustentabilidad para el desarrollo regional que se impulsen a través del Comité, con énfasis en el saneamiento y el manejo de la biodiversidad, así como desarrollar un programa de monitoreo a tiempo real, que permita entender el comportamiento del acuífero, para la toma de decisiones y la cultura del agua ante la perspectiva de cambio climático.

Como resultado del punto 2, se integró un Grupo de Trabajo Especializado en Monitoreo de la Calidad del Agua (GEM), cuyo objetivo es el de desarrollar un sistema de monitoreo de la calidad del agua en tiempo real.

Este grupo está integrado por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Estado de Yucatán (SEDUMA) hoy Secretaría de Desarrollo Sustentable (SDS), el Laboratorio Estatal de Salud Pública (SSY), la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán (FI-UADY), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. (CICY) y la Unidad de Química Sisal-Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México (UQS-UNAM) y la Empresa INNOVAFORCE.

En la siguiente tabla se presentan las acciones que hasta hoy están realizando las diferentes dependencias en cuanto a mponitoreo de las aguas:

Tabla III.9).- Parámetros, metodología y gestión de datos de monitoreo de la calidad del agua acuerdo cada institución

Dependencia	Parámetros	Metodología	Gestión de los datos
JAPAY	Fisicoquímicos: Ph, alcalinidad, dureza total de calcio y de magnesio, cloruros, sulfatos, nitratos, turbiedad y cloro residual. Bacteriológicos: Coliformes totales y fecales.	40 muestras al día provenientes de plantas de tratamiento para medición de cloro residual 20 muestras para análisis fisicoquímicos y bacteriológicos	Excel (5 años) Documentos impresos (30 años)
CONAGUA	Automáticos: 6 parámetros Manuales:18 parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos. Destacando sólidos disueltos, demanda bioquímica y química de O2.	Se toman muestras de pozos, humedales, cenotes. 324 sitios en toda la península (72 en Yucatán)	Sistemas centralizados de TI. Adaptable a las necesidades de Yucatán

SALUD	Cloro y Ph de manera cotidiana. Análisis posteriores de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos	Controles diarios de calidad en 106 municipios y 2,300 comunidades. Toma 64.000 muestras al año: pozos, cenotes, piscinas, hoteles, etc.	Excel y Bases de Datos (10 años)
UADY- CIR	Dependiendo del proyecto de investigación	80 muestras en 11 municipios en temporada de secas y de lluvia, de la zona Metropolitana	Almacenamiento de datos diferente para cada proyecto
FIQ-UADY	Dependiendo del proyecto de investigación	20 puntos entre Mérida y Progreso, 10 puntos adicionales en la costa	Almacenamiento de datos diferente para cada proyecto
UNAM-SISAL	Dependiendo del proyecto de investigación	Diferentes puntos en el anillo de cenotes y en la costa	Almacenamiento de datos diferente para cada proyecto
CICY	Dependiendo del proyecto de investigación	Diferentes puntos en el anillo de cenotes y en la costa	Almacenamiento de datos diferente para cada proyecto

El GEM, ha desarrollado 2 proyectos que se complementan para integrar una red de monitoreo de la calidad del agua en el Anillo de Cenotes, en la que se implementarán sensores remotos y además tomarán muestras in situ que permitirán complementar los datos obtenidos con lo sensores. Esta información servirá de base al COTASMEY para una toma de decisiones oportuna, de acuerdo con las condiciones reales del acuífero.

El primero de ellos fue presentado por INNOVAFORCE como responsable ante CONACYT en el año 2018 para la Convocatoria YUC-2018-01 del fondo mixto para atender la demanda: “Fortalecimiento de la infraestructura para la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación para el manejo de los recursos hídricos del estado de Yucatán”, con un monto económico aprobado de $5,000,000.00 de pesos

El titulo de la propuesta enviada y aprobada por CONACYT es:

“Sistema de monitoreo e infraestructura tecnológica basada en el Internet de las cosas, para el monitoreo y evaluación de la calidad del agua del acuífero de Yucatán. Número de Propuesta: YUC-2018-01-01-7484.

Este proyecto brinda un avance sustantivo, ya que permite contar con procesos de medición de la calidad de agua automatizados en forma remota, permitiendo de igual modo integrar los registros manuales de medición, esto habilitará la realización de análisis de pertinencia completos sobre el comportamiento del acuífero, su salud y la sostenibilidad.

El proyecto consiste en la identificación y medición de siete variables físicas y químicas del agua de alta pertinencia, que resulten en un primer paso para generar un modelo integral de monitoreo del agua que involucre un grupo multidisciplinario capaz de interpretar, explotar y tomar decisiones con la información y que siendo Yucatán un proyecto piloto, los resultados puedan ser replicados en la península de Yucatán, y el

resto del país, contribuyendo a la mejora en la gestión de la sostenibilidad del acuífero Estatal.

El objetivo general de este proyecto es:

Diseñar e implementar un Sistema de Monitoreo para Evaluar la Calidad del Agua en el estado de Yucatán (SMECA Yucatán) que contribuya al manejo integral y sostenible del acuífero de la entidad, así como a desarrollar los elementos básicos de diseño y planeación para su implementación en toda la península de Yucatán (SMECA peninsular), e implementar un proyecto piloto del SMECA Yucatán que permita verificar su correcto diseño y funcionamiento, para su posterior escalamiento en la entidad, y a nivel peninsular.

Los objetivos específicos son:

1).- Integrar un grupo consultivo para el SMECA, conformado por expertos y actores clave en materia hidrológica de la entidad y la región, que brinde acompañamiento y asesoría al Sujeto de Apoyo durante las diferentes etapas de ejecución del proyecto y en las decisiones clave de diseño, planeación e implementación del Sistema.
2).- Realizar un análisis del estado del arte, que recopile e integre la información existente sobre la situación actual del acuífero del estado de Yucatán.
3).- Caracterizar las principales actividades contaminantes o factores causales de la contaminación del agua en Yucatán y realizar un mapeo georreferenciado de dichas fuentes de contaminación.
4).- Diseñar un Sistema de Monitoreo para Evaluar la Calidad del Agua en el estado de Yucatán (SMECA Yucatán), que incluya el establecimiento de una Red de estaciones de monitoreo y una plataforma informática para captar, analizar, visualizar y compartir la información recabada a través de dichas estaciones, así como el diseño de un proyecto piloto para el SMECA Yucatán.
5).- Elaborar un Plan Estratégico del SMECA Yucatán, que establezca las acciones a tomar en el corto, mediano y largo plazos para garantizar la viabilidad financiera y operativa del Sistema.
6).- Implementar un proyecto piloto del Sistema de Monitoreo para Evaluar la Calidad del Agua en el estado de Yucatán (SMECA Yucatán).
7).- Desarrollar un programa de difusión para dar a conocer e involucrar en el SMECA Yucatán a las comunidades que habitan en la(s) zona(s) prioritaria(s) donde se pretende establecer la Red de estaciones de monitoreo, así como a las instituciones vinculadas al manejo y sostenibilidad del acuífero en dicha(s) zona(s).
8).- Diseñar un anteproyecto del SMECA peninsular, que defina los elementos básicos de diseño y planeación para su posterior implementación.

De igual manera, para complementar este proyecto, en enero del año 2018 se desarrolló una propuesta con la Unidad de Química de Sisal de la UNAM para la Fundación Gonzalo Río Arronte, por un monto total de $7,500,000.00 pesos, con el titulo de

“Acciones para la recuperación y conservación de la Reserva Geohidrológica y área de influencia”.

Mismo que será desarrollado de manera conjunta por la SEDUMA (hoy SDS), SSY, SSY-LESP, FI-UADY, CONAGUA, CICY, UQS-UNAM y CINVESTAV-Unidad Mérida.

Se implementarán sensores de medición en tiempo real que permitan evaluar de manera continua la calidad del agua, organizar y dirigir los esfuerzos de las dependencias y organizaciones que tienen interés en la gestión integrada de la zona geohidrológica del anillo de cenotes y área de influencia oriental del Estado de Yucatán, a efecto de optimizar recursos disponibles, generar acciones de saneamiento ambiental y de prevención social relacionadas a la calidad del agua.

Como resultado se creará un listado de actividades contaminantes y de saneamiento ambiental, que incluya estrategias de recuperación ambiental y prevención social, que considere saberes socioculturales y el desarrollo de por lo menos una política pública que permitan el mejor uso de los recursos de la zona (prevenir y controlar la contaminación) y mejorar la salud humana.

El objetivo general de este proyecto es:

“Generar un programa de saneamiento ambiental e implementar sensores de medición en tiempo real que permitan crear una plataforma interinstitucional y fortalecer la evaluación continua de la calidad del agua (parámetros físico-químicos- organoclorados- metales pesados y biológicos que son dañinos a la salud humana y ambiental) a efecto de organizar y dirigir los esfuerzos de las dependencias que tienen interés en la gestión integrada de la zona geohidrológica del anillo de cenotes y área de influencia oriental del Estado de Yucatán, y optimizar así los recursos disponibles (humanos, tecnológicos y financieros), beneficiando directa o indirectamente a 1,350,627 habitantes (que representan el 69% de la población y que consume el 41% del agua de todo el Estado).

Los objetivos específicos son:

1. Realizar el inventario de las actividades que generan contaminación puntual y difusa (sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, aguas residuales y lodos de fosas sépticas o sumideros, granjas porcícolas y avícolas, aguas residuales de maquiladoras y de molinos de nixtamal, así como zonas agrícolas y ganaderas que utilizan agroquímicos (pesticidas, herbicidas y fertilizantes químicos).
2. Implementar unidades y sensores de monitoreo (físico-químicos) de tiempo real, en tres transectos, a efecto de llevar un monitoreo a largo plazo y hacer eficiente el uso de recursos a lo largo del tiempo y generar estrategias de atención.
3. Obtener muestras de agua de manera periódica (cubriendo estacionalidad) para identificar elementos como nitratos, fosfatos y silicatos, así como organoclorados, metales pesados, y microorganismos (incluyendo coliformes fecales y enterobacterias) para hacer el comparativo con los sensores, con la finalidad de incrementar las zonas de monitoreo por sensor a largo plazo; se considerarán cenotes, pozos de abastecimiento de agua potable, pozos someros, manantiales y mar, en la Reserva Geohidrológica y zona de influencia oriental.
4. Generar estrategias para control y prevención de la contaminación del acuífero, incluyendo una política pública.

El presupuesto total de este proyecto es de $25,858,180.00 pesos, que se unen a los $5,000,000.00 del fondo Mixto CONACYT para un gran total de $30,858,180.00 pesos.

Las organizaciones que conforman la contraparte son:

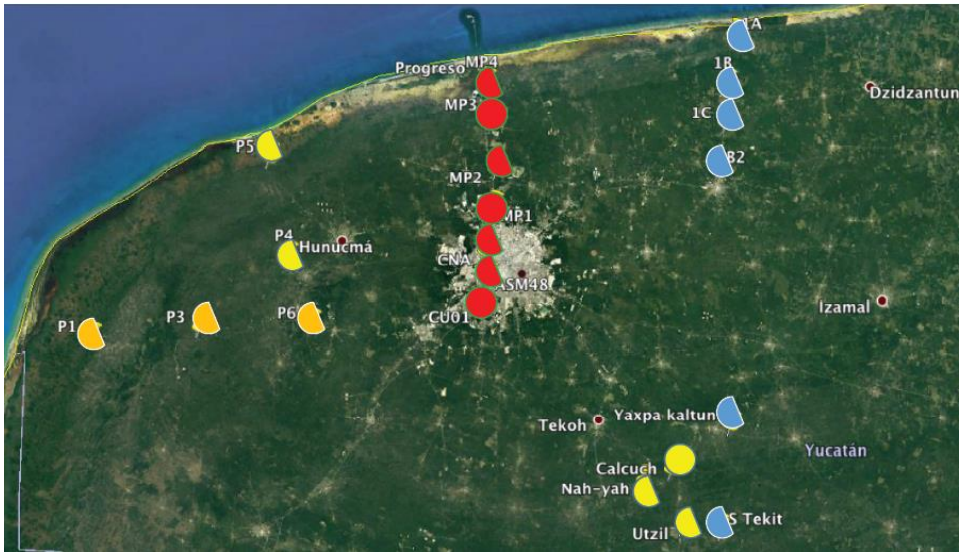
Gobierno del Estado de Yucatán (GEY).
Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del estado de Yucatán (SEDUMA).
Laboratorio Estatal de Salud Pública (SSY).
Servicios de Salud de Yucatán (SSY-LESP).
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán (FI-UADY).
Comisión Nacional Agua (CONAGUA).
Centro de Investigación Científica de Yucatán AC (CICY).
Unidad de Química Sisal-Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México (UQS-UNAM).
Comité Técnico de Aguas Subterráneas de la Zona Metropolitana del Estado de Yucatán (COTASMEY).

Tabla III.10).- Aportación de las contrapartes

Institución	Monto a aportar	Porcentaje del presupuesto total
Gobierno del Estado	$5,990,180	23
CONAGUA	$2,568,000	10
UQS-UNAM	$2,500,000	10
CICY	$1,740,000	7
FI-UADY	$1,720,000	7
SSY-LSPY	$1,200,000	5
SSY	$900,000	3
SEDUMA	$900,000	3
COTASMEY	$840,000	3
CINVESTAV	$180,000	0.7
Total	**$18,538,180**	**71.7**

Los sitios donde se prevé colocar el sistema de monitoreo son, en color rojo los sitios seleccionados en el proyecto SMECA de INNOVAFORCE con fondos CONACYT y en color azul y amarillo el proyecto de la UNAM con fondos de la Fundación Gonzalo Río Arronte.

Figura III.18).- Sitios posibles para el monitoreo de agua en la zona geohidrológica del anillo de acenotes.



Los esquemas de montaje del sistema de monitoreo se presentan en la siguiente figura, en la izquierda se observa el montaje en el exterior y sobre un pozo y en la derecha se observa dentro de un cenote.

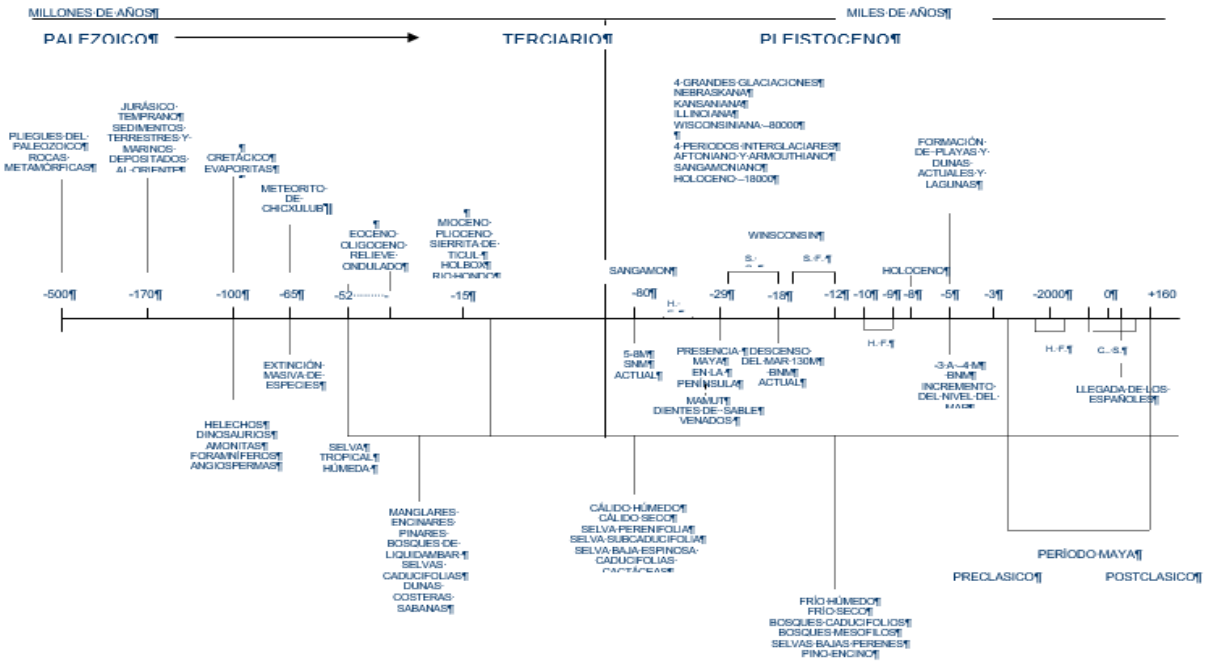
Figura III.19).- Esquemas de montaje del sistema de monitoreo.

IV).- CARACTERISTICAS DE LA ZONA GEOHIDROLÓGICA DEL ANILLO DE CENOTES

IV.1).- Historia Geológica

se procedió a una revisión del origen paleo-hidrogeológico de la Península de Yucatán a través de diversas fuentes bibliográficas para determinar con mayor profundidad ciertas particularidades de sus paisajes. La región de estudio tiene una ecología muy compleja por la presencia fundamental de diferentes tipos de paisajes, cuyas dinámicas hidrológicas difieren entre sí y sin embargo están interconectadas. Es de especial interés tener en cuenta el origen y las transformaciones de este complejo territorial para conocer con mayor profundidad y precisión ciertas particularidades de su ecología, desde el nivel regional hasta el local, y muy en especial las zonas geohidrológicas de mayor recarga y descarga de flujos subterráneos, como una evidencia de resultantes de intercambios de energía y materia que en estos tipos de geosistemas tienen lugar.

Figura IV.1).- Origen paleohidrogeológico de Yucatán.



En la región peninsular, hace aproximadamente 170 millones de años, durante el jurásico temprano, los sedimentos terrestres y de mares someros fueron depositados en el flanco occidental de un complejo topográfico metamórfico que se elevó en la parte noreste de la plataforma yucateca. Estas rocas metamórficas son parte de la zona de pliegues del paleozoico, que datan de unos 500 millones de años atrás. Se asume que la linea de costa del período jurásico se orientaba hacia el nor-noreste (Marshall et al, 1974).

En el cretácico superior, hace aproximadamente 100 millones de años, comenzó la extensa depositación de carbonatos y evaporitas (anhidritas yesíferas y sal) que continua hasta nuestros días en la plataforma yucateca. Estas últimas se desalojaron hacia el sur, desde las regiones de Norteamérica en el Triásico hasta casi su posición actual durante el Cretácico (Schwarzbach, 1962), mezclándose con las calizas del Paleoceno-Eoceno en la porción central de la Península, mientras que en la porción septentrional (Chicxulub), las evaporitas son sustituidas por material ígneo (vidrio andesitico, magnétitas) sobre la

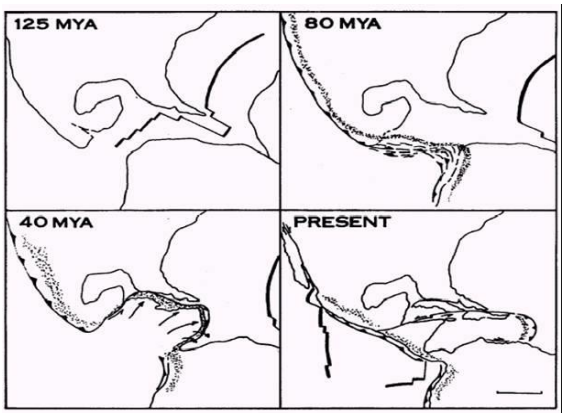
superficie del Cretácico medio al superior (López Ramos, 1979). Estas rocas ígneas son las responsables de los máximos gravimétricos y magnetométricos al Norte de Mérida. Al Suroeste de Mérida estas andesitas sobreyacen a las evaporitas (anhídritas) Cretácicas. Debido a que la parte norte de la plataforma se hundía lentamente, el nivel del mar continuaba una transgresión hacia el este, las aguas de los mares someros se dispersaron practicamente sobre toda la plataforma y se desarrollo un área muy extensa de circulación restringida.

Wilson (1974) reporta que las evaporitas del cretácico temprano se extienden desde el Petén en Guatemala, sobre Yucatán y posiblemente hacia la parte norte de Veracruz. Durante la última etapa del cretácico temprano, se desarrollaron arrecifes sobre el margen oriental y norte de la península. En el cretácico tardío se presentó una elevación en la región centro-oriental de la plataforma y Marshall et al (1974), sugieren que durante esta época las fallas que corrian paralelas al flanco oriental se encontraban activas y controlaban los plegamentos y fracturas a lo largo de la margen oriental de a Península de Yucatán. En esta época se formó una zona de agua profunda fuera de la plataforma somera**.**

Durante el Paleozoico, el hemisferio norte presentaba un clima tropical y subtropical (mientras que en hemisferio sur las condiciones climaticas eran frías con extensos glaciares), el ambiente era caluroso; durante el periodo del Carbonifero, la precipitación era abundante, sin embargo, al dominar el Pérmico las condiciones fueron aparentemente más áridas (Schwarzbach, 1962).

Durante toda la era Mesozoica se mantuvo un clima caluroso en gran parte del planeta. No se reconocen glaciaciones y las regiones polares se constituyeron como áreas cálidas con una gran riqueza de biota, conformando las primeras provincias boreales del Jurásico Superior y Cretácico.

Figura IV.2).- Características de la Península de Yucatán durante el Paleozoico y Mesozoico.



Urrutia-Fucugauchi, J. y colaboradores, en el año 2011, realizaron una síntesis del conocimiento generado sobre el Cráter de Chicxulub, mencionan que el anillo de cenotes está relacionado con el Cráter de Chicxulub, el cual es parte de un selecto grupo de estructuras geológicas que marcan cambios mayores en la evolución del planeta y en este caso de la evolución de la vida.

Los efectos del impacto de un aerolito sobre la superficie terrestre ocasionaron cambios climáticos y ambientales que están relacionados con la extinción masiva de organismos a

fines del Cretácico, y marcan la frontera entre las eras del Mesozoico y Cenozoico. El Cráter de Chicxulub es uno de tres cráteres de más de 100 km de diámetro y con morfología multi - anillo en el registro terrestre, y constituye un laboratorio natural para investigar la formación de cráteres y efectos de impactos en otros cuerpos del Sistema Solar.

El cráter se formó hace unos 65 millones de años y está cubierto por rocas más jóvenes, que han permitido protegerle de la erosión. El cráter conserva buena parte de las estructuras y los depósitos de eyecta, que se extienden en la península y plataforma marina. Diversos procesos geológicos superficiales están relacionados con el cráter, entre ellos los patrones de fracturamientos, circulación de aguas subterráneas y desarrollo de estructuras kársticas, incluyendo el anillo de cenotes.

Los primeros indicios de este cráter fueron referidos en los trabajos realizados hace más de 30 años por el investigador Luis Álvarez y colaboradores, quienes postularon que la extinción masiva de organismos sucedida en la frontera del periodo Cretácico y Paleógeno, hace más de 65 millones de años, se relacionaba con el impacto de un aerolito en la superficie terrestre. Dichos investigadores se percataron de que en esta época de transición (K-Pg), los sedimentos encontrados en lugares como Nueva Zelanda, Dinamarca e Italia mostraban gran cantidad de iridio (metal poco abundante en la superficie terrestre), pero en mucha mayor cantidad en Haití, lo que motivó a que las investigaciones se dirigieran principalmente hacia el Caribe. El iridio podría ser expelido por fuertes erupciones volcánicas como las ocurridas en Hawai, sin embargo, en 1984 se hallaron pruebas de partículas de cuarzo comprimidas o chocadas por un gigantesco impacto; así, el vulcanismo se ha eliminado como posibilidad causante de la capa de iridio y de las extinciones masivas ocurridas en esta transición K-Pg.

Los estudios y perforaciones realizadas por PEMEX en sus prospecciones petroleras en el Estado de Yucatán han permitido realizar análisis petrográficos del subsuelo y rescatar evidencias de cuarzo impactado en las cercanías de Ticul, a 303 metros bajo la superficie. En las figuras siguientes se observa los sitios más alejados y cercanos al Cráter de Chicxulub que muestran este tipo de sedimentos, así como las columnas estratigráficas representativas de la frontera entre el Cretácico y el Paleógeno (K/Pg).

Figura IV.3).- Distribución espacial de los muestreos de sedimentos a nivel mundial

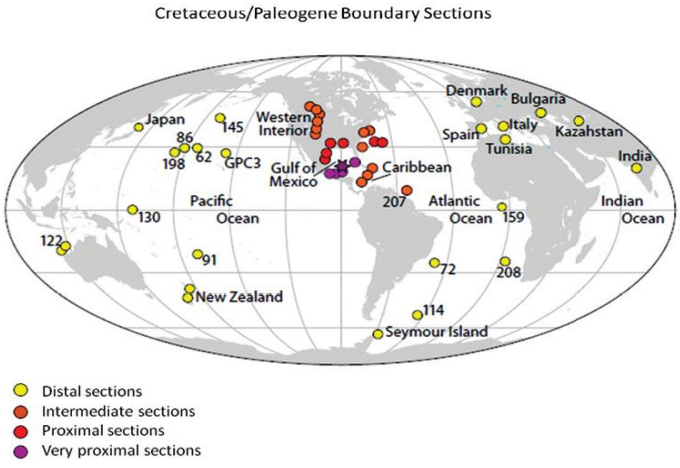
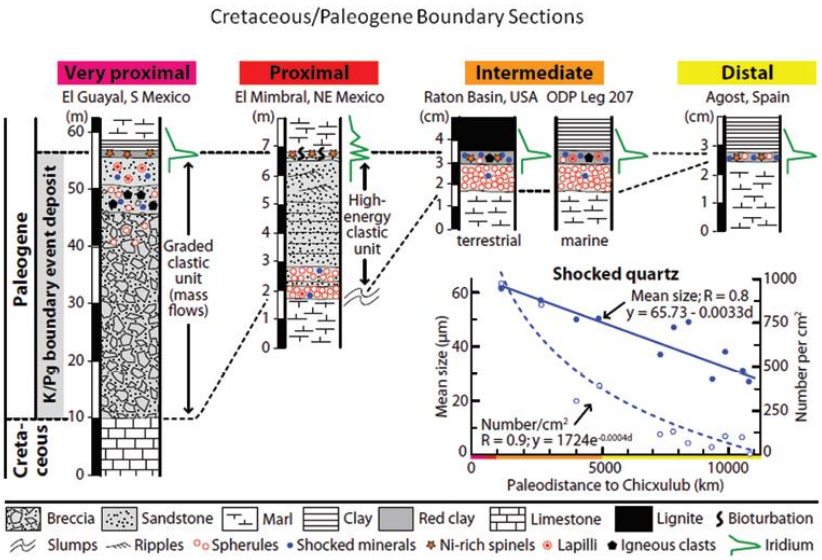
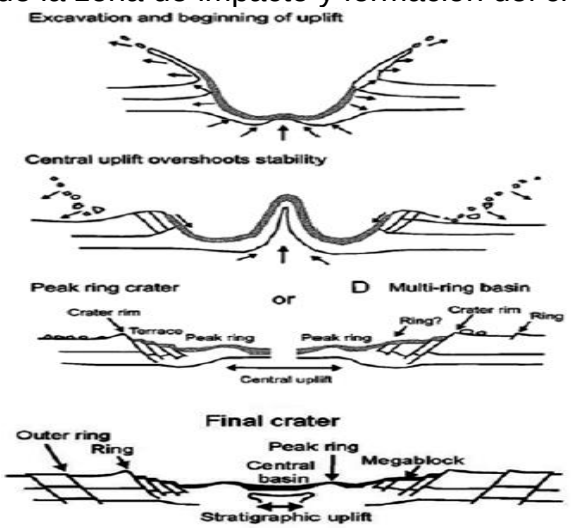


Figura IV.4).- Características estratigráficas de los muestreos de sedimentos a nivel mundial



El impacto de un cuerpo, con un diámetro de aproximadamente 10 km, causaría un cráter transitorio (ya que se rellenaría rápidamente), aunque en el momento del impacto, y a una velocidad de 40 km por segundo, el meteorito pudo abrir una oquedad de aproximadamente 9 km de profundidad (aunque su efecto pudiera sentirse hasta cerca de 25 Km de profundidad en fracción de segundos, afectando toda la corteza terrestre), y posteriormente una elevación de la corteza baja y la formación del cráter en los siguientes segundos. La temperatura que tal choque produciría sería de 20,000 grados Kelvin, cuatro veces la temperatura del sol. Este impacto generaría una energía cinética de 100 millones de megatones. Poco después del impacto, la cortina de eyecta (participio latino que significa "cosas expelidas") sería de unos 40 km en la atmósfera. A los dos minutos del impacto, habrían sido lanzados al aire unos 800,000 kilómetros cúbicos de roca. Los eyecta de mayor tamaño no tardarían mucho en reingresar a la superficie terrestre, como las tectitas y micro tectitas (material fundido), sin embargo, las partículas de polvo pueden quedar suspendidas por mayor tiempo y formar con el tiempo la capa arcillosa que se ha observado en varios lugares entre el Cretácico y el Paleógeno. La energía disipada y la deformación de la corteza generarían ondas sísmicas viajando por toda la Tierra, resultando en un intenso fracturamiento y deformación en el sitio de impacto.

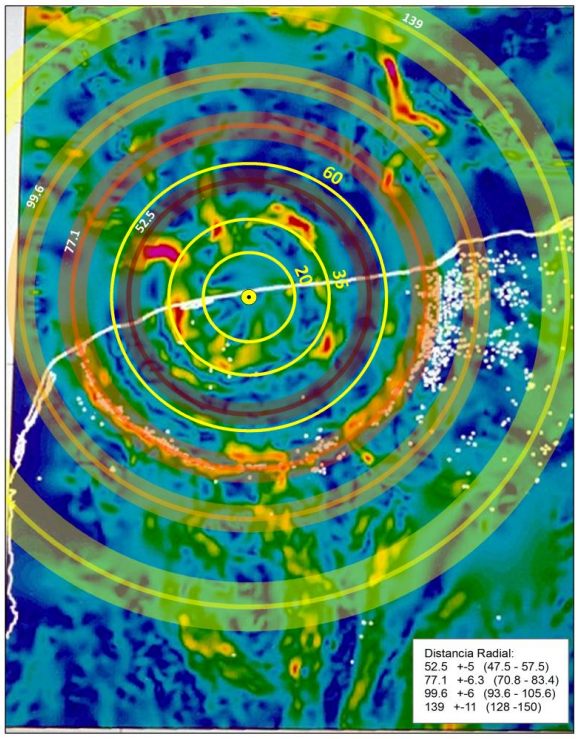
Figura IV.5).- Evolución de la zona de impacto y formación del cráter



Los efectos que acarrearía lo anterior serían que el polvo suspendido durante meses o años bloquearía gran parte de la luz solar y suspendería en gran medida la fotosíntesis, desapareciendo la cadena trófica; el polvo y la oscuridad enfriarían el clima en todo el mundo y de manera particular, el interior de los continentes; el impacto en ambientes marinos producirían una copiosa columna de agua y vapor que a la larga recalentarían la atmósfera incrementado el efecto invernadero y acidificación de los océanos; se formaría ácido nítrico por calentamiento produciendo lluvias ácidas. "Escenas dantescas de una lluvia ácida quemando la piel y los tejidos en medio de una oscuridad, polvo y la caída de grandes fragmentos rocosos antes lanzados al exterior", como lo menciona el investigador Penfield.

Mediante investigaciones magnéticas, gravimétricas y estratigráficas se ha determinado que el cráter formado tiene más de 180 km de diámetro y forma un círculo, cuya mitad está actualmente sobre el continente y la otra sobre la plataforma marina continental, cubierta por las aguas del Golfo de México, su centro geométrico se encuentra cercano a la línea costera de Chicxulub Puerto. El cráter se encuentra cubierto por sedimentos carbonatados del Paleógeno y Cuaternario (desde el Paleoceno hasta el Holoceno).

Figura IV.6).- Patrón de anomalías concéntricas semicirculares que definen una estructura multianillos del Cráter de Chicxulub.

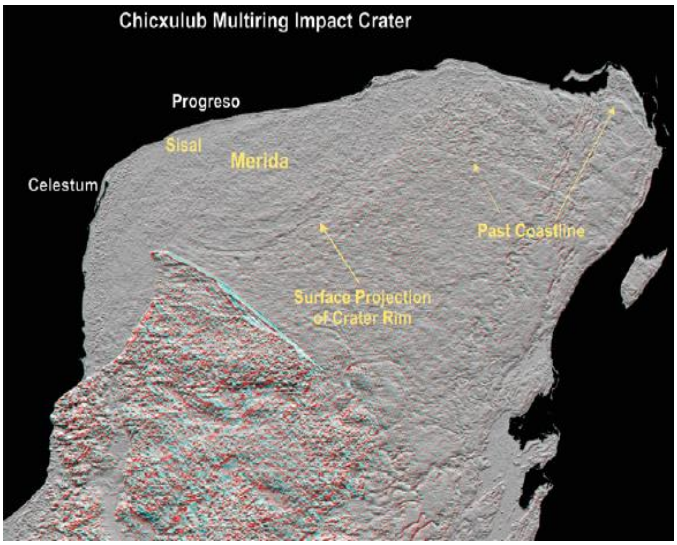


Las anomalías gravitacionales de Bouguer de los estudios geofísicos, muestran un patrón de anomalías concéntricas semicirculares amplias bien definidas por arriba de los 30 mGals, con máximo en un diámetro central de 40 km y dos mínimos a casi 70 km y 120 km de diámetro. Las anomalías semicirculares concéntricas fueron inferidas a 52.5 ± 5 km, 77.1 ± 6.3 km, 99.6 ±km y 139 ± 11 km de distancia radial, los cuales definen una estructura multi - anillos con la cumbre del anillo central limitado por el anillo 1, los anillos 2 y 3 se interpretan como los límites interior y exterior de la pared transicional del cráter, con su depresión externa al borde del cráter dado por el anillo 4.

Mediante estudios del gradiente horizontal se calculó el centro en aproximadamente 21.29º N y 89.52º W, El ángulo de impacto y su trayectoria muestran una dirección NW, de forma oblicua y se ha relacionado con los efectos ambientales y la distribución de los eyecta y cuarzo impactado en Norteamérica.

No existen en la Península de Yucatán afloramientos superficiales de litologías de impacto, sólo la presencia de la estructura enterrada se indica por una depresión topográfica semicircular de baja amplitud que puede observarse mediante imágenes de satélite con radar interferométrico de alta resolución. Esta ligera característica topográfica coincide con uno de los más conspicuos aspectos kársticos reconocidos en la Península de Yucatán, el arreglo semicircular de cenotes referidos como el anillo de cenotes. El borde estructural del cráter enterrado se marca en superficie como resultado de la compactación diferencial de casi 5 m de las brechas y fracturamiento dentro del cráter y favorecido por los procesos de disolución a través de las fracturas y el terreno carbonatado. Nótese también las líneas de costa fósiles que reflejan los cambios pasados del nivel medio del mar. El movimiento de masa, generado por la compactación, se conjuga con los planos de debilidad que representan las fallas en los bordes del cráter generando, a su vez, un nuevo de sistema fallas normales. Este nuevo sistema de fallas normales alcanza la superficie actual.

Figura IV.7).- Borde estructural del cráter y compactación diferencial del terreno.

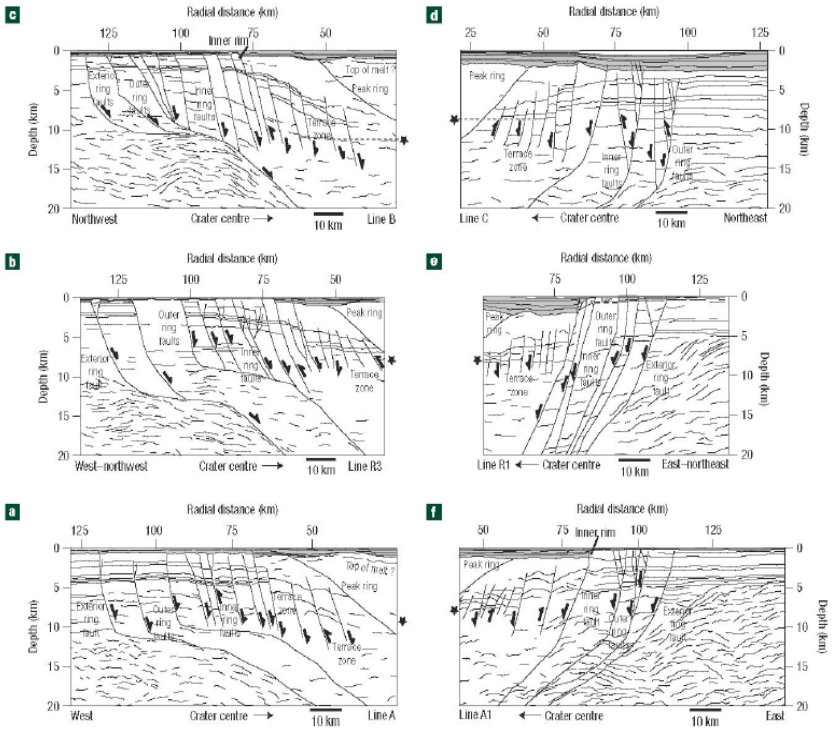


La estratigrafía sísmica reportada hace evidente la presencia de grandes fallas normales, las cuales están directamente asociadas al anillo de cenotes, al proveer una porosidad y permeabilidad secundaria que les confieren importantes atributos hidrogeológicos como transmisividad (en el orden de los m^2/s) y conductividad (en el orden de los m/s). La interpretación estructural de las secciones sísmicas de la porción norte del cráter de Chicxulub muestra que el intenso fallamiento normal, representa una zona de alta permeabilidad que favorecería la circulación de agua subterránea.

El modelo conceptual de cómo este mecanismo de compactación de la secuencia sedimentaria del Cenozoico, al interior del cráter, dio origen al anillo de cenotes indica que el fallamiento secundario, asociado a la compactación, genera porosidad secundaria, dando origen al sistema cárstico actual. En una siguiente fase, debido a la acción corrosiva de la circulación de agua acidificada con ácido carbónico, la disolución del

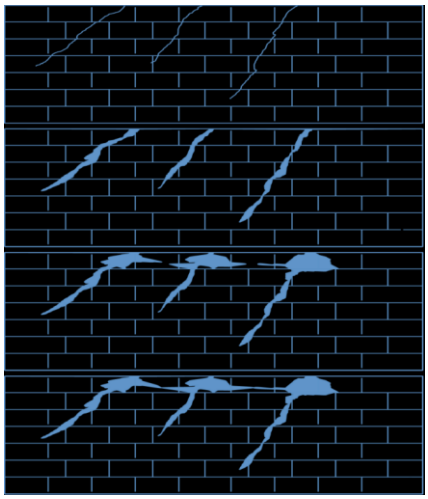
carbonato de las calizas se acelera dando origen a grietas y cuevas de disolución de mayor tamaño. Eventualmente, la disolución de la caliza se acelera por la presencia de la intrusión salina.

Figura IV.8).- Modelo conceptual del origen del anillo de cenotes.



Cabe destacar que la acción de la intrusión salina juega un papel primordial, ya que, la disolución de la caliza se presenta en un plano horizontal, y no vertical como se hubiese esperado, se ha asociado este fenómeno a la acción horizontal de la interfase salina, producto de la acción de mareas astronómicas y a la estratificación del agua. Durante este proceso, la Península de Yucatán experimentó periodos de ascenso y descenso del nivel del mar, como lo evidencia la presencia de espeleotemas en algunas cavernas inundadas en la actualidad. Estos periodos de ascenso del nivel del mar, probablemente, también jugaron un papel importante en la formación del anillo de cenotes.

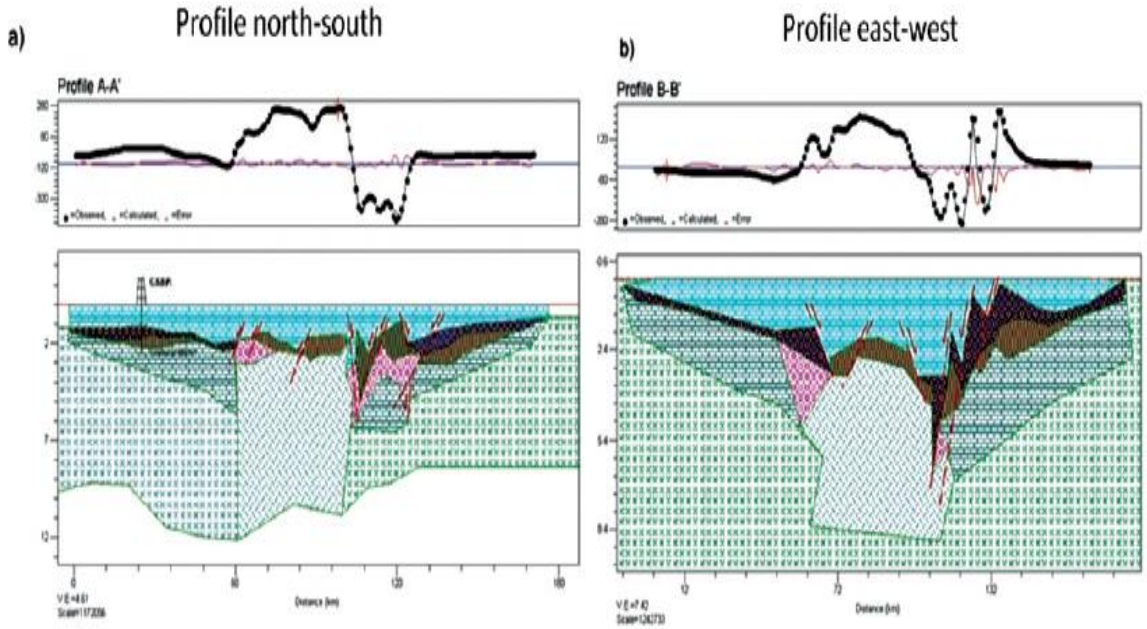
Figura IV.9).- Generación de porosidad secundaria en el sistema cárstico.



Los análisis de los perfiles de reflexión sísmica marina documentan una significativa variación en los fallamientos y estructura del cráter. El anillo y las fallas de la terraza varían espacialmente. El anillo elevado esta aproximadamente 400 m más abajo en el sector occidental que en el sector oriental. La zona de la terraza es más profunda en el occidente con un declive de más de 2 km de profundidad en el sector noroccidental.

La asimetría estructural en el levantamiento central, la cumbre del anillo, la capa fundida, secuencia de brechas, sedimentos cretácicos y fallamientos son resultado de la estructura de la corteza en el sitio pre-impacto. En particular la variabilidad de la estructura de la corteza y la profundidad del agua a lo largo de la plataforma del Cretácico, mucho más profunda en el sector nororiental con la base de la secuencia Mesozoica yaciendo a una profundidad de 3 – 3.5 m y la profundidad del agua a 1.5 km. En la figura del cráter, a la derecha se observa el perfil de norte a sur y en la izquierda de este a oeste.

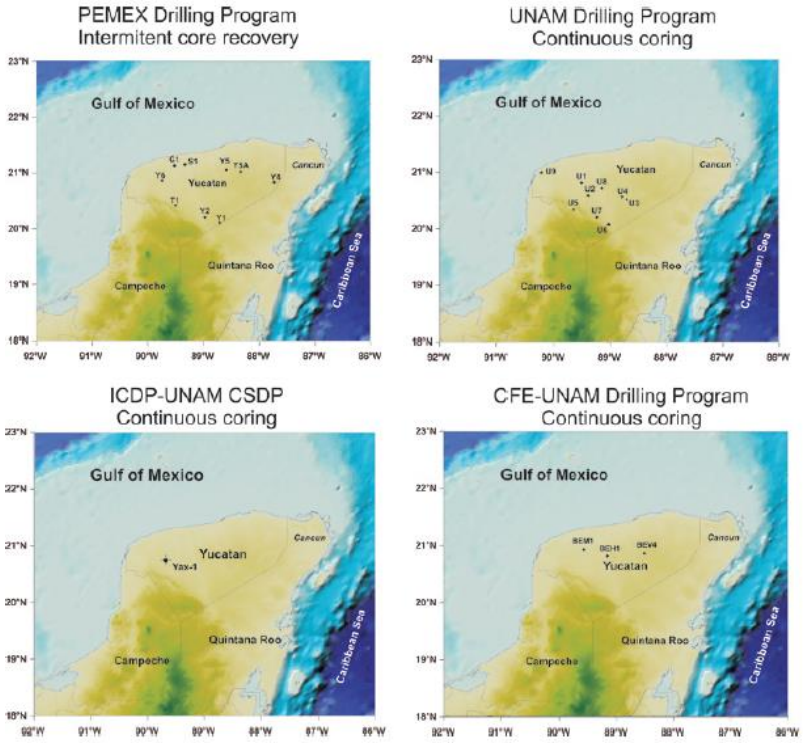
Figura IV.10).- Asimetría estructural derivada de la estructura de la corteza preimpacto



Los diversos programas de perforaciones, como los realizados por PEMEX, como parte de sus programas de exploración, así como los del Programa Chicxulub de la UNAM, el Proyecto Científico de Perforación “Chicxulub” y el Programa de exploración de la Comisión Federal de Electricidad, han permitido conocer a profundidad la estratigrafía dentro y fuera del Cráter de Chicxulub de las secuencias del Mesozoico y Cenozoico.

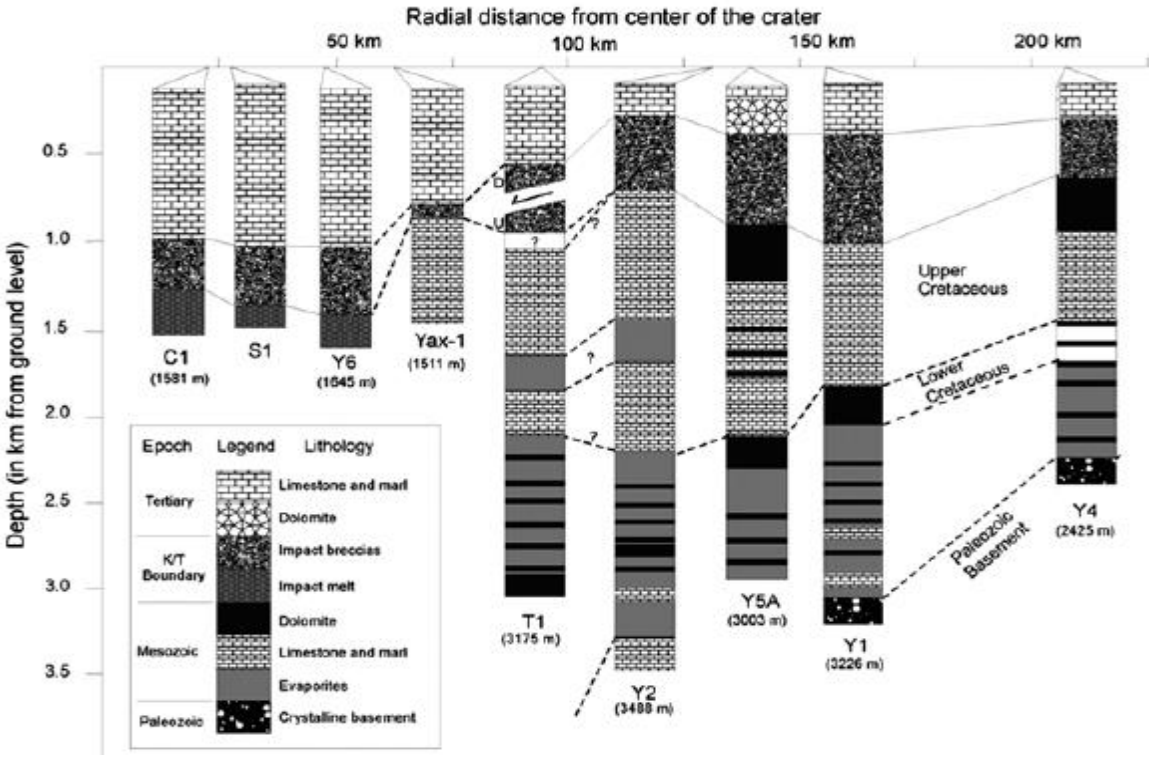
Con PEMEX se documentó la ocurrencia de las rocas con textura ígnea, que corresponden a la secuencia de brechas y material fundido, en el área gravitacional concéntrica y las anomalías magnéticas, a profundidades que van de 1,500 m a 3,488 m. La secuencia de brechas y material fundido, que presenta un espesor de aproximadamente 250 m, se encuentra a profundidades de 1.0 a 1.1 km al interior del cráter. Esta secuencia de brechas y material fundido que se observa fuera del cráter se presenta con espesores de 400 a 600 m. La sección Cretácica formada por secuencias de roca caliza y dolomitas, incluyendo secuencias anchas de evaporitas y anhidritas, con un ancho variable de 2 a 2.5 km. En el caso de la UNAM, con perforaciones dentro y fuera del cráter, muestran los carbonatos del Paleógeno haciendo contacto con las brechas de impacto a profundidades que varían de 222 a 332 m.

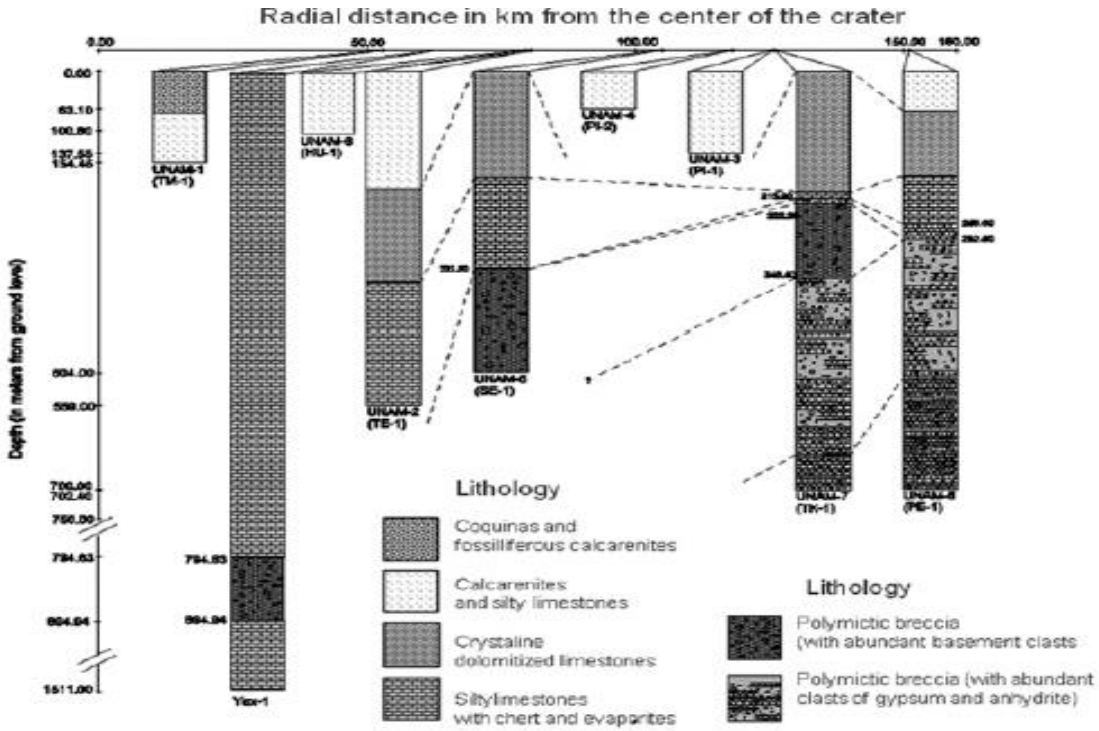
Figura IV.11).- Programa de perforaciones relizadas por diversas dependencias



En la figura siguiente se muestran las columnas esquemáticas de las perforaciones de PEMEX (arriba) y de la UNAM (abajo), mostrando las principales divisiones litológicas (Se incluye el pozo Yaxcopoil – 1 de la UNAM).

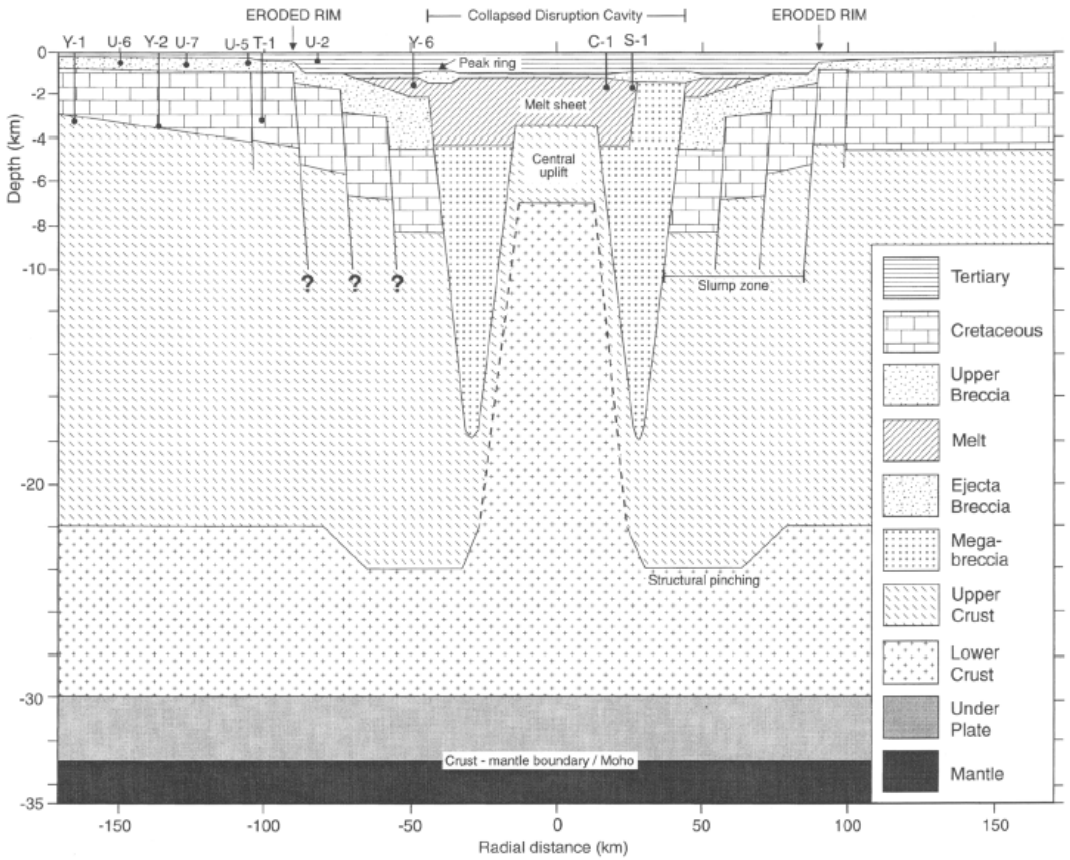
Figura IV.12).- Columnas esquemáticas de las perforaciones realizadas por las diferentes dependencias.





En la figura siguiente se muestra el modelo estructural del Cráter de Chicxulub, exagerando la línea vertical y mostrando los pozos S-I, Sacapuc; C-I, Chicxulub-1; Y-6, Yucatan-6; U-2, UNAM;-2; T-I, Ticul-I; U-5, UNAM-5; U-7, UNAM-7; Y-2, Yucatán-2; U-6, UNAM-6; Y-1, Yucatán-1.

Figura IV.13).- Modelo estructural del Cráter de Chicxulub.



Las características petrográficas y geoquímicas de las brechas y del material fundido recuperado de diversos pozos, muestran el material fundido con masas micro cristalinas de granos finos a medios cohesionados de augita, feldespatos potásicos, plaigioclasas sódicas y fases intersticiales criptocristalinas de magnetita, apatita, y ulvospinela. Las brechas contienen clastos fundidos de granos finos alterados de forma dispersa en una matriz de una mezcla de granos medios a gruesos de piroxeno y feldespato con poca o nula alteración microscópica. Los clastos contienen fragmentos de 0.1 a 0.2 cm de material base de silicato con diversos grados de digestión. El iridio fue relativamente abundante con contenidos variables, lo que siguiere una distribución heterogénea dentro del fundido, lo que puede relacionarse a una mezcla no uniforme de material de impacto, fraccionándose durante el enfriamiento extendido y cristalización y alteración hidrotermal post – impacto.

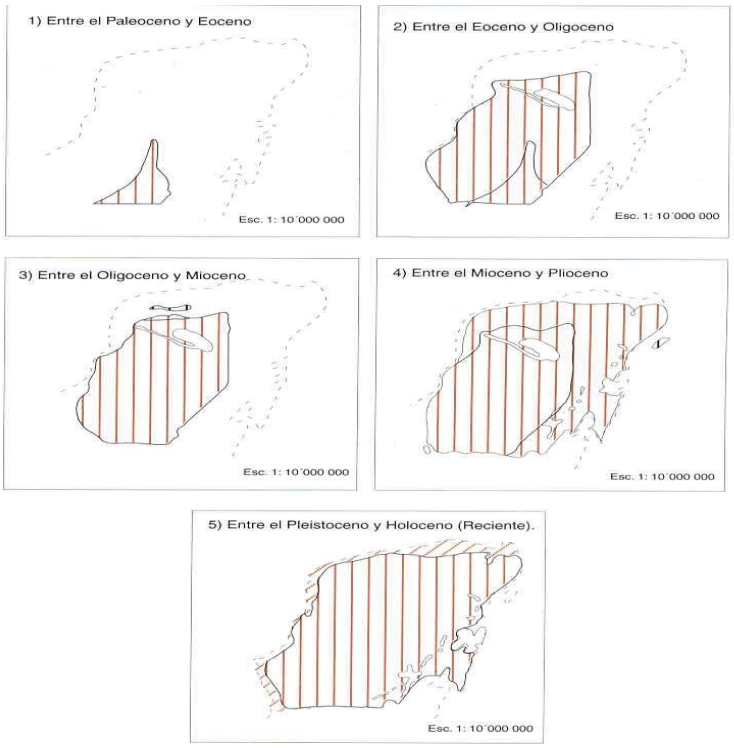
Durante el Terciario Temprano las condiciones climáticas eran mucho más cálidas y humedas que las actuales y más uniformes, sin embargo, en el curso de mas de 70 millones que perduró este periodo, se presentó una disminución gradual de la precipitación a mediados del Eoceno y para el Plioceno las condiciones eran más bien semiáridas y dieron entrada a los eventos registrados durante el Pleistoceno. Los primeros glaciares aparecieron en la región Artica y probablemente en lo alto de las cadenas montañosas, al final del Terciario. Parte de la variación climática se debió principalmente a cambios en las condiciones paleogeográficas. El incremento de la áridez en el oeste norteamericano se debió a la formación de plegamientos montañosos por ejemplo (Schwarzbach, 1962). Wadell (1926), apunta que los fenómenos orogénicos que estructuraron el relieve peninsular ocurrieron a finales del cretácico hasta el pleistoceno. Los siguientes cambios significativos que determinaron la estructura geológica de la Península de Yucatán fueron originados por dos eventos principales:

El primero, durante el Eoceno (hace 52 a 36 millones de años) se desarrolló un proceso de compresión que plegó las conformaciones y produjo un relieve ondulado en la porción sur del Estado. Al este de Mérida el anillo de cenotes mencionado ocurre en el Eoceno superior mientras que al sur de la Ciudad de Mérida los cenotes ocurren en la capa del Eoceno medio, por lo que no existe relación entre la alta concentración de cenotes en el anillo y la distribución de los estratos expuestos del Eoceno. La distribución del estrato del Oligoceno y del Mioceno dentro del anillo, descansando sobre el estrato del Eoceno sugiere que durante el Oligoceno tardío el área dentro del anillo se convirtió en una cuenca depositacional (Perry et al, 1995). A finales de la época Oligocénica, la península permaneció sobre el nivel del mar, efectuándose una fuerte erosión en los dolomíos Cretácicos, donde la tectónica de este período estableció los pliegues montañosos de Chiapas, fundamentalmente.

El segundo evento, tuvo lugar durante el Mioceno y el Plioceno y dio origen a dos sistemas de fracturas orientadas NE- SW y NW-SE, esta última denominada "Sierrita de Ticul". A principios del mioceno, más o menos 13 millones de años atrás, tuvo lugar un hundimiento ligero en las regiones del sureste. El agua fué cubriendo una extensión de tierra cada vez mayor y Yucatán pasó a ser una bahía o caleta de poca profundidad, formando vastos lechos de yeso en capas. Durante el mioceno medio, el Golfo de Yucatán se profundizó, se ensancharon las comunicaciones con el oceano y desaparecieron las posibilidades de formación de yeso paulatinamente. Las nuevas condiciones favorecían más la precipitación del carbonato de calcio, así la porción septentrional de Yucatán está formada, en su mayor parte, por calizas del plioceno y es

durante este periodo que la falla cercana a las montañas Cockscomb y hacia Tenosique, Tabasco, diera un salto vertical separando geologicamente a la Península de Yucatán de Chiapas y Centroamerica, al sur. A esta falla siguió el hundimiento en los bordes norte y este de Yucatán, que fueron invadidos por el mar.

Figura IV.14).- Características de la Península de Yucatán entre el Paleoceno y el Holoceno.



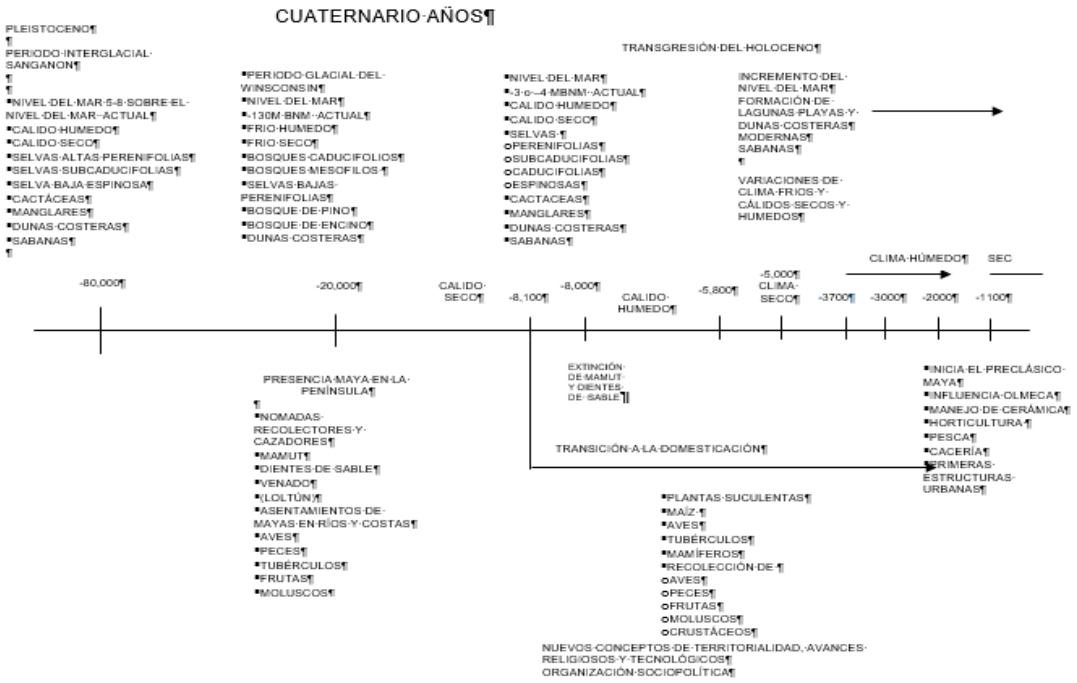
Algunos estudios palinológicos realizados en ciertas localidades de Estados Unidos, indican que la selva tropical húmeda estaba ya presente desde el Terciario y se extendía mucho más al Norte de su distribución actual. La presencia de géneros tales como: *Terminalia*, *Inga*, *Chamaedorea*, *Chrysophyllum*, *Manihot*, *Cedrela*, en el este de los Estados Unidos durante el Eoceno, indican que si en esa porción predominaba un clima tropical o al menos subtropical, en las áreas de baja altitud de México debió de haber predominado un tipo de vegetación francamente tropical, cálido y húmedo. La presencia de selvas tropicales húmedas en México durante el Oligoceno puede inferirse de los registros de ese período. Finalmente, los diversos estudios paleontológicos y palinològicos del Oligoceno-Mioceno y del Mioceno en diferentes localidades del trópico de México, revelan que la selva tropical húmeda y por lo menos 6 tipos de vegetación de los conocidos actualmente como manglares, encinares, pinares, bosques caducifolios de Liquidambar, selvas bajas caducifolias y vegetación de dunas costeras, estaban presentes desde el Mioceno, además de las sabanas descritas por Miranda (1958).

El Pleistoceno, hace 2 millones de años, fué sin lugar a duda la época del Cenozoico con mayor inestabilidad climática. Existen pruebas suficuentes de que incluso las áreas más cercanas al ecuador, en apariencia más estables, sufrieron marcados cambios climáticos y ecológicos. En general el avance de los glaciares guarda estrecha relación con la presencia de climas fríos-humedos; posteriormente se desarrolla un clima frío-seco sobre la superficie helada en expansión y reduce la temperatura en el ecuador. La principal

limitante al sur de esta expansión es la temperatura, mientras que en el norte lo es la disminución de la precipitación (Schwarzbach, 1962).

Si bien en la última glaciación la masa helada llegó a cubrir áreas de Norteamerica ubicadas hasta los 40º N, la precipitación y la temperatura oscilaron marcadamente en diferentes porciones de la República Mexicana, como lo demuestran los estudios sobre vestigios glaciares de los volcanes de la Cordillera Neovolcánica Transversal y las estimaciones de las paleotemperaturas de las aguas superficiales del Mar Caribe y el Golfo de México (Toledo, 1976). . Se han reconocido cuatro grandes glaciaciones en la región norteamericana: Nebraskana, Kansana, Illinoiana y Wisconsiniana separadas por los periodos interglaciares de Aftoniano, Yarmouthiano, Sangamoniano y la transgresión del Holoceno (situación actual).

Figura IV.15).- Historia geológica del Cuaternario.



Para esta última glaciación, fueron tres los eventos geológicos que determinaron la configuración actual de las zonas costeras modernas en la Península de Yucatán (Ward y Wilson, 1974; Lankford, 1976):

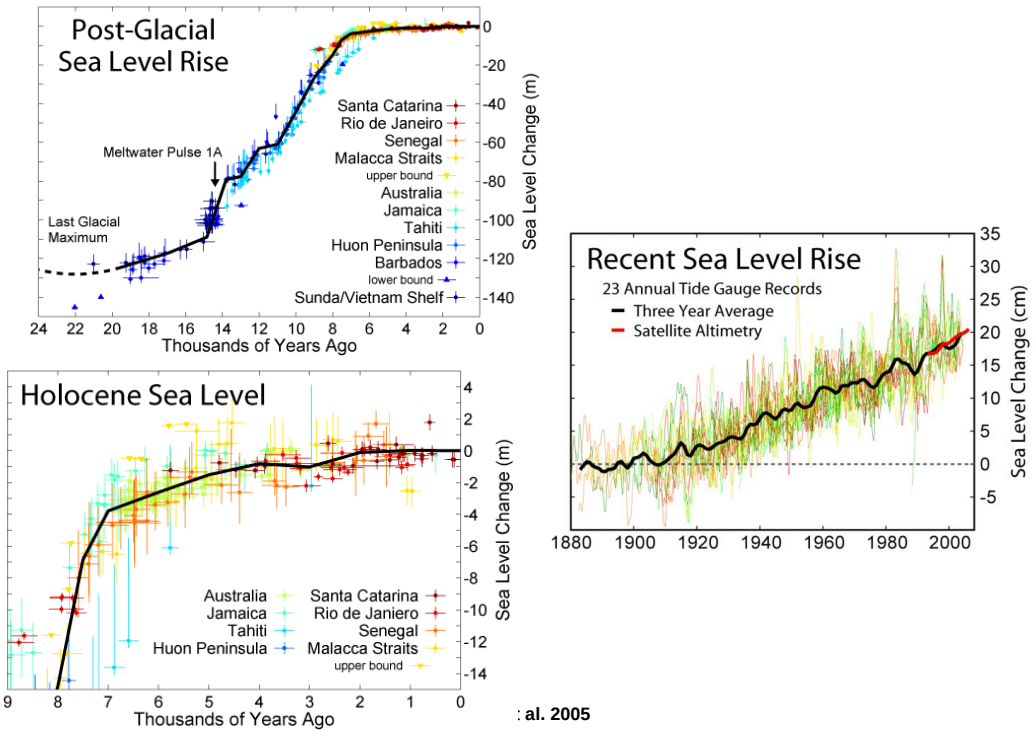
El primero es, la estabilización de la linea de costa del pleistoceno durante el período interglacial Sangamon en 5 y 8 m sobre el nivel actual del mar, hace aproximadamente 80,000 años; es decir, la mitad del anillo de Cenotes y la ciudad de Mérida inundada por un mar somero. Este evento permitió la formación de las ondulaciones de playa a lo largo de la linea de costa que se asocian con los presentes humedales costeros.

El segundo evento ocurrio durante el descenso de 130 m del nivel del mar durante la glaciación del Winsconsin, acaecida hace aproximadamente 18,000 años. Durante éste periodo se formaron las terrasas de los 4-5 m; 10 m y 100 m en la plataforma marina. Dicha plataforma fué expuesta a procesos terrestres y atmosféricos y sujeta a la erosión de valles y cuencas, así como a la sedimentación en las planicies y deltas. Esto dió como resultado el estado geológico para el desarrollo de las modernas lagunas costeras

durante la transgresión del holoceno, debido principalmente a las depositaciones eolicas de sedimentos en el margen marino de la terraza de 5 metros. La depresión topográfica formada al interior fué llenada y expuesta a la energía marina.

El tercer evento importante comenzó cuando la transgresión disminuyó alrededor de 8,000 años atrás, llegando a un nivel de 3 a 4 m por debajo del nivel actual, iniciandose la depositación de sedimentos carbonatados del cuaternario en las áreas costeras actuales. Durante los ultimos 5,000 años, el nivel del mar ha aumentado gradualmente hasta llegar a la presente elevación, produciendo la presente configuración de la linea de costa; y los procesos constructores de barras comenzaron a encerrar pequeñas porciones internas de la plataforma y a llenar depresiones.

Figura IV.16).- Características de los incrementos del nivel del mar a partir de la última glaciación.



: al. 2005

La aparición de intervalos secos y de menor temperatura en las áreas tropicales durante el Pleistoceno se pueden describir en 8 ciclos (de acuerdo con Heine, 1973; citado por Toledo, 1976):

1). Un periodo humedo-frio que se presentó de los 36,000 a 30,000 años antes del presente (6,000 años), el cual coincide con una primera glaciación en el volcán de la Malinche, Pue.

2). Un periodo de 5,000 años con clima ligeramente seco-caliente (26,000 a 21,000 años antes del presente).

3). Un periodo de 9,000 años con clima seco-frio, el cual resulta único por la combinación de las dos variables ambientales durante una glaciación (21,000 a 12,000 años antes del presente). En este punto cabe mencionar las referencias de Covich y Stuiver (1973, citado por Toledo, 1976) en la Laguna de Chichancanab en la Península de

Yucatán, donde encontraron que en un primer periodo que abarca entre los 22,000 y los 8,000 años antes del presente el mencionado lago redujo su volumen a tal grado que posiblemente llegó a secarse totalmente.

4). Un periodo de 1,000 años con clima humedo-frio, el cual es el primero de una serie de cambios bruscos que ocurrieron entre los 12,000 y 10,000 años antes del presente (Espinosa y Rzedowski, citado por Toledo, 1976), registraron un incremento en la precipitación del Valle de México en un 50 % mas que en la actualidad.

5). Un periodo de 1,000 años de clima seco-caliente, donde comienza a elevarse el nivel del mar en Centroamerica, el cual llegó a descender mas de 70 m (11,000 años antes del presente).

6). Un periodo de 2,000 años con clima humedo-frio, el cual se encuentra bruscamente interrumpido por un corto periodo de cientos de años con un clima más calido y ligeramente seco (10,000 a 9,000 años antes del presente).

7). Un amplio periodo de 7,000 años con clima seco-caliente que pudo tener implicaciones fuertes en la distribución de la biota.

8). Un periodo de 1,000 años con clima ligeramente frio-ligeramente humedo, el cual coincide con una cuarta glaciación en la Malinche, el Popocatepetl y el Iztaccihuatl (2,000 años antes del presente).

En relación a la Laguna de Chichancanab mencionada arriba, los autores citados señalan que un segundo periodo, que incluye los ultimos 8,000 años, se sucedieron tres distintas fases: la primera, aproximadamente a los 8,000 años antes del presente, donde la laguna presenta poca profundidad pero abundan la materia orgánica, gasterópodos acuáticos y posiblemente algas; una segunda fase a los 5,500 años antes del presente, en donde la laguna se vuelve más productiva pero hay un marcado decremento de la materia orgánica y de los organismos antes señalados; la tercera fase es semejante a la primera en su nivel y productividad y ocurre a los 1,500 años a la fecha (Toledo, 1976).

Los estudios a mayor detalle de Dahlin, et al (s/f) en el cenote de San José Chulchacá (dentro del anillo de cenotes) muestran que hace 8,100 años la condición climática era muy seca y con valores E/P (evaporación/precipitación) muy elevados. En el milenio siguiente se presentó una tendencia al humedecimiento de la zona. El periodo más húmedo en la zona durante el Holoceno se registra hace 5,800 años, según datos basados en isótopos de oxígeno y semillas de vegetación, con variaciones a clima seco hace 5,000 años.

Los niveles de agua del cenote Chulchacá se elevaron debido a la influencia del incremento del nivel medio del mar en los niveles del agua subterránea y se hace evidente la presencia de palmas y *Brosmium sp*., sugiriendo condiciones de humedad superiores a las actuales con un progresivo incremento en los niveles de agua del cenote. Hacia el año 5,050 al 4,050 se observa la presencia de *Chara*, una alga acuática que refleja los cambios ambientales en el cenote durante este periodo seco, el cual se puede relacionar a niveles más bajos o fluctuaciones más rápidas de nivel de agua y asociadas a un mayor desarrollo de gramíneas y compositaceas como *Trema sp*. A partir de 3,700 años atrás las condiciones fueron las más húmedas, con presencia de *Brosmiun,* prevaleciendo esta situación hasta el año 1,100 (A.C.) donde se extendió un clima seco

que perduró hasta el año 600 (D.C) con dominio de vegetación de ambientes secos con grandes coberturas de pastos y *Trema sp*., incrementándose posteriormente la humedad de manera variable hasta el año 900 (D.C.). La presencia de *Mimosa sp* en los años recientes indican que perturbaciones antropogénicas regionales o probablemente la llegada de europeos al área del cenote Chulchacá comenzó aproximadamente en el año 1,630. Es posible que la deforestación actual y la disminución de la evapotranspiración estén provocando cambios en el clima a condiciones más cálidas y secas que en el siglo pasado. Un aspecto interesante que menciona el autor es que la tasa de sedimentación en el cenote se ha mantenido casi constante a una velocidad de 5.1 mm/año en los últimos 8,000 años (aproximadamente 4.08 m).

Estos registros son de gran importancia porque ocurren en la zona geohidrológica del anillo de cenotes e informan acerca de los cambios en el nivel del mar y en la cantidad de precipitación. Con respecto a ésto último, existe una clara correspondencia entre el nivel de profundidad del lago estudiado y los periodos de humedad y sequía propuestos por Heine en 1973. El mismo autor, menciona que la zona desértica del hemisferio norte se desplazó hacia el ecuador durante la última glaciación.

Toledo (1976), realiza una revisión extensa de datos que demuestran como en las bajas latitudes la temperatura osciló marcadamente entre los periodos glaciares e interglaciares. Menciona los trabajos de Emiliani (1970) donde se concluye que la oscilación térmica en el Mar Caribe debió de haber sido entre 7 y 8 grados C. y en las porciones proximas al Ecuador de los oceanos Atlantico y Pacífico era de entre 5 y 6o C y 3 y 4o C respectivamente. Asimismo, menciona que el citado autor (Emiliani, 1966) encuentra que las temperaturas superficiales de la parte central del Mar Caribe parecen haber oscilado entre una máxima de 26 - 27o C durante los interglaciares y una mínima de 21 - 22o C durante los periodos glaciares. De igual forma, Toledo en su revisión menciona que los trabajos de McIntyre (1967), comparando especies de cocolitoforidos de sedimentos actuales y de la última glaciación, encuentra que la tempratura superficial del Mar Caribe, hace 24,000 años, era de 18 - 22o C. Otros trabajos de Emiliani (1975) reportan que la temperatura durante la última glaciación en el noreste del Golfo de México fué de 16 a 22o C durante el invierno y de 22 a 29o C durante el verano. Esta información ofrece un panorama de la oscilación de la temperatura durante el Pleistoceno para las localidades situadas sobre la planicie costera del Golfo de México y Mar Caribe (Toledo, 1976).

Wright (citado por Duch, 1988) sugiere que el verdadero material de origen de muchos suelos yucatecos no es la coraza calcárea, sino un depósito superficial presente sobre la roca en el momento del levantamiento. Asimismo, piensa probable que los suelos que reposan sobre la roca calcárea corresponden a un antiguo ciclo de formación de suelos, mientras que los formados a partir de la coraza resquebrajada y erosionada corresponden a uno nuevo. Menciona que la naturaleza del depósito podría ser un sedimento impuro, rico en carbonatos (fango calcáreo submarino); o polvo meteórico; o cenizas volcánicas depositadas sobre la superficie ya emergida; o bien una mezcla de sedimentos abisales y otros materiales finos derivados de erupciones volcánicas submarinas, depositados súbitamente sobre el bloque peninsular ya emergido, a consecuencia de enormes marejadas producidas por algún movimiento tectónico de primer orden en la región Caribe-Antillana. Lo anterior deja entrever la posibilidad de que las aguas oceánicas hubieran podido cubrir la península por un tiempo breve, aunque suficiente para depositar una buena cantidad de sólidos suspendidos en ellas antes de retornar a su condición inicial. Flores y Quiñones (citado por Duch, 1988) plantean que los suelos rojos y profundos derivan de un fango marino con impurezas de cenizas volcánicas y que su

textura dominantemente arcillosa es indicador de un origen palustre, posiblemente de áreas costeras someras, en las cuales los sedimentos marinos saturados con cenizas volcánicas o polvo meteórico fueron atrapados cuando la península emergió lentamente del mar.

En el caso de los suelos, y en particular los suelos profundos (hasta más de 2 metros), que se ubican en planadas y depresiones de tierras altas peninsulares, no es posible fundamentar su origen a partir de la coraza calcárea que lo subyace, o de cualquier otro material calizo descrito para la entidad ya que: **1)**. existe una escasa capacidad para formar suelo "in situ" y generar volúmenes importantes de material edáfico formando suelos profundos como los cambisoles, luvisoles y nitosoles, del sur y el oriente de la península; **2)**. la línea de contacto entre el suelo y la coraza litificada subyacente, sin importar la profundidad a la que se encuentre, representa por lo regular un cambio abrupto, sin aparente relación genética entre el uno y la otra; **3)**. por regla general, en éstos suelos no aparece el horizonte "B" transicional, indicador de transformaciones del material de origen. Así, es posible considerar un proceso de formación de suelos más amplio y complejo, en donde el desarrollo "in situ" de los terrenos elevados se complementa con el acarreo hídrico y el arrastre coluvial de los materiales edáficos que se van conformado, así como su acumulación en las partes bajas circundantes. Para ejemplificar este proceso se ha estimado que el contenido promedio de impurezas en el material calcáreo de la Entidad es de 1.6 %, lo cual significa que, para generar una hectárea de suelo de un metro de profundidad, se requeriría la meteorización de un volumen de roca caliza de 625,000 toneladas métricas (Duch, 1988).

Sarukhán (1968a y 1968b) y Sousa (1968) han discutido con cierta amplitud los posibles efectos de los cambios del clima durante el Pleistoceno sobre las regiones tropicales de México, y en particular los efectos de las temperaturas durante esa época. El desplazamiento de la selva tropical húmeda, por causas climáticas durante el Pleistoceno, puede operar en tres direcciones:

a). Cuando la temperatura óptima se mantiene en el mismo rango pero la precipitación no alcanza el límite inferior de los 2,000 mm de lluvia anual requeridos, la selva tropical húmeda o alta perennifolia (de acuerdo con la magnitud de esta disminución), tiende a ser desplazada por selvas altas o medianas subcaducifolias (1,000 a 1,200 mm. de precipitación anual) y selva baja espinosa caducifolia (menos de 900 mm.) y con cactáceas (menos de 600 mm.). Esta situación correspondería a periodos Pleistocénicos con ambientes cálidos-húmedos en el primer caso y cálidos-secos en el último. En la zona geohidrológica del anillo de cenotes este es el tipo de ambiente que predomina.

b). Cuando la precipitación se mantiene en los mismos valores o en valores moderadamente menores que el óptimo, pero la temperatura media anual desciende del límite térmico inferior de los 20 ^{o}C y las temperaturas mínimas extremas de los 0 ^{o}C, la selva tropical húmeda tiende a ser desplazada por bosques caducifolios, bosques mesófilos de montaña y selvas bajas perennifolias (por lo común con temperaturas medias anuales de 18 ^{o}C). Estas características corresponderían a climas de tipo húmedo-frío.

c). Cuando la precipitación anual, así como la temperatura media anual son marcadamente menores al límite inferior de su tolerancia ambiental, las selvas tropicales húmedas tienden a ser desplazadas por bosque de pino-encino, por lo común con precipitaciones medias anuales entre 700 y 1,400 mm. y temperaturas medias anuales

entre 12 y 18 ºC. El representante en el caribe es el *Pinus caribea*, que se encuentra en extensas sabanas en Belice. Lo anterior se refiere a los periodos de clima frío-seco.

Existen algunos datos aislados sobre la presencia de elementos xerófitos en áreas de clima de selva húmeda. Estas han sido reportada por Lundell (1940 y 1962; in Toledo, 1967) en la base de la Península de Yucatán, y menciona que cerca de 20 especies forman parte normalmente de las selvas bajas deciduas y selvas con cactáceas de la porción mas norte de la misma (vinculadas al anillo de cenotes), así como en la Sierra Maya, en Belice; la porción sur de Campeche y la parte central del Petén; San Juan Raya, en Puebla; y la parte Norte de la Meseta Central de México. El género encontrado en estas localidades corresponde al agave *Bucarnea*, y que en la parte norte de Yucatán es *B. pliabilis* o "mechuda" es la representante continental (R. Orellana, com. pers.). Por otro lado, el genero *Cephalocereus*, que también se encuentra en la selva con cactáceas es de origen antillano y está representado por *C. gaumeri*. En el periodo cálido-seco de los últimos 7,000 años de duración, a finales del Pleistoceno, es donde posiblemente se desarrolló de nuevo el componente candelabriforme de la selva baja decidua de la zona geohidrológica del anillo de cenotes, que se encontraba presente desde el Terciario (R. Orellana, com. pers.). Este tipo de vegetación forma una franja de 10 a 15 Km de ancho, desde el borde sur de la ciénaga hacia el interior, a partir del sur de Telchac Puerto a Sisal y Celestún en Yucatán, donde algunas especies características son *Cephalocereus gaumeri*, *Nopalea gaumeri*, *Pedilanthus nodiflorus* y *Cissus trifoliata*. Los terrenos donde se desarrolla esta vegetación son muy llanos, con grandes lajas calizas que afloran a la superficie y en cuyas grietas y hendiduras se deposita un suelo muy escaso y somero de color obscuro (Miranda, 1958).

Rico-Gray et al (1987) menciona que la vegetación actual de la zona costera de Yucatán (duna costera, manglar, sabana, selva inundable, selva baja espinosa con cactáceas y selva baja caducifolia) es el resultado de un proceso de sucesión y estabilidad debido a la emersión continua de la plataforma yucateca y que en mayor o menor grado se ha mantenido así por varios cientos de años, expandiéndose hacia el norte. La auto sustitución dentro de las comunidades vegetales estudiadas es el resultado de fuerzas selectivas provocadas por la baja precipitación, alta salinidad, huracanes, abrasión por arena, aspersión marina, mareas, oleajes y vientos. En la sucesión costera, la haloserie tiene su origen en los depósitos de cieno, favorecido por el entrelazamiento de las raíces de los halofilos costeros, que producen el avance de las orillas y el levantamiento y emersión del fondo. Las etapas finales de ésta haloserie puede ser un tintal o sabana (Miranda, 1958).

Gunn et al. (1995 in Lutz, 2000), reconstruyeron el grado de humedecimiento de la península de Yucatán durante el Holoceno Tardío y lo relacionaron con la agricultura Maya. Utilizaron mediciones mensuales de descarga de agua del Río Candelaria y las relacionaron con las temperaturas medias anuales del Hemisferio Norte entre los años de 1958 y 1990 (figura IV.17). Los autores encontraron una correlación significativa entre la duración de la temporada húmeda en la cuenca del río Candelaria y el Presupuesto Global de Energía (Global Energy Budget en inglés).

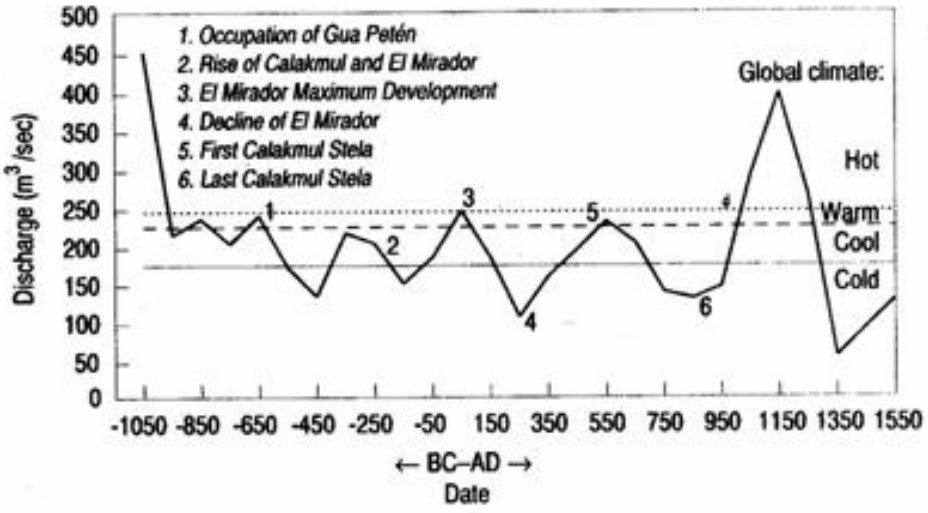
La temporada de las más altas descargas se correlaciona con las condiciones cálidas. Durante las condiciones templadas, o intermedias, es cuando se presentan menores descargas. Las condiciones frías proveen las descargas de agua por el río Candelaria mas bajas durante las temporadas de crecientes. Las temperaturas globales intermedias son las que brindan las combinaciones de temporadas secas y lluviosas óptimas. De aquí

que la productividad agrícola Maya este relacionada con el clima global a través de los mecanismos que afectan la temporalidad del humedecimiento del territorio.

Un modelo de regresión permite reflejar la paleohidrologia de los últimos 3,000 años, indicando que las condiciones mas favorables para las prácticas agrícolas de los antiguos Mayas coinciden con los balances óptimos de las duraciones de temporadas secas y húmedas, y las catástrofes agrícolas mayas se desarrollan durante periodos secos o húmedos extensos, o en periodos de inestabilidad climática. Los autores concluyen que las tierras Mayas bajas del sur de la península registran su crecimiento urbano y su colapso en parte debido a las interacciones complejas entre el clima global y la agricultura Maya. El fechado de sus cambios climáticos estimados se ajusta a la cronología arqueológica del surgimiento y caída de los asentamientos Mayas.

Destaca el hecho de que en los años 400 AC al 250 DC (preclásico tardío) se registra un incremento del nivel del mar, asi como otro incremento de mas de un metro del nivel del mar hacia el año 900 DC, durante el periodo clásico terminal. Esto promovió cambios y abandonos de las prácticas agrícolas en las zonas bajas y pantanosas Por otro lado, las sequias severas, particularmente en el año 250 DC, cuando decayó El Mirador, así como entre el año 800 y 1000 de nuestra era donde se presentó una de las peores sequias durante el periodo Clásico Terminal, lo cual motivo cambios en las relaciones sociales de producción agricola.

Figura IV.17).- Reconstruyeron del grado de humedecimiento de la península de Yucatán durante el Holoceno Tardío y su relación con la agricultura Maya.



De acuerdo con Orellana (1999, in ATLAS, 1999), las anomalías de precipitación para las décadas 1961-1970, 1971-1980 y 1981-1990 (figura IV.18 a y b), se entienden como cualquier valor que se encuentra por encima o por debajo de la normal o media aritmética de la precipitación total de un largo periodo. En los mapas que presenta se describe la distribución del incremento o decremento al comparar las décadas mencionadas. Las isolineas con valores negativos representan decremento de lluvia en la segunda década con respecto a la primera, la isolínea positiva implica un incremento de la lluvia.

Es claro ver en el mapa que la comparación de las diferentes décadas arroja valores negativos en las isolíneas, lo que implica que en los últimos 30 años la cantidad de lluvia ha disminuido entre 100 a 300 mm, particularmente en el sur. Ciertamente hacia una

temporada seca. Lo mismo sucede para el caso de la temperatura media anual (figura IV.19 a y b), en los mapas de Orellana (ATLAS) se aprecia un incremento de temperatura, principalmente al sur de la Entidad, el cual alcanza los 3 grados centígrados. Hacia una condición mas cálida y como se mencionó anteriormente, también mas seca. Condiciones favorables para el desarrollo de plantas xerófitas.

Figura IV.18 a y b).- Anomalías de precipitación de 1960 a 1990.

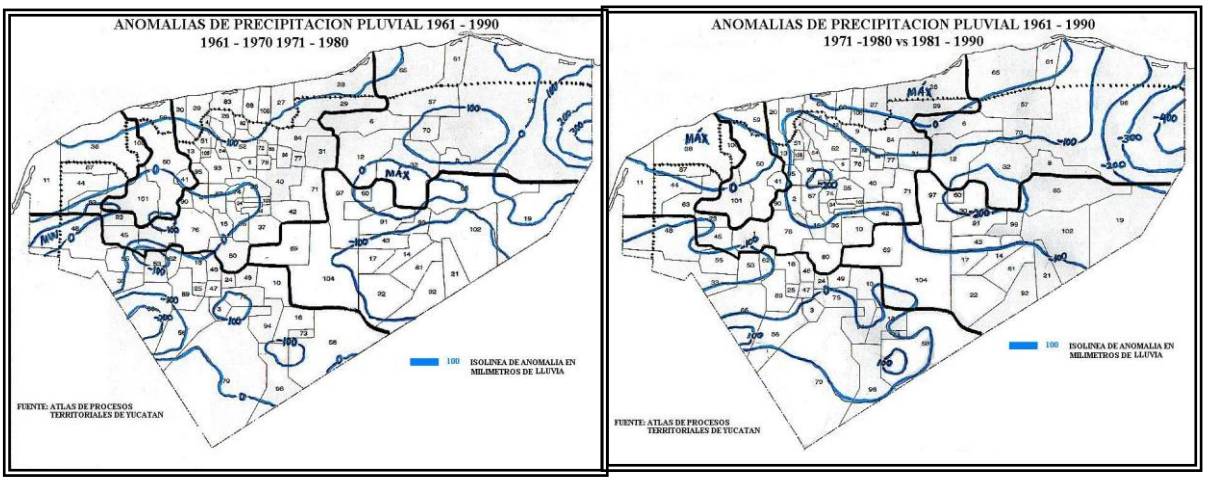
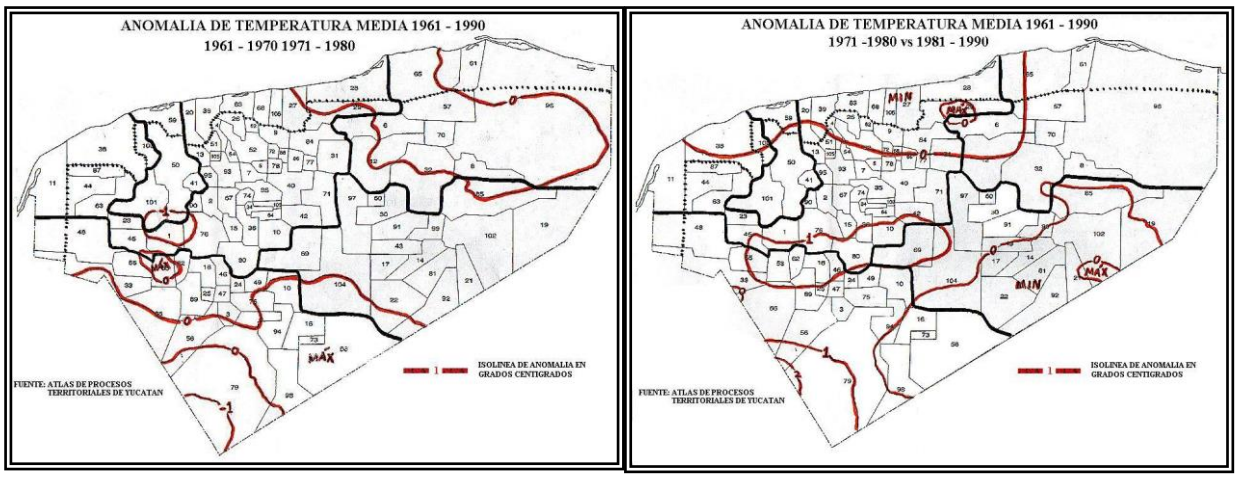


Figura IV.19 a y b).- Anomalías de temperatura de 1960 a 1990.



El ecosistema costero es un sistema en estado estacionario y de manera natural sujeto a perturbaciones por diferentes factores ambientales, entre los que destacan: a) la hipersalinidad en el suelo y la disponibilidad de agua dulce que afecta la transpiración y la capacidad fotosintética de la vegetación y; b) la sedimentación que reduce el intercambio de nutrientes y gases disueltos entre la raíz, suelo, agua y/o la atmósfera.

Los eventos cíclicos asociados a periodos de años secos y húmedos, así como la presencia recurrente de huracanes regulan la dinámica del manglar. En nuestro caso, el periodo seco de 29 años que va de 1953 a 1982 (Observatorio Metereológico de Progreso) y la frecuencia entre 7 y 10 años de huracanes se asocia a condiciones hipersalinas, baja disponibilidad de agua dulce y nutrientes, por lo que es de esperarse la perdida natural de vegetación y el incremento de blanquizales.

En el periodo mencionado anteriormente es cuando se inician los mayores impactos derivados de las actividades humanas en la costa, como son: a) La conexión permanente entre el mar y la ciénaga, modificando el régimen hidrológico, donde dominan los flujos por marea en una nueva morfología costera con grandes canales que exportan materia orgánica a la zona litoral, los patrones de sedimentación que modifican el sustrato y el incremento en la salinidad, b) le sigue en importancia la obstrucción permanente de los flujos paralelos de las masas de agua por la construcción de carreteras costeras, que afectan principalmente al manglar de la ciénaga baja, c) dragados y rellenos en la ciénaga para acondicionamiento de puertos de abrigo y zonas de vivienda que promueven la sedimentación y la perdida de manantiales y d) migración masiva de la población hacia la costa, la cual se asienta en los márgenes de la ciénaga en condiciones insalubres con rellenos de basura.

En la siguiente tabla se enmarcan como ha sido el deterioro absoluto expresado en $km^{2/}$año en los tres periodos considerados (ver figuras en el apartado de vegetación, que involucran desde Sisal hasta Progreso).

Tabla IV.1).- Cambios de paisaje en el área de Sisal a Progreso, Yucatán.

U/Paisaje	1948-1979 (31 años)	1979-1991 (12 años)	1948-1991 (43 años)
SBS	+1.36	+0.83	+1.22
SBI	-0.33	-1.41	-0.72
AI	-0.49	+1.66	+0.82
ZP	-1.41	-1.01	-1.29
Total Absoluto	3.59 km^2/año	4.94 km^2/año	4.05 km^2/año

SBS: Selva Baja con Sabana; SBI: Selva Baja Inundable; AI: Área Impactada; y ZP: Zona de Petenes

Si bien los estresores naturales como la intensa sequía de casi 30 años y la presencia de huracanes pueden causar daños “catastróficos”, estos son predecibles por el ecosistema en su conjunto y este puede adaptarse para sobrevivir ya que estos eventos regulan las tasas de crecimiento, producen un retroceso periódico de la sucesión y son responsables de las características “juveniles” del ecosistema, así como del numero de especies capaces de tolerarlo. Sin embargo, es precisamente en este periodo cuando las actividades humanas incorporan perturbaciones al sistema del tipo no selectivo, de gran intensidad y no predecibles por el mismo, como canalizaciones para el paso del agua de mar, exportaciones masivas de materia orgánica y sedimentación excesiva.

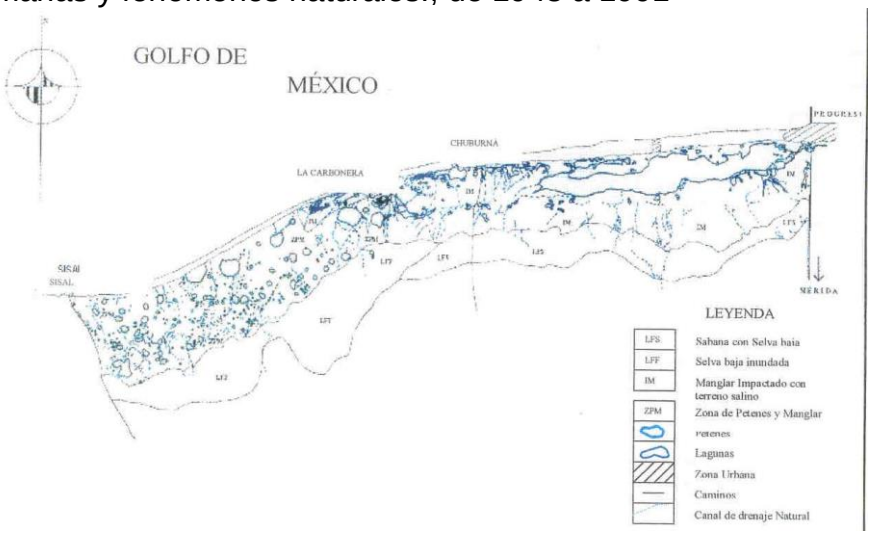
En el análisis de fotografías aéreas se observa que en el periodo 1948-1979, los mayores cambios en la vegetación se presentan fundamentalmente en la zona de petenes y manglar de ciénaga baja con perdidas de 1.41 km2 por año y donde la hipersalinización promueve la vegetación tipo sabana, en su mayor proporción, y blanquizales en menor proporción.

Posterior a 1982, se inicia un periodo de años lluviosos que para el 2000 ya entra en declive, entre cuyos principales eventos de tipo catastrófico fue la presencia del huracán Gilberto en 1988 que abrió varias bocanas como la Carbonera y Chuburna, donde la primera se ha mantenido abierta. Aunque es de esperar que tales condiciones de alta precipitación sean favorables para el ecosistema, las perturbaciones de tipo antropogénico han provocado efectos residuales y crónicos, donde las nuevas estructuras vegetales que se han desarrollado exhiben poco vigor y con una escasa capacidad para mantener su energía, por lo que su regeneración esta inhibida. Si estos estresores

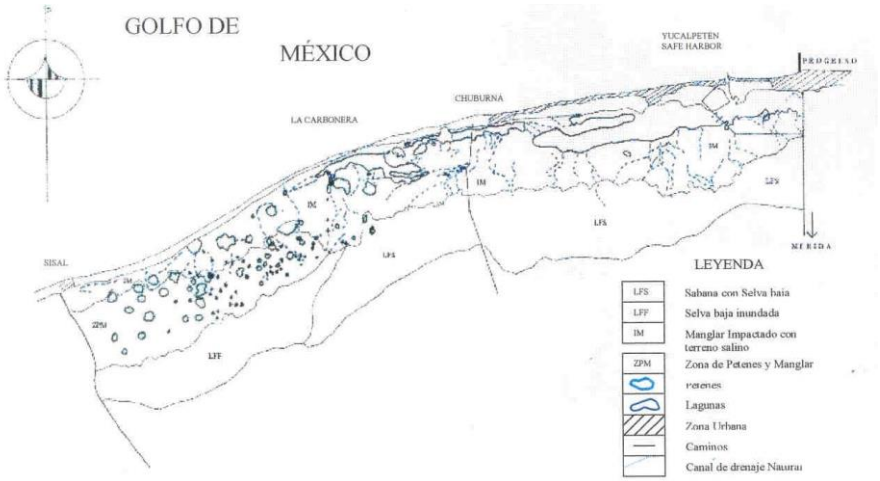
crónicos de origen antropocéntrico, mencionados anteriormente, hubieran sido solucionados en la década antepasada, fundamentalmente las comunicaciones permanentes con el mar (Yucalpetén) y las carreteras costeras, la recuperación del manglar sería mucho más vigorosa y la pérdida acelerada de selva baja inundable no estaría en el umbral de considerarse como un proceso irreversible

En las fotografías que cubren el periodo 1979-1991, se observa que si bien la zona de petenes y manglar de cuenca presenta fuertes perdidas anuales, el mayor cambio se observa en el manglar de ciénaga baja, formando extensos blanquizales a una tasa de 1.66 km2 por año, donde el cambio permanente del régimen hidrológico, la sedimentación de origen marino, la perdida de manantiales, la hipersalinidad y la erosión son la causa de este crecimiento, fomentando con estas condiciones la transformación acelerada de selva baja inundable a selva con sabana a una tasa de 1.41 km 2 por año.

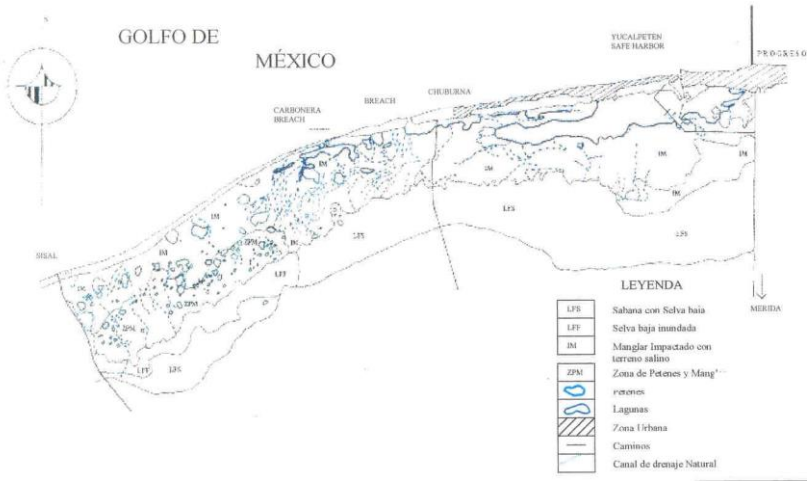
Figura IV.20, a, b y c).- Cambios en las características costeras derivadas de las actividades humanas y fenómenos naturales., de 1948 a 1991



a).-Paisaje costero 1948



b).- Paisaje costero 1979



c).- Paisaje costero 1991

Es recomendable consolidadar las actividades de restauración para reducir los efectos de las perturbaciones crónicas al ecosistema y ampliar su capacidad, en este periodo de años lluviosos, de retener energía capaz de ser utilizada para la regeneración del mismo en los años secos que se avecinan en la costa.

IV.2).- Geología.

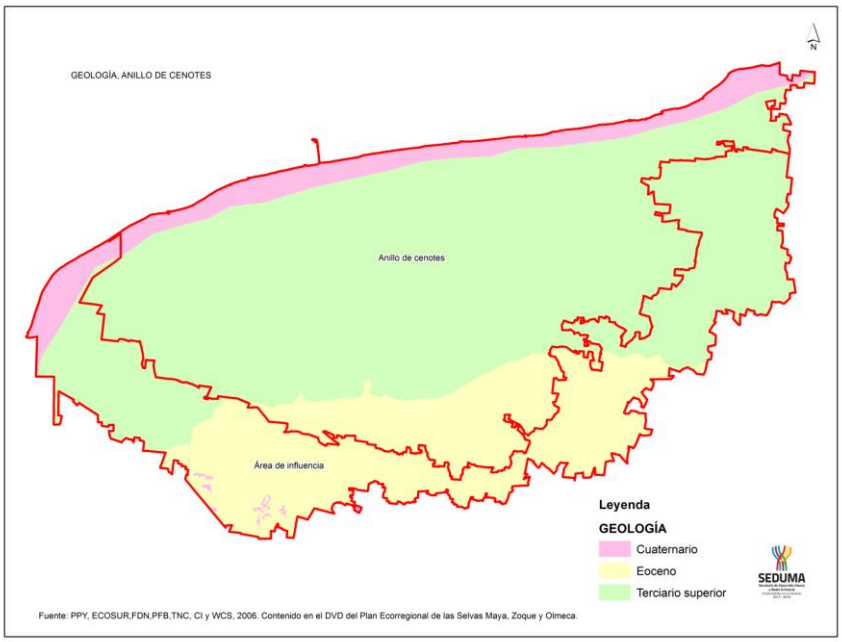
El territorio peninsular, se caracteriza por la relativa uniformidad que presenta el sustrato geológico, en particular el estrato más superficial. Destaca el origen sedimentario marino, constituido químicamente por carbonato de calcio ($CaCO_3$) en una alta proporción y bajo la forma mineral de calcita y en menor medida dolomita o aragonita, cuando el magnesio pasa a formar parte de los compuestos, que entonces se identifican como carbonatos de calcio y magnesio ($CaMgCO_3$) o solo de magnesio ($MgCO_3$) respectivamente.

Por lo regular, estos compuestos carbonatados ocupan mas del 90 % del peso del material, aunque hay casos en los que puede representar menos del 50 %, sin embargo estos son muy raros. El resto del material esta formado por óxidos de fierro y aluminio, y aluminio-silicatos muy finos (arcillas y limos) y sílice.

El sustrato geológico del estado de Yucatán muestra tres agrupaciones superficiales principales con relación a su edad (Duch, 1988):

1).- Materiales del Eoceno (Inferior, Medio y Superior) con una edad aproximada de 36 a 58 millones de años, en las porciones sur y central.
2).- Materiales del Mioceno Superior y Plioceno, con diversas edades alrededor de los 13 millones de años aproximadamente, ubicados hacia el noroeste, norte y oriente de los depósitos eocénicos, formando una banda periférica que los rodea.
3).- Materiales del Pleistoceno y Holoceno, con una edad menor a un millón de años desplegados en forma periférica a partir de los materiales terciarios, formando una angosta franja entre estos y la actual línea de costa (Esquema y tabla).

Figura IV.21).- Mapa geológico de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes de Yucatán.



A estos sedimentos marinos calcáreos de edad Terciaria se les considera un espesor máximo de 1,000 m, y constituyen una plataforma que desde el punto de vista tectónico es catalogada como estable; no obstante, que durante la era Cenozoica se originaron los plegamientos y fallas que provocaron las estructuras que han influido en el desarrollo de su morfología actual (Isphording, 1975).

Tabla IV.2).- Superficies geológicas de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes

CRONOLOGÍA	ÁREA	SUPERFICIE DE LA ZONA GEOHIDROLOGICA Ha	SUPERFICIE ESTATAL Ha
Cuaternario	Interior	93,701.99	
Cuaternario	Influencia	28,184.16	
Total	48%	**121,886.16**	253,758.35
Eoceno	Interior	129,373.62	
Eoceno	Influencia	249,425.59	
Total	27%	**378,799.21**	1,390,378.76
Terciario superior	Interior	846,294.74	
Terciario superior	Influencia	272,177.61	
Total	49%	**1,118,472.36**	2,272,652.48

Fuente: PPY, ECOSUR,FDN,PFB,TNC, CI y WCS, 2006. Contenido en el DVD del Plan Ecorregional de las Selvas Maya, Zoque y Olmeca.

López Ramos (1979) describió la secuencia estratigráfica de la región norte de la Península (pozo Chicxulub 1-PEMEX) como sigue:

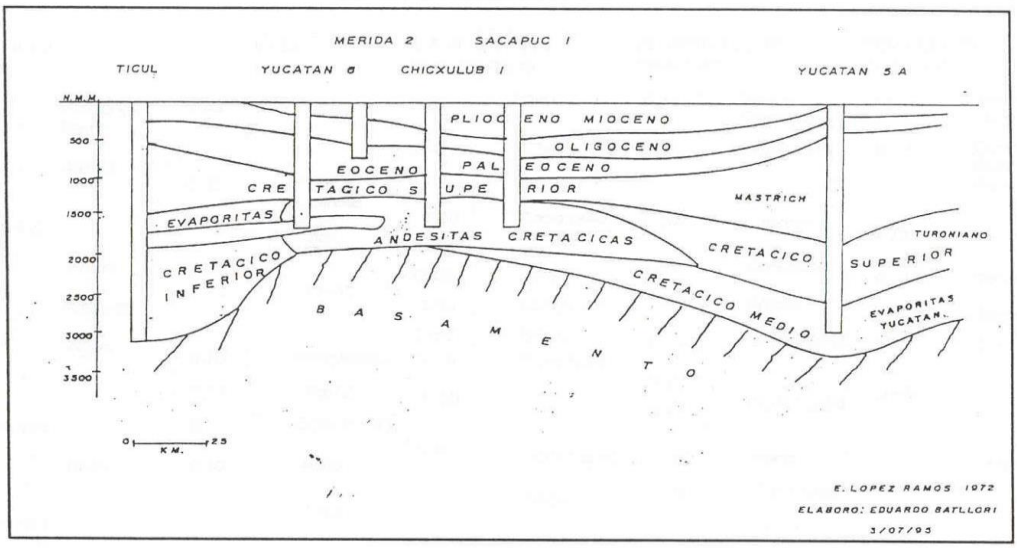
La capa de calizas del Plioceno-Pleistoceno se desarrolla hasta 200 m de profundidad; las rocas del Oligoceno se extienden entre los 370 y los 525 m de profundidad y; las calizas del Mioceno-Plioceno encuentran su basamento a 308 m de profundidad.

El Eoceno desarrolla su secuencia entre los 525 a los 810 m. Los sedimentos encontrados entre los 810 a 920 m se consideran del Paleoceno, siendo claras las diferencias litológicas que los separan tanto del Eoceno como del Cretácico.

Las formaciones sedimentarias perforadas a partir de los 920 m pertenecen al Cretácico superior y se extienden hasta los 1,390 m, a partir de aquí y hasta una profundidad de 1,580 m se cortó una roca ígnea clasificada como andesita. Hacia la Sierrita de Ticul, al sur de la región de estudio, capas de evaporitas cretácicas pueden encontrarse a una profundidad de 500 m (López Ramos, 1979; Perry et al 1995). Como se observa en la (Figura IV.22), la zona del pozo Chicxulub 1 se encuentra ubicada en la parte central del anillo de cenotes que será descrito posteriormente.

La denominación de Formación Carrillo Puerto fue introducida por Butterlin (1958), a los estratos del Mioceno Superior-Plioceno, de acuerdo con el pueblo del centro del estado de Quintana Roo. Los niveles inferiores corresponden a coquinas de más o menos 1 m de espesor, cubiertas por calizas duras ricas en organismos de la familia Peneroplidae, más arriba pasan a calizas impuras arcillosas de color amarillento o rojizo. La alteración de estas calizas origina arcillas lateríticas. Los niveles superiores están representados por calizas blancas, duras y masivas. Los echados observados son débiles o nulos, con orientación NNE. Su localidad tipo se encuentra en el kilómetro 112 de la carretera Peto-Carrillo Puerto, recubre concordantemente a la formación Bacalar que aflora en el estado de Quintana Roo o bien descansa discordantemente sobre las series eocénicas, lo cual muestra su carácter transgresivo, su espesor debe alcanzar varios centenares de metros. Estas rocas manifiestan una alta permeabilidad y porosidad, aunque sean secundarias, ya que se encuentran muy fracturadas y contienen abundantes oquedades de disolución, por lo tanto y en consideración a su gran distribución en el estado así como a la poca profundidad del agua subterránea, ésta es la unidad hidrogeólogica de mayor importancia, constituyendo junto con el Miembro Pisté al sur, los dos acuíferos que algunos autores han denominado como: eocénico y miocénico.

Figura IV.22).- Ubicación del pozo Chicxulub I en la zona central del anillo de cenotes



El conjunto de rocas sin nombre, denominadas Formación no Diferenciada (Oligoceno), son consideradas como margas blancas, grises y gris crema, margas con intercalaciones

de arcillas del mismo color, así como calizas gris crema compactas. Estos depósitos son de tipo batial a diferencia de los afloramientos del norte de la Ciudad de Mérida que son neríticos. Por sus características hidrogeológicas son considerados como acuifugas.

Calizas de moluscos, es la denominación para las calizas conquíferas, masivas de color blanco a crema, que forman una banda más o menos amplia a lo largo de la costa norte y oeste del estado de Yucatán. Probablemente las calizas consolidadas pertenezcan al Pleistoceno y al Holoceno los niveles más altos y más próximos a las costas; descansan generalmente sobre las calizas de la formación Carrillo Puerto y en el estado de Campeche directamente sobre las series eocénicas. Su espesor debe alcanzar solo algunas decenas de metros. Estas rocas manifiestan una gran permeabilidad y porosidad debido a la presencia de fracturas y cavidades de disolución, sin embargo la explotación de las aguas subterráneas aquí se encuentra limitada por la poca profundidad de la interfase salina, por lo que ésta se lleva a cabo a través de una serie de pozos someros. En los límites con la línea costera se pueden observar tres unidades litológicas, sin consideración hidrogeológica y que se encuentran recubriendo parcialmente a las calizas de moluscos: a) suelos residuales constituidos por arcillas de color café, gris o rojizo y que resultan del intemperismo químico de las calizas. b) Arcillas y turbas localizadas en zonas de esteros y manglares a consecuencia de la formación de cordones litorales y c) arenas de playa (cordones litorales) constituidos por arenas calcáreas y fragmentos de conchas. En la franja costera, es característica la presencia de un elemento litogénico denominado acuitardo costero, o caliche, como se conoce en la localidad y que se extiende por toda la superficie norte principalmente, producto de las precipitaciones de carbonato de calcio durante las oscilaciones del Pleistoceno, proceso que continúa hasta nuestros días.

La Facultad de Ingeniería de la UADY, ha clasificado el material del subsuelo en rocas calcáreas blandas, medias y duras de acuerdo con su comportamiento mecánico con base en la resistencia a la compresión simple y propiedades físicas, (absorción, porosidad y peso volumétrico) correlacionándolos con los residuos producidos por la barrenación, tal como sigue:

La resistencia de la roca caliza blanda es del orden de 5.00 a 50.00 kg/cm^2 , la roca caliza media del orden de 50.00 a 120.00 kg/cm^2 y el de la roca caliza dura con más de 120 kg/cm^2.En áreas de relleno costero, los estratos de suelos y roca detectados en el lugar, se encuentran dispuestos en el siguiente orden: en la parte superficial se encontró un estrato de material de relleno con una capacidad de carga aproximada de 1.00 a 2.00 kg/cm^2, en la parte inferior del primer estrato se detectó la presencia de turba y/o limo orgánico con una capacidad de carga menor a 0.25 kg/cm^2 y les subyace un estrato resistente (roca) de una capacidad de carga mucho mayor (como las mencionadas anteriormente). Con estos valores de capacidad de carga se diseñan las cimentaciones de la infraestructura civil.

Siguiendo la variación altitudinal desde la costa hacia las partes de mayor altitud al sur, se observa que los terrenos se caracterizan por ser completamente planos hasta alcanzar la cota de los 5 msnsm[1], la cual queda definida por la isolinea que une Chunchucmil en el occidente y Dzonot Carretero en el oriente, pasando por Hunucmá, Ixil, Dzemúl, Telchac Pueblo, Dzidzantún, Dzilám González y Loche. La separación entre esta isolinea y el litoral del Golfo varía de aproximadamente 25 km en la parte occidental hasta los 10 km

[1] Metros sobre el nivel medio del mar(msnm)

en Dzilám de Bravo, a partir de donde se mantiene dicha anchura hasta el límite oriental de la entidad (ver Figura IV.23).

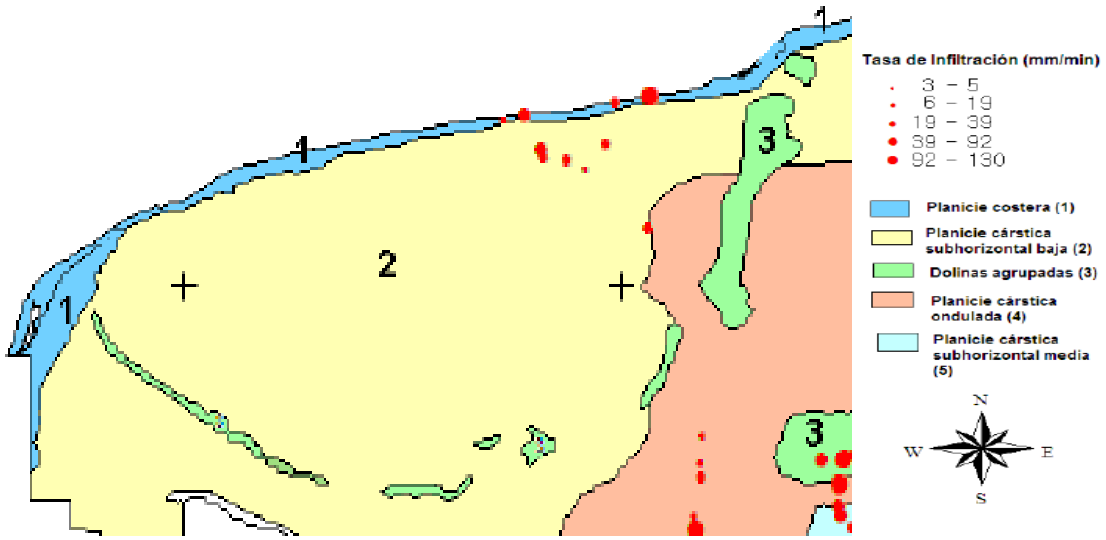
Rumbo al sur, el relieve comienza a manifestarse primero, con la aparición de ligeras ondulaciones asociadas con pequeños altillos y leves hundimientos del terreno, cuyos desniveles fluctúan entre 1 y 3 metros. Estos terrenos suavemente ondulados se extienden al noroeste de la línea Buctzotz-Cacalchén-Umán, la cual coincide con la cota de los 10 msnm (Duch, 1988). En la parte occidental de la entidad, entre las isolineas de los 10 y 20 msnm los altillos y hundimientos aumentan de tamaño, lo que favorece el desarrollo de un paisaje con terrenos ondulados. Los mayores desniveles no sobrepasan los 5 m, salvo casos excepcionales, o localizados en cotas cercanas a los 20 msnm, como ocurre en el anillo de cenotes que se extiende entre Kopomá y Tekít.

Bolio Barrios, E., et al (2009), menciona que la infiltración en terrenos carsticos es muy variable, las pruebas realizadas de infiltración en 26 sitios mediante 52 pruebas en zonas planas, en las que el agua llega por escurrimiento superficial para posteriormente infiltrarse al subsuelo, arroja los valores siguientes de acuerdo con el paisaje geomorfológico:

Paisaje geomorfológico	mm/min
Planicie costera	23.79
Planicie cárstica subhorizontal baja	14.10
Dolinas agrupadas cerradas	43.50
Dolinas agrupadas abiertas	SD
Planicie cárstica ondulada	18.09
Planicie cárestica subhorizontal media	65.18

Fuente: Aplicación de la metodología epik para establecer la vulnerabilidad del agua subterránea en el estado de Yucatán, México. Emilio Rodrigo Bolio Barrios et al 2009.

Figura IV.23).- Unidades geomorfológicas del Anillo ce Cenotes y valores de infiltración de acuerdo al tipo de paisaje geomorfológico.



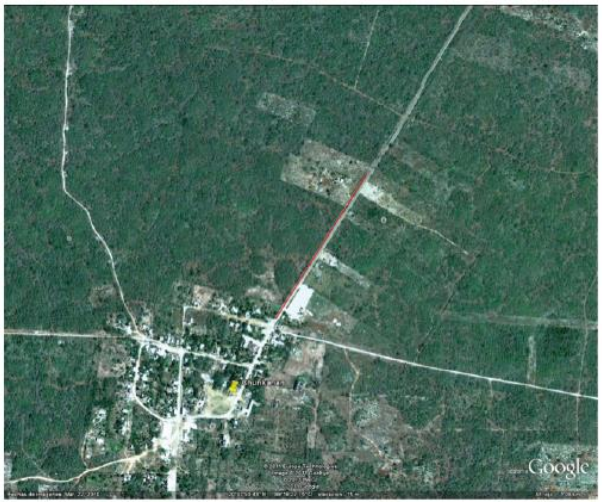
Los amplios desniveles que se observan en esta porción territorial deben su origen, casi seguramente, a la tectónica peninsular. Por muy pequeños y lentos que pudieran ser los movimientos ascendentes en el sur de la entidad, constituyen una fuerza que tiende a modificar continuamente el ciclo de evolución del territorio estatal de erosión/relleno,

debido a que en la medida que la plataforma calcárea va avanzando cada vez con mayor altitud sobre el nivel del mar, el paisaje sufre un rejuvenecimiento que intensifica el proceso cárstico tanto externa como internamente, lo que se traduce, mas tarde o temprano, en un mayor contraste entre las distintas formaciones que conforman el relieve, en lugar de tender a la nivelación del terreno, como sucede en tierras bajas del norte y del oriente, con altitudes menores. Es decir, que el movimiento ascendente del territorio modifica el resultado final, no obstante el ciclo erosión/relleno esta siempre presente. Al sur de la sierrita de Ticul las formaciones subcársticas son más amplias y desarrolladas, como las grutas (Loltún, Calchtok) y pozos naturales diseminados en el sur de Yucatán.

Los trabajos de Hernandez y colaboradores (2011), sobre la Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes, elaboraron el modelo geofísico del área de recarga de la zona geohuidrológica del anillo de cenotes. El método consiste en una sección geoeléctrica multielectrodos (72 nodos), equi-espaciados a 5 m, generando un tendido de 350 m de longitud. La capacidad de penetración en el terreno del método, si bien depende de las condiciones geológicas de la zona, se calculó en un máximo de 70 m. El arreglo utilizado fue un dipolo-dipolo y la corriente aplicada al terreno fue de 200 mA, con ciclos de 800 ms. Se corrió una sección en el cenote Xlabón Subim, zona cercana a Dzilám de Bravo, y en el cenote Chunkanan, ubicado en la Reserva Geohidrológica del Anillo de Cenotes..

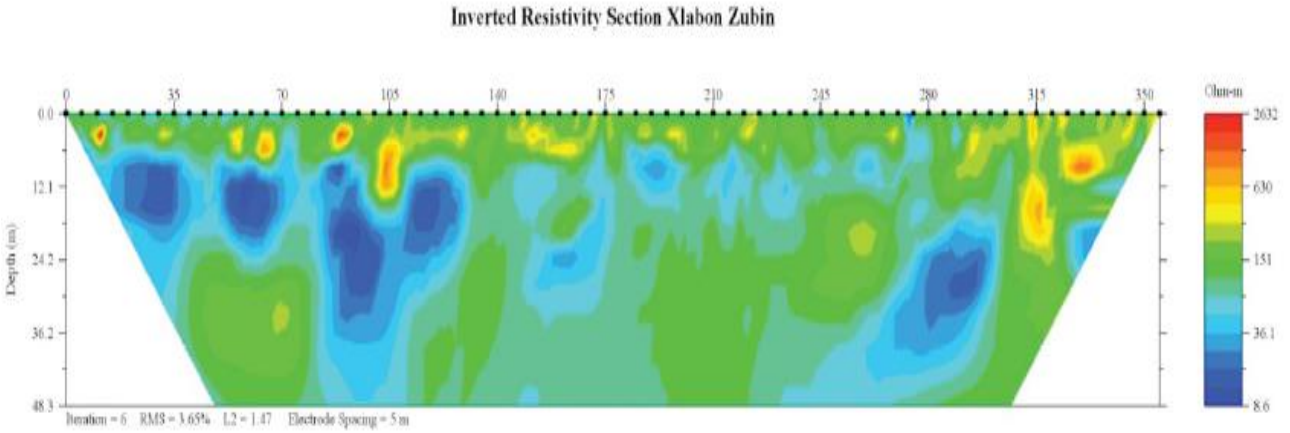
Figura IV.24).- Ubicación del tendido en Xlabon Subim (línea roja).

Figura IV.25).- Ubicación del tendido de Chunkanan



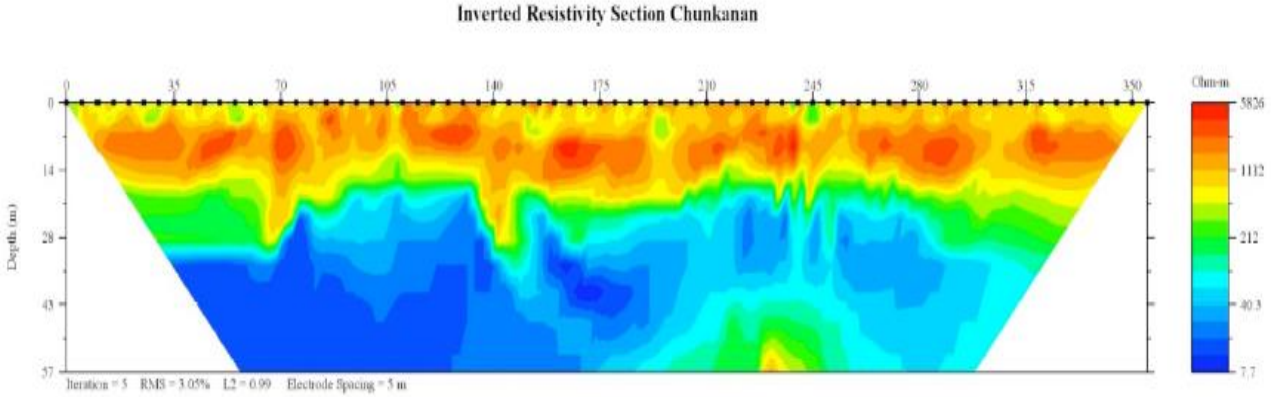
En la figura siguiente, para el caso de Dzilám de Bravo se aprecia anomalías de resistividad al inicio de esta (x=25-120 m, y= 12-24 m), que se han interpretado como intrusión salina, con base en las bajas resistividades (8.6 Ohm*m). En general la sección completa indica roca fracturada saturada con agua salobre a dulce (150 a 300 Ohm*m), presenta también una zona vadosa, o no saturada, muy pequeña, no mayor de 5 m.

Figura IV.26).- Resultado de la inversión de la sección geoeléctica en Xlabon Subim



En la figura siguiente, referido al cenote Chunkanan, en el área del la Reserva Geohidrológica del Anillo de Cenotes, se aprecia anomalías de resistividad en la base de la misma, la cual se ha interpretado como cavernas inundadas con agua dulce, con base en las bajas resistividades (38.6- 150.0 Ohm*m). En la sección se aprecia que la zona no saturada (5000 a 1000 Ohm*m) tiene un grosor promedio de 14 m.

Figura IV.27).- Resultado de la inversión de la sección geoeléctrica en Chunkanan.



En el año 2008, la empresa Consultores en Agua Potable, Alcantarillado, Geohidrología & Hidráulica Costera, I.C., realizaron un estudio geohidrologico para definir el contacto de la capa de caliche semiconfinante en el área del sur del puerto de progreso, Yucatán. En su área de estudio afloran de norte a sur, arenas de litoral recientes, lodos calcáreos, arcillas y arenas no consolidadas en la parte de la ciénaga y calizas del pleistoceno superior coronadas por una capa de caliche compacto. La consistencia y espesor de este caliche además de la ubicación del nivel freático del acuífero en la zona hacen que este actué como una capa confinante. En la parte más al sur de la zona de estudio afloran calizas del Mioceno superior- Plioceno representados por una caliza masiva compacta con restos de

fósiles. En la siguiente figura, se presenta una imagen de satélite del área de estudio cercana a la costa en donde se presentan los contactos entre las formaciones existentes.

Figura IV.28).- Contactos geológicos de la costa norte de Yucatán

Para determinar las propiedades resistivas del subsuelo se utilizaron tomografías eléctricas arregladas en 3 líneas de geofísica de las cuales la L1 (Camino del antiguo basurero de Progreso Yuc.) conto con 1,270 m lineales de exploración, la L2 en Mitza con 770 m y la L3 en Flamboyanes con 350 m para un total de 2,380 m. La distribución de las líneas se presenta en la figura siguiente. Los resultados de estos sondeos permitieron conocer la forma y distribución de las unidades geoeléctricas en el subsuelo a profundidades de 15 m aproximadamente.

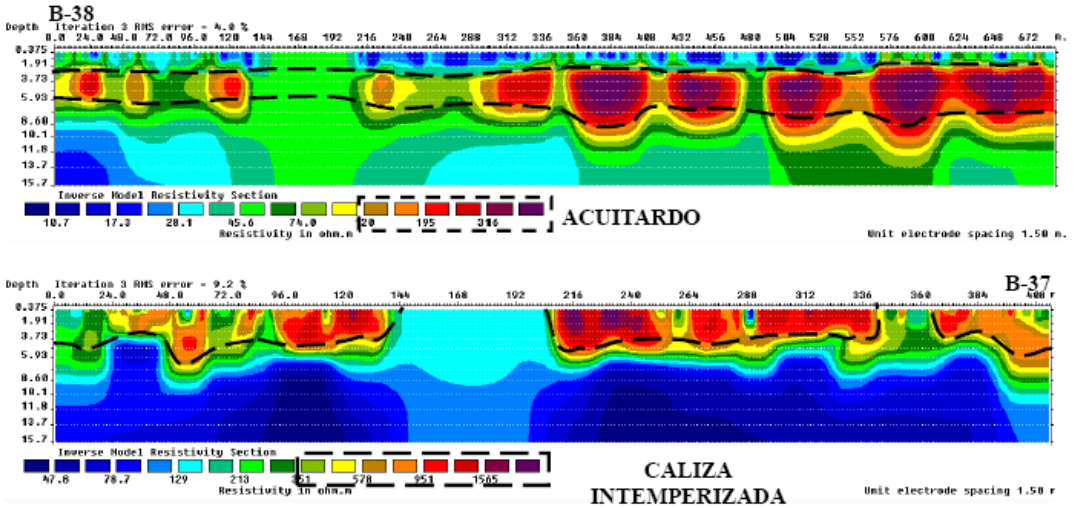
Figura IV.29).- Localización de las líneas de exploración geofísica

A continuación, se describen cada una de las secciones geoeléctricas generadas con la información de campo, haciendo énfasis en las propiedades físicas de porosidad y permeabilidad de los materiales y sus posibles asociaciones con la litología de la región.

Tomografía eléctrica L1 (Camino del antiguo basurero de Progreso Yuc)

En la tomografía eléctrica de la línea L1 la cual se presenta en dos partes en la siguiente figura**,** se puede observar una capa somera resistiva con valores entre 195 a 316 ohm-m asociada a la presencia de una capa compacta discontinua, se observa en la parte más superficial valores bajos de resistividad (17.3 a 28.1 ohmm) asociados a un relleno de poco espesor con presencia de humedad. Los valores intermedios oscilan entre 28.1 y 120 ohm-m asociados a la presencia de una roca más permeable por donde circula agua dulce o salobre. En la segunda parte de la sección se observa que la resistividad eléctrica de la capa compacta se incrementa y su espesor decrece, esto debido a un cambio en las propiedades de la roca o a la presencia de una nueva unidad litológica.

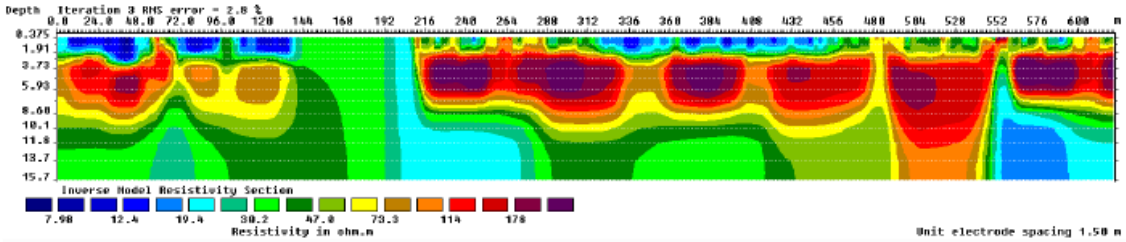
Figura IV.30).- Tomografía eléctrica L1.



Tomografía eléctrica L2 (Predio de la empresa Mitza)

En la tomografía eléctrica de la L2, se observa una unidad compacta somera con valores altos de resistividad respecto a su entorno, estos valores están entre 114 y 178 ohm-m. Al igual que la sección anterior a esta capa lo suprayace zonas superficiales de baja resistividad asociadas a material de relleno con presencia de agua de reciente infiltración. La capa compacta mantiene un espesor promedio de 2.0 m y muy probablemente corresponda a la unidad de caliche o acuitardo costero. Por debajo de esta unidad las resistividades eléctricas decrecen al encontrar material más permeable con abundante agua (ver siguiente figura).

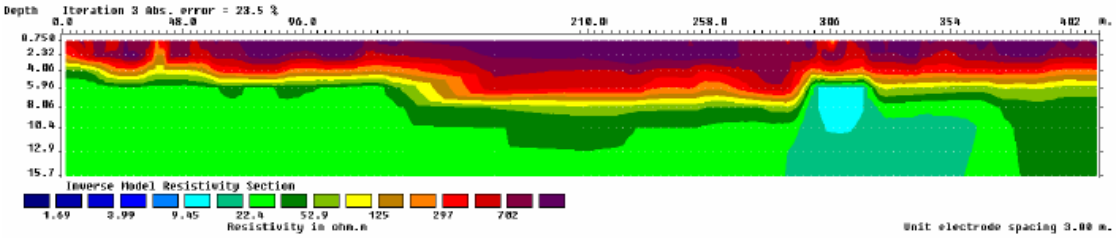
Figura IV.31).- Tomografía eléctrica L2.



Tomografía eléctrica L3 (Fraccionamiento Flamboyanes.)

En la tomografía eléctrica de la L3, localizada al sur del predio de Mitza, en terrenos del Fraccionamiento flamboyanes, se observa con mayor claridad la capa superficial que según los valores de resistividad (297 a 702 ohm-m) corresponde a una unidad de caliza compacta semipermeable con espesores entre 2 y 2.5 m. y que pudiese corresponder todavía al acuitardo costero. Se observa en el cadenamiento 306 una disminución en el espesor de la capa y una estructura más permeable a profundidad, estos rasgos pudiesen corresponder a un cambio litológico o a la alteración del acuitardo por intemperismo (ver figura siguiente).

Figura IV.32).- Tomografía eléctrica L3



Con la finalidad de verificar la presencia de la capa compacta superficial identificada en las tomografías eléctricas y poder asegurar si en verdad corresponde al acuitardo costero reportado en la bibliografía y si este además actúa como una capa confinante se programo una campaña de exploración directa mediante la perforación de barrenos cortos controlados.

Dicha campaña consistió en atravesar de manera controlada la capa compacta más superficial del terreno, una vez que se llega al techo de dicha capa y si hay presencia de agua en el fondo se retiró la herramienta de perforación y se midió el nivel respecto al terreno, una vez teniendo esta referencia se profundizo la perforación hasta atravesar por completo la capa en cuestión y medir el ascenso del nivel dentro del pozo.

Se perforaron en total 11 sondeos controlados a diferentes profundidades, de ellos 7 se ubican dentro de los terrenos de Mitza, 3 más en terrenos del fraccionamiento Flamboyanes y 1 en terrenos del ejido Paraíso. En todos ellos se midió la respuesta del nivel del agua tanto del acuífero como del acuitardo o capa confinante. En la figura siguiente, se presenta el plano de localización de los sondeos exploratorios.

Para complementar la red de medición del área de estudio, se perforaron 3 barrenos exploratorios a 20 m de profundidad cada uno los cuales se incorporaron a los ya existentes para conformar la red de monitoreo. Los barrenos perforados fueron el B-4, B-5 y B-6, durante su perforación se tomaron muestras de roca a cada 1 metro y se midió el tiempo de penetración de la barrena en el mismo tramo; con esta información se elaboraron los cortes litológicos de cada barreno. En la siguiente figura**,** se presenta la localización de los barrenos exploratorios

Con la información de los sondeos y barrenos exploratorios se definió la secuencia estratigráfica en el área de Mitza, Flamboyanes y ejido Paraíso. En esta secuencia aparece primeramente una capa superficial de relleno natural y de banco, este relleno mantiene espesores entre 0.5 y 1.5 respectivamente y apareció en los sondeos S1 a S6,

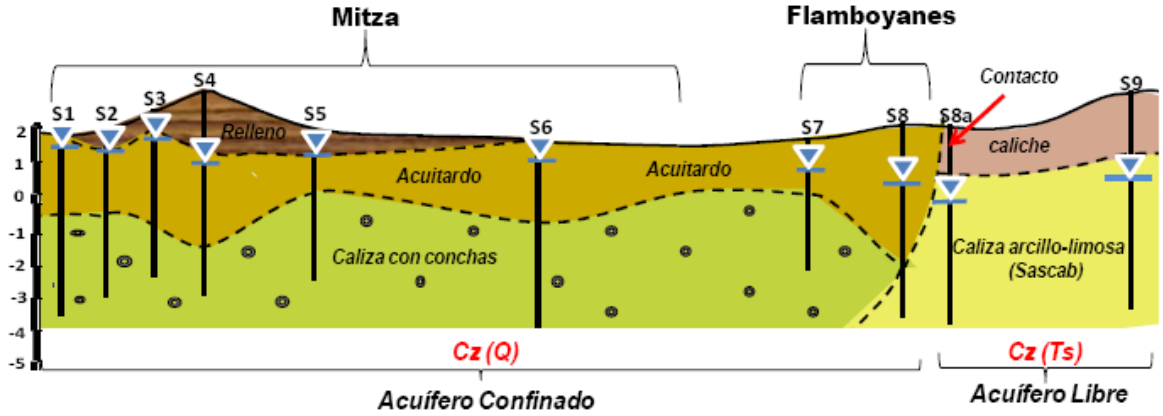
Subyaciendo al relleno superficial se identifico una capa de caliza compacta con espesores entre 0.5 y 2.90 m y que según las variaciones de nivel observadas durante su perforación corresponde a un acuitardo y que efectivamente actúa como una capa confinante del acuífero, este acuitardo tiene una extensión lateral hacia el sur hasta el sondeo S8a (límite sur del Fraccionamiento Flamboyanes). Hacia el S9, la capa compacta superficial cambia a una caliza alterada con presencia de rasgos de disolución y fósiles con espesores de 0.70 a 1.20 m, y que muy probablemente correspondan a calizas de la formación Carrillo Puerto del Mioceno superior-Plioceno, por lo cual se asume que el contacto entre estas y las calizas del Pleistoceno superior (acuitardo) pasa entre los sondeos S8 y S8a. Hacia el subsuelo en los materiales del pleistoceno superior se encontró una caliza con conchas (conchuela) mientras que en los materiales del Mioceno superior-Plioceno se encontraron calizas arcillo-limosas (sascab).

Figura IV.33).- Localización de sondeos exploratorios y plano de localización de barrenos exploratorios

Cabe mencionar que, según lo observado en los sondeos exploratorios, el contacto entre el acuífero confinado y el libre coincide con el contacto entre las calizas del cuaternario y las calizas del terciario (ver figura siguiente)

Mas hacia el sur en los barrenos B-4, B-5 y B-6, desde 5 a 20 m se encontró una caliza compacta formada por restos de conchas (coquina) con huellas de disolución.

Figura IV.34).- Sección Hidrogeológica N-S.



La zona de descarga y exposición del acuífero representado por la cuenca de inundación costera es un área de alta evaporación e impermeable, y que confina las aguas subterráneas y sus vertimientos, los cuales son muy localizados (cenotes en petenes y en

el mar, manantiales, etc.). Entre la duna costera y la llanura cárstica, el acuífero yucateco se confina por una capa de calcita precipitada por evaporación denominada acuitardo, principalmente en la porción norte de la Península, que cementa los poros y las fisuras de la coraza calcárea superficial, y cuya formación continúa hasta nuestros días, precisamente en la zona de descarga continental del acuífero en la costa: la zona denominada localmente como "tsekel" (sabana, selva inundable), la cual se caracteriza por una aparente falta de suelo.

Esta delgada capa (0.5 a 1.4 m de espesor) se extiende a lo largo de la costa norte principalmente, en una franja de 2 a 20 Km de ancho, sostieniendo un gradiente hidráulico enorme. Por detrás del tsekel y separado de ésta por una zona de transición se encuentra las formaciones cársticas características (Perry, 1989) con sus acuíferos libres.

El ambiente geoquímico propicio para la formación del acuitardo costero que menciona Perry, et al (1991) a partir de los trabajos de Harrison (citado por Perry) indican una diagénesis subaérea como el mecanismo principal para la formación de caliche, el cual requiere una fuente de calcio y carbonatos y un mecanismo de concentración (evaporación). Los primeros son proporcionados por afloramientos de agua subterránea, y el segundo ocurre acorde con las variaciones estacionales de más de 20 cm. en los niveles freáticos.

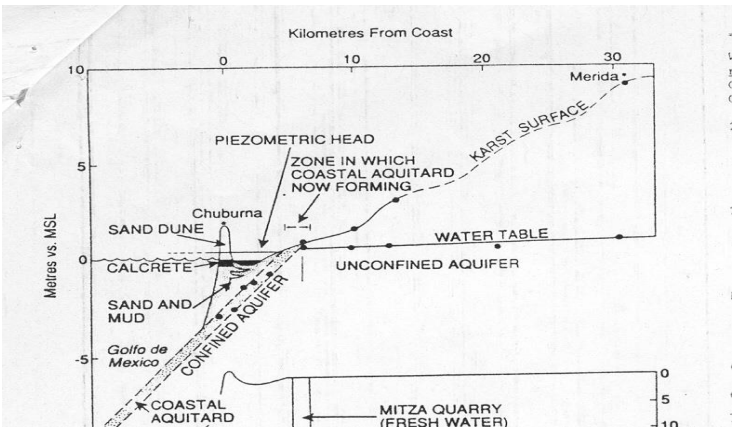
La precipitación de carbonatos, estacional y continua, durante un periodo de lenta elevación del nivel del mar pudo sellar muchas de las fisuras. Los cenotes costeros de las áreas palustres (en los llamados petenes) resultan demasiado grandes como para ser afectados por este proceso (Marín et al, 1988) y representan los principales accidentes del acuitardo costero.

Sobre este extenso acuitardo, se presentan otros dos procesos acumulativos, el primero se refiere al cordón litoral arenoso, producto de acarreos marinos, el cual protege al sur los terrenos formados por procesos biogénicos en forma de ciénagas de manglar y lagunas costeras de aguas salobres e hipersalinas, particularmente, en época de estiaje. Forman también una franja en general. La ciénaga en algunos sitios es discontinua, debido a los azolves y en otros se conservan restos que forman partes de áreas pantanosas algo extensas con inundación permanente sujetas a los efectos de las mareas.

Los depósitos arenosos de la duna costera se comportan como terrenos inestables frente a los embates del oleaje y los vientos debido a su escasa cohesión y compactación interna, con espesores mayores a los 2 metros antes de hacer contacto con el basamento rocoso. Solo muestran una incipiente consolidación superficial en aquellos lugares donde la vegetación, a través de su sistema radicular, cobertura y protección de su follaje favorece la cohesión del estrato superior.

Esta situación se presenta por lo regular en aquellos depósitos más alejados de la línea de costa propiamente dicha. Sin embargo, lejos de favorecer la transformación y evolución edáfica de estos sedimentos, la consolidación de los materiales propicia su endurecimiento progresivo, con tendencia a la desaparición de las formas originales y a la formación de una estructura masiva tipo caliche; lo anterior significa que la estabilidad de los depósitos arenosos se fundamenta en la transformación de estos en roca y no en formación de suelo, como podría esperarse (Duch, 1986).

Figura IV.35).- Principales características del acuitardo costero (Perry et al, 1989)



Este fenómeno puede apreciarse en algunas excavaciones cercanas a localidades costeras, sobre tierra firme, donde el estrato más superficial se encuentra en franco proceso de litificación; sin embargo, la variación vertical de los materiales subsuperficiales, muy similares en cuanto a su constitución física a los depósitos arenosos de las playas, se advierte el paso gradual del material suelto en las capas más inferiores. Esto sugiere la posibilidad de que éstos materiales arenosos y conchíferos se hayan conformado y desarrollado en distintos ciclos de arrastre y acumulación de sedimentos.

Todo parece indicar que tales estratos endurecidos, en alguna época de su historia geológica conformaron la posición más superficial de los depósitos arenosos y por ello, expuesta a las influencias atmosféricas y de la vegetación y sujeta al proceso de consolidación señalado. Es importante señalar que los estratos endurecidos que se observan en los cortes de las excavaciones, muestran varios rasgos de similaridad con la coraza calcárea superficial que abunda en el territorio peninsular, aún cuando no haya alcanzado el grado de dureza y consolidación que muestra en la zona sur y central (Duch, 1988).

El Atlas de Peligros en el Estado de Yucatán (2013) es el producto de la intensa colaboración científica y de campo entre el Gobierno del Estado del Yucatán a través de su Dirección Estatal de Protección Civil y el Organismo Público Descentralizado denominado Servicio Geológico Mexicano; con apoyo del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN) del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Este Atlas, es un estudio preventivo que tiene la finalidad de contribuir, en el desarrollo de procedimientos que permitan establecer estrategias para la atención, prevención, reducción, y mitigación de desastres en nuestro país. De tal forma que actúa como un instrumento que ayuda a diagnosticar los niveles de peligro y riesgo a los que puede estar expuesta la población en diversas áreas y constituye una valiosa herramienta para planear un ordenamiento y desarrollo estratégico del Estado de Yucatán.

Los peligros geológicos se pueden definir como los procesos, situaciones o sucesos que pueden generar un daño económico o social a una comunidad o población. El estado de Yucatán por su ubicación geográfica, distribución morfológica y geología asociada a las unidades litoestratigráficas que afloran, presenta características propias que lo hacen vulnerable a los peligros por fenómenos geológicos. Estos están presentes de manera natural pero, en parte, son acelerados por factores hidrometeorológicos y antropogénicos.

Existe una gran variedad de factores o causales detonantes de peligro, en términos generales se dividen en internos y externos, los primeros están directamente relacionados con el origen y las propiedades físicas del material original, como son: fallas, fracturas y erosión; mientras que los segundos son aquellos que perturban su estabilidad, ya sean fenómenos naturales como lluvias intensas, sismos, actividad volcánica, o actividades antropogénicas.

Estos factores contribuyen a acelerar los procesos que se vienen dando de manera natural a través de millones de años, para así originarse procesos de remoción en masa y sistemas de estructuras cársticas, estos últimos se manifiestan principalmente en dolinas (cenotes) y grutas, estas estructuras fueron formadas principalmente por la acción vertical de la disolución y por el paso del agua a lo largo de los sistemas de fallas y fracturas.

El grado e intensidad de fracturamiento, basado en la interpretación de lineaciones a partir principalmente de rasgos topográficos y geomorfológicos, juega un papel importante ya que puede favorecer la susceptibilidad a algunos procesos geológicos que representen una amenaza a la población, como es el caso de los hundimientos asociados a carsticidad, donde las discontinuidades en las rocas calcáreas funcionan como zonas de alta permeabilidad secundaria que condicionan la generación, propagación y desarrollo preferencial de las estructuras cársticas debido a que concentran el flujo del agua subterránea.

Con base a la distribución y disposición de las lineaciones se determinaron cinco zonas, que se pueden asociar con rasgos geológicos y geomorfológicos como sigue: Interior del Anillo de Cenotes (Zona A), anillo de Cenotes (Zona B); Sierrita de Ticul (Zona C); Noreste del estado de Yucatán (Zona D) y por último la Depresión Ignacio Zaragoza-Chumpón (Zona E).

En las Zonas A y B, se ubica la estructura geológica conocida como Cráter de Impacto, Cráter de Chicxulub o Anillo de Cenotes. En la periferia de esta estructura se ubican más de 2,000 cenotes con un rango de 50 a 500 m de diámetro y de 2 a 120 m de profundidad.

Cabe señalar que la Zona A carece de lineamientos significativos sin embargo de los pocos determinados, la mayoría tienen un rumbo preferencial NE-SW y NW-SE, en general de gran longitud, mientras que la Zona B consiste de lineamientos en arreglo ortogonal de relativamente pocas dimensiones pero numerosos, que se concentran en una franja semicircular coincidente con la distribución de los cenotes.

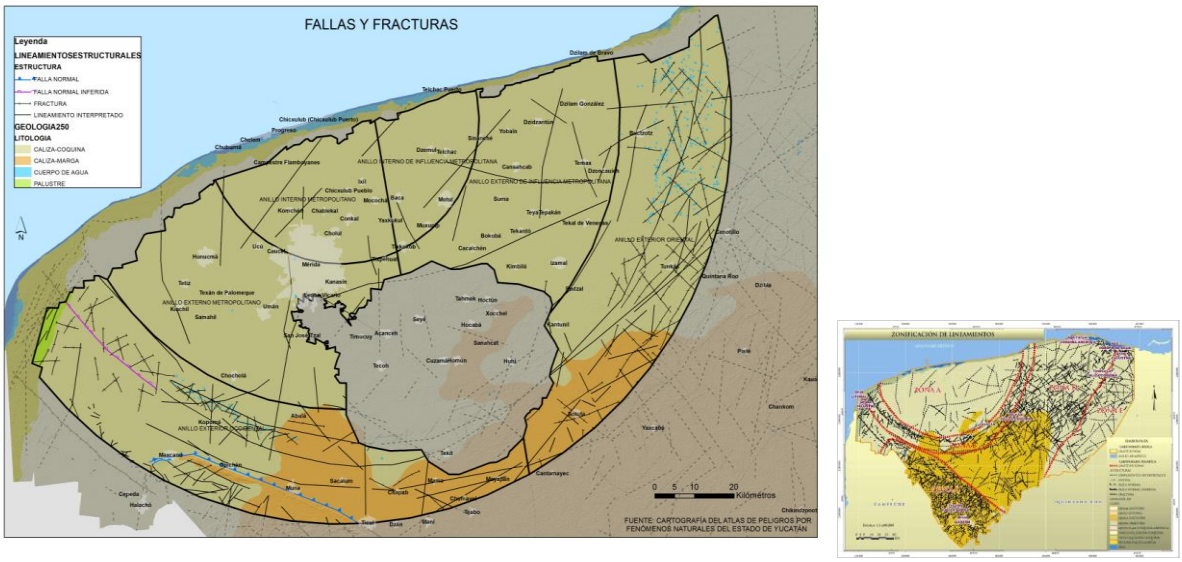
Geológicamente en la Zona A afloran estratos de caliza caracterizados por presentar ondulaciones que varían de rumbo preferencialmente hacia el NW-SE y NE-SW e inclinaciones subhorizontales de hasta 23°, por otro lado los lineamientos presentan dirección preferencial al NE-SW, N-S y NW-SE, como se muestra en la roseta de direcciones correspondiente, elaborada a partir de 49 datos relacionados principalmente a la Formación Carrillo Puerto. En esta zona las lineaciones se presentan de forma aislada con longitudes que varían de 6 a 40 Km, rara vez llegan a ser de forma conjugada. Estas lineaciones se observan en su gran mayoría asociadas a la Formación Carrillo Puerto y a una pequeña extensión de la Formación Chichén Itzá.

En la Zona B, se distribuye de manera parcial a totalmente en el territorio de los municipios de Celestún, Chocholá, Sotuta, Sacalum, Opichén, Muna, Mayapán, Maxcanú,

Mama, Kopomá, Kinchil, Kantunil, Huhí, Dzilám González, Dzilám de Bravo, Chumayel, Chapab, Tunkás, Tetíz, Tekit, Tecoh, Sudzal, Cenotillo, Buctzotz, Abalá, Kopomá. Geológicamente en esta zona los estratos presentan ligeras ondulaciones con dirección preferencial NW-SE y NE-SW e inclinaciones subhorizontales las cuales oscilan de 01° a 22°, los lineamientos presentan una dirección preferencial NE-SW y NW-SE.

Se observa cierta similitud al comportamiento de la “Zona A”, sin embargo, la dirección principal toma valores que varían de NE 60º a 75º SW, estimado con base a la roseta elaborada a partir de 113 datos de lineamientos que en conjunto forman una estructura de grandes dimensiones, de forma semicircular de aproximadamente 271 Km lineales. La relación de las lineaciones es de forma conjugada y ocasionalmente se presentan de forma aislada, la longitud de estas estructuras varia de los 6 Km a los 30 Km delimitando burdamente el contacto entre las formaciones Carrillo Puerto y Chichen Itzá, mientras que en la porción norte solo relacionada con la primera unidad.

Figura IV.36).- Mapa de lineamientos estructurales de fallas y fracturas

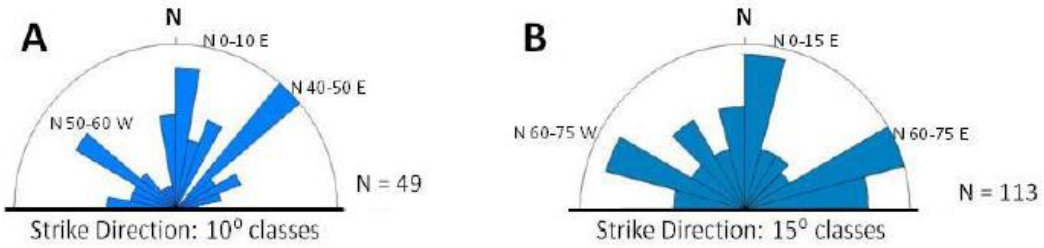


Tavla IV.3).- Longitudes de los lineamientos estructurales

TABLA DE LONGITUDES DE LINEAMIENTOS ESTRUCTURALES POR SUBZONA

	Anillo exterior occidental		Anillo exterior oriental		Anillo externo de influencia metropolitana		Anillo externo metropolitano		Anillo interno de influencia metropolitana		Anillo interno metropolitano	
	Núm.	Km	Núm	Km	Núm.	Km	Núm.	Km	Núm.	Km	Núm.	Km
TOTAL	**250**	**1,078**	**240**	**1,077**	**13**	**192**	**17**	**162**	**4**	**45**	**6**	**70.3**
DOLINA	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FALLA NORMAL	2	62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FALLA NORMAL INFERIDA	1	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FRACTURA	169	340	202	559	1	3	3	8	-	-	-	-
LINEAMIENTO INTERPRETADO	77	642	38	518	12	189	14	153	4	45	6	70.3

Figura IV.37).- Rumbos preferenciales de los lineamientos.



Debido al incremento en la demanda de materia prima (fluidos y sólidos) para el desarrollo económico de algunas regiones, se han generado problemas a nivel mundial asociados con subsidencia y colapso del terreno debido a su extracción, lo cual implica retirar volúmenes de material del subsuelo y por consiguiente el sistema tiende a la estabilidad provocando compactación y reacomodo de la estructura geológica en el subsuelo, cuyos efectos en superficie se traducen en colapsos repentinos o subsidencia gradual del terreno y generación de fracturas que afectan a la infraestructura

La mayoría de los hundimientos son de tipo antrópico, como las actividades mineras, sin embargo, existen casos importantes de subsidencia natural del terreno, uno de ellos es por disolución de rocas calcáreas que en la gran mayoría de los casos es acelerada por prácticas humanas, principalmente por extracción de agua y cambios en las condiciones químicas naturales producto de la adición de componentes que alteran al sistema. El tema de hundimiento (subsidencia), se enfoca principalmente a los colapsos históricos y recientes asociados con disolución cárstica que actualmente se observan en superficie y que generalmente reciben el nombre de dolinas y cenotes (dolinas con agua).

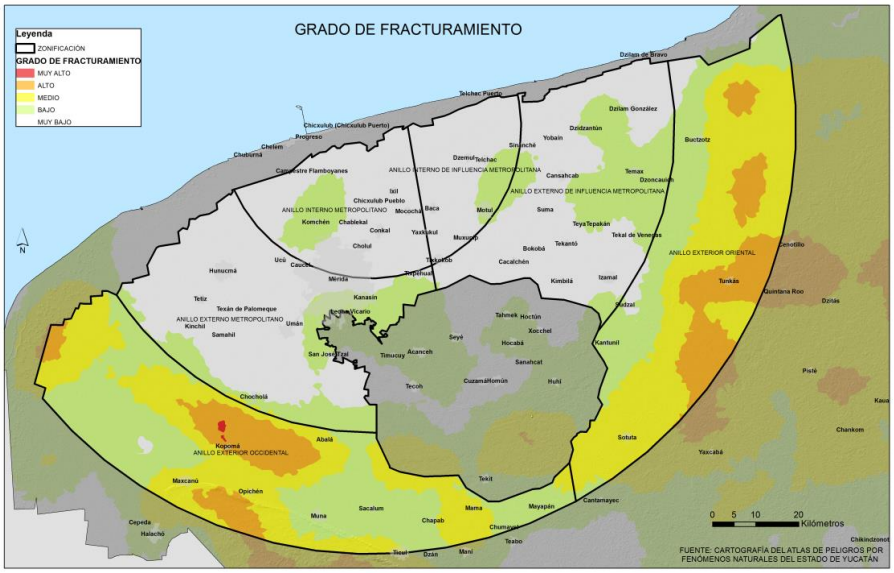
Son pocos son los reportes oficiales encontrados en la literatura de casos de colapso dentro del Estado de Yucatán. La mayoría de los reportes provienen de notas periodísticas y especialmente comentarios de los pobladores de los sitios a los que se han visitado dentro de las actividades de campo. Se han señalado de manera general la existencia de superficies de colapso en las grandes ciudades de Yucatán (Mérida y Valladolid) haciendo referencia al uso de los cenotes como espacio turístico y al desarrollo de infraestructura hotelera en estas áreas que pueden ser consideradas como sitios no aptos en términos de riesgo. De acuerdo con algunas notas periodísticas, se han reportado casos aislados de colapsos del terreno principalmente en la zona urbana de la ciudad de Mérida, como el ocurrido el 22 de septiembre de 2007 al sur de la ciudad en la colonia San José Tecoh donde se reportó la presencia de una fisura de aproximadamente tres metros de profundidad sin que se presentaran lesionados o afectación a las viviendas. Otro caso fue registrado en la colonia García Ginerés en el mes de septiembre de 2011, en dos tramos de pavimento junto a las vías del tren aledañas a la Unidad Deportiva Inalámbrica en la calle 90 entre las calles 25 y 31. Los trabajos de remediación llevados a cabo en este sitio consistieron en rellenar la caverna de aproximadamente 4 m de diámetro utilizando aproximadamente 49 metros cúbicos de piedra y 28 metros cúbicos de sahcab. En este incidente se vio afectada una de las viviendas cercanas. Existen escasos reportes en municipios de la entidad, sin embargo, se tiene reportes como el del poblado de Kantuníl, sucedido el 8 de octubre posterior al paso del ciclón tropical Isidoro (septiembre de 2002), donde se reportó un hundimiento del terreno de aproximadamente 10 m de profundidad y 5 m de diámetro, en predio ubicado en la calle 22 entre 39 y 41. Las afectaciones fueron al terreno de uso principalmente agrícola. Otro caso fue en el poblado de Oxkutzcab donde se reportaron para el mes de enero de 2007, cuatro

hundimientos, que representaron trabajos que alcanzaron una inversión de al menos medio millón de pesos, donde se argumentó que el origen de dichos hundimientos se debieron al desarrollo de “sahcaberas” en el subsuelo, sin embargo, no se tiene el registro de los estudios realizados en dichos sitios.

El Grado de Fracturamiento juega un papel importante desde el punto de vista de susceptibilidad a algunos procesos como remoción en masa y hundimientos relacionados con carsticidad. Tomando como base el mapa de fracturamiento, basado en el análisis de la densidad de fracturas, longitud de fracturas e intersección de fracturas por unidad de área, se determinaron zonas estrechamente ligados con zonas donde aparecen lineamientos relacionados con algunos de los rasgos geomorfológicos “mayores”. En este caso la zona sur es la más representativa y está relacionada con la zona topográficamente más elevada que a su vez está limitada al oriente por la Falla Ticul.

De acuerdo con la clasificación realizada, se obtuvieron cinco valores representados por el grado de fracturamiento muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto otorgándoles a su vez valores arbitrarios para su empleo dentro del proceso de análisis jerárquico. En la figura siguiente se muestra la relación entre grado de fracturamiento y densidad de dolinas.

Figura IV.38).- Mapa de grado de fracturamiento.



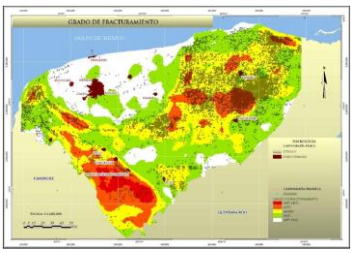


Tabla IV.4).- Grado de fracturamiento por subzona

TABLA DEL GRADO DE FRACTURAMIENTO POR SUBZONA						
1	**Anillo exterior occidental (ha)**	**Anillo exterior oriental (ha)**	**Anillo externo de influencia metropolitana (ha)**	**Anillo externo metropolitano (ha)**	**Anillo interno de influencia metropolitana (ha)**	**Anillo interno metropolitano (ha)**
MUY ALTO	495	-	-	-	-	-
ALTO	41,394	53,566	-	-	-	-
MEDIO	122,059	141,595	-	1,072	-	-
BAJO	134,066	71,904	62,462	51,562	10,200	17,643
MUY BAJO	931	8,074	132,981	148,939	57,563	86,574
	298,945	**275,139**	**195,443**	**201,573**	**67,763**	**104,217**

El término Densidad de Dolinas, se refiere a la capa de información que utiliza una base de datos de las dolinas presentes en el territorio del Estado. Esta capa de información integra el registro incompleto de aproximadamente 9,560 dolinas de las cuales 7,240 fueron determinadas a partir de la cartografía de INEGI (cartas topográficas escala 1:50,000), Cartas Geológico-Estructurales del SGM (escala 1:250,000), además de interpretaciones con la ayuda de imágenes Google; en este caso la escala más adecuada fue 1:20,000 donde se lograron observar dolinas superiores a 35 m de diámetro. Complementan el registro 2,320 estructuras que fueron integradas a partir de datos de SEDUMA.

Se toma como parámetro principal el número de cavidades cercanas a la superficie y la posibilidad de migración de la cubierta hacia el interior. Considerando que la densidad de dolinas superficiales es un índice de la presencia de cavidades en el subsuelo es posible utilizar este parámetro como representativo de susceptibilidad a hundimientos. Rocas calcáreas cavernosas, muestran la mayor cantidad de dolinas, estableciendo además que el porcentaje de calizas con dolinas y densidad de dolinas, son indicadores útiles para determinar áreas de potencial subsidencia. En este sentido las estructuras funcionan además como zonas o conductos con gran susceptibilidad de colapso.

La mayor concentración de dolinas se ubica en la parte noreste del territorio del Estado principalmente en el área de los municipios de Calotmul, Temozón, Sucilá, Espita y Tizimín, donde puede llegar a presentarse hasta 15 dolinas por kilómetro cuadrado. Por otro lado, la concentración de dolinas del centro y algunas zonas de pequeñas dimensiones en el noroeste se relacionan con el anillo de cenotes, borde del Cráter de Chicxulub.

Existen otras zonas distribuidas en el sur de la entidad, aparentemente asociadas con la Falla Ticul. La zona con relativamente menor concentración de dolinas aparece en el norte del Estado, distribuido en la parte central del anillo de cenotes, al interior del Cráter de Chicxulub el cual funciona como límite geográfico con las demás zonas.

Figura IV.39).- Mapa de la densidad de dolinas por subzona.

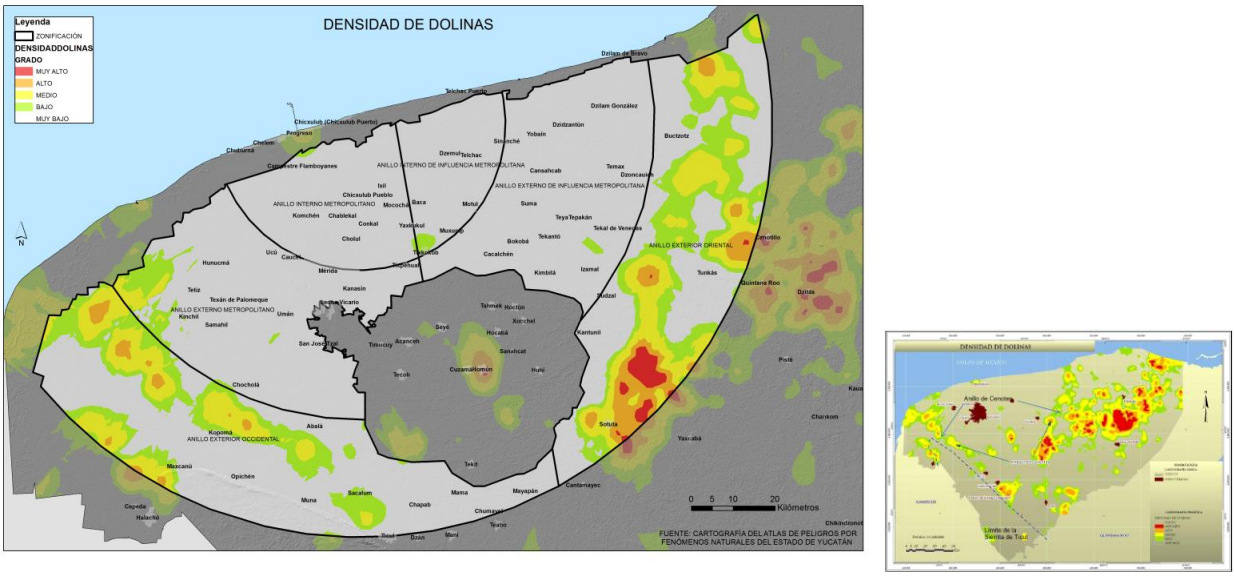


Tabla IV.5).- Densidades de dolinas por subzona

TABLA DE LAS DENSIDADES DE DOLINAS POR SUBZONA (HECTÁREAS)						
2	**Anillo exterior occidental**	**Anillo exterior oriental**	**Anillo externo de influencia metropolitana**	**Anillo externo metropolitano**	**Anillo interno de influencia metropolitana**	**Anillo interno metropolitano**
MUY ALTO	-	8,002	-	-	-	-
ALTO	5,874	23,549	-	-	-	-
MEDIO	43,436	54,923	-	4,466	-	-
BAJO	53,202	63,802	1,024	12,621	1,802	917
MUY BAJO	196,432	124,863	194,420	184,485	65,961	103,300
	298,944	**275,139**	**195,444**	**201,572**	**67,763**	**104,217**

La extracción de materiales pétreos es un factor que debe tomarse en cuenta en los fenómenos de subsidencia y/o colapsos, en la figura y tabla siguiente se presentan los predios de bancos de extracción de materiales pétreos existentes y registrados en el tramite de Factibilidad Urbano Ambiental al año 2017.

Figura IV.40).- Mapas de predios de bancos de extracción de material pétreo existente y registrado en el trámite de Factibilidad Urbano Ambiental (2018).

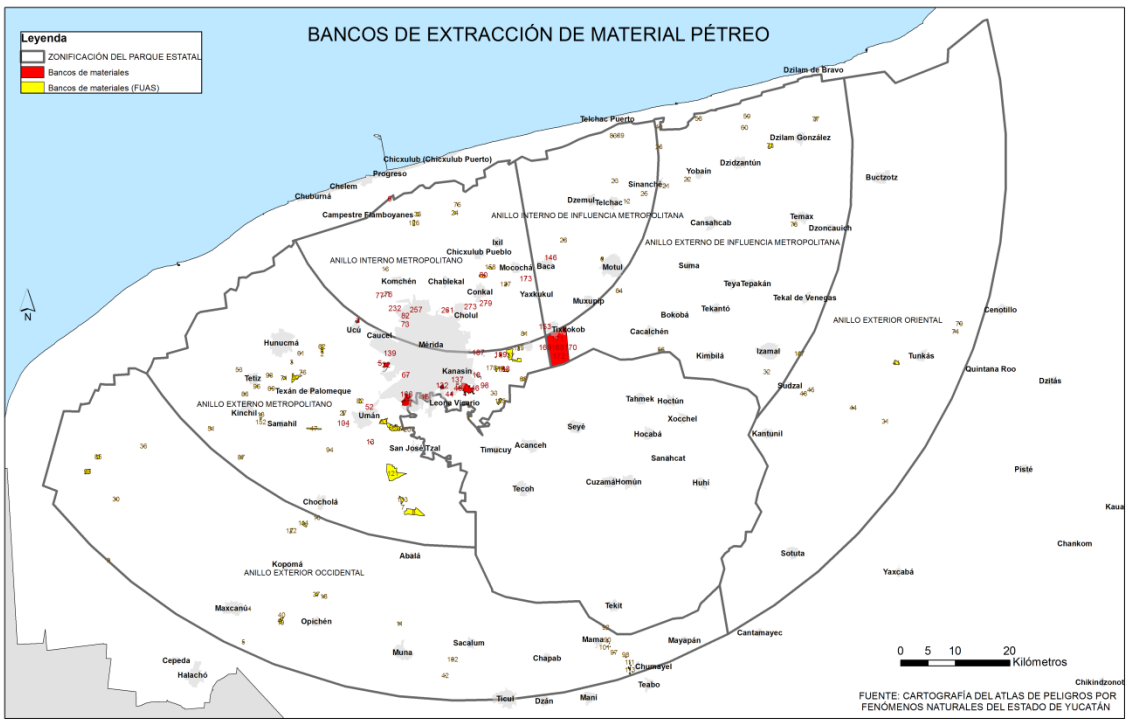


Tabla IV.6).- Superficies de bancos de préstamo.

SUBZONA	HECTÁREAS	KM2
ANILLO EXTERNO DE INFLUENCIA METROPOLITANA	**11,656.43**	**116.56**
Área de extracción	2,331.29	23.31
Terreno total	9,325.14	93.25
ANILLO EXTERNO METROPOLITANO	**2,816.78**	**28.17**
Área de extracción	413.43	4.13
Terreno total	2,403.34	24.03
ANILLO INTERNO DE INFLUENCIA METROPOLITANA	**0.03**	**0.00**
Área de extracción	0.01	0.00
Terreno total	0.03	0.00
ANILLO INTERNO METROPOLITANO	**16.67**	**0.17**
área de extracción	3.76	0.04
Terreno total	12.91	0.13
Total general	**14,489.91**	**144.90**

Tabla IV.7).- Superficies de bancos de préstamo de acuerdo a Factibilidades Urbano Ambientales.

SUBZONAS	HECTÁREAS	KM2
ANILLO EXTERIOR OCCIDENTAL	351.16	3.51
ANILLO EXTERIOR ORIENTAL	92.09	0.92
ANILLO EXTERNO DE INFLUENCIA METROPOLITANA	136.95	1.37
ANILLO EXTERNO METROPOLITANO	2,217.35	22.17
ANILLO INTERNO DE INFLUENCIA METROPOLITANA	26.98	0.27
ANILLO INTERNO METROPOLITANO	183.43	1.83
Total general	**3,007.96**	**30.08**

IV.3).- Clima

En términos generales, el estado de Yucatán tiene un clima cálido, siendo el grado de pluviosidad decreciente hacia el norte y ascendente hacia el sur. Las cantidades promedio de lluvia están dadas por la penetración de las masas de aire que arrastran nubosidad producida en la superficie del Océano Atlántico y Mar Caribe y que son regidas por los vientos alisios, las depresiones tropicales y las masas de aire polar modificadas. Los elementos del tiempo y el clima en la región yucateca, y particularmente en la zona geohidrológica del anillo de cenotes, están influenciados por las siguientes circunstancias particulares de los factores climáticos de la circulación atmosférica (Orellana, 1999):

1.- La fuerte influencia de la celda anticiclónica de las Bermudas-Azores en el Atlántico, que ocasiona un apreciable gradiente barométrico. Este es el centro generador de muchos procesos atmosféricos que influyen sobre la península. La diferencia del calentamiento entre los mares y continentes, en la porción del Atlántico medio y norte ocasiona que de forma permanente, exista una condición de altas presiones en el norte del estado de Yucatán. Para ejemplificar ésto, consideremos la condición barométrica típica del mes de marzo sobre la entidad, en la que la más alta presión atmosférica (anticiclón) está hacia la porción norte. Este fenómeno puede servir para ilustrar el gradiente pluviométrico que se presenta en la Península; el norte es semiárido y conforme se desplaza hacia el sur, la precipitación es más abundante, de tal forma que en la base de la Península, al sur de El Petén, se registran considerables cantidades de lluvia.

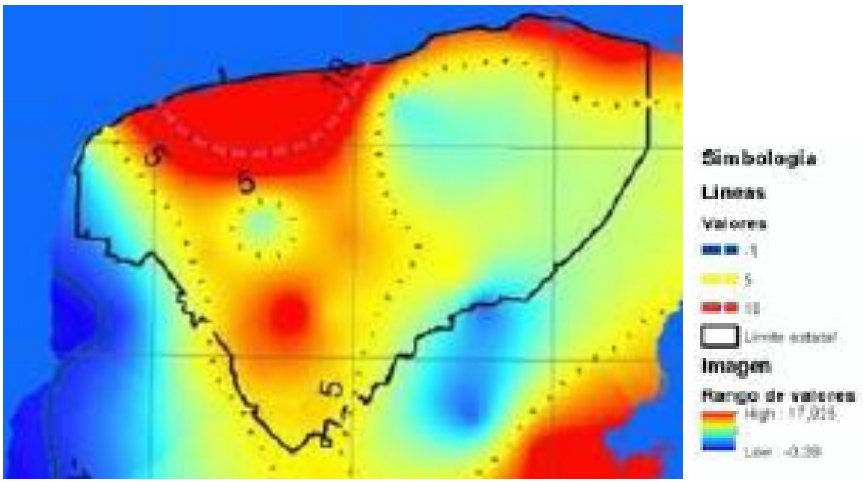
2.- La presencia en verano de los vientos alisios procedentes de la celda Bermuda-Azores que descargan el principal monto de lluvia estival. Estos vientos proceden del noreste y se

dirigen al suroeste. La circulación del aire a nivel horizontal siempre es de la alta hacia la baja presión, por lo que dichos vientos giran en el hemisferio norte en el sentido de las manecillas del reloj. Con esta trayectoria, atraviesan la porción central atlántica y el Mar Caribe, cargándose de humedad. El sobrecalentamiento del mar en el verano, ocasiona que estos vientos se enfríen al chocar con los continentes, por lo que ocasionan las lluvias de verano por movimientos horizontales o "advectivos". Si los vientos alisios vienen cargados de nubes medias y altas del tipo cumulus y estratos, el calentamiento de la superficie continental ocasiona movimientos bruscos de ascenso y descenso que dan lugar a las lluvias convectivas. Algunas nubes de gran desarrollo vertical, llamadas cumulunimbus son las responsables de los chubascos estivales, tormentas eléctricas y las granizadas ocasionales. Los vientos alisios penetran con fuerza en la Península de Yucatán entre los meses de mayo y octubre y son los que dan el principal aporte de las lluvias durante el verano.

3.- La llegada de vaguadas polares (condición de retorno del invierno) a medio verano que generan la sequía intraestival. Este fenómeno está asociado a perturbaciones que impiden la penetración de los vientos alisios con lo que disminuye considerablemente la cantidad de lluvia. En algunas porciones de la República Mexicana, durante la mitad de la estación lluviosa, se presenta un fenómeno conocido como "sequía de medio verano", "sequía intraestival" o "canícula", caracterizado por una disminución en la cantidad de lluvia que puede ser a veces de uno, dos o tres meses. Las causas de este fenómeno, que varía en su intensidad cada año, de acuerdo con Mosiño y García (1966) están dadas por interferencias sobre los vientos alisios que les impiden depositar la lluvia sobre los continentes. Esto se debe a la influencia de inestabilidades atmosféricas de capas altas provenientes de las zonas polares y denominadas "vaguadas polares".

De acuerdo a los datos procesados en el año 2009 por el Dr. Roger Orellana Lanza con un escenario base de 1961 – 1990, el evento, de acuerdo al investigador, tiene relación con una alteración en la actividad de los vientos alisios, expresado en el siguiente mapa que representa las zonas con los porcentajes de sequía intraestival. Vease particularmente el efecto que tiene sobre la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

Figura IV.41).- Sequía de medio verano o canícula, comprende un período entre 1961 y 1990. Tomado y modificado del Atlas, Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán, 2009.



La presencia de este fenómeno puede ubicarse entre el 15 de julio y el 15 de agosto sin dejar de causar estragos en los procesos productivos, en los ecosistemas y en el aspecto hidrológico

4.- El advenimiento, a partir del otoño, de las masas de aire polar modificadas o “nortes”, con abatimiento térmico de la región, vientos fuertes y una apreciable cantidad de lluvia invernal. Durante el invierno, el calentamiento térmico se presenta en el hemisferio sur, con lo que el sistema general de circulación de la atmósfera ocasiona que la Celda Anticiclónica Bermuda-Azores, se desplaza hacia el sur, no es sobrecalentada y los vientos alisios pierden fuerza. Al no ser éstos tan profundos como en verano, dejan de tener influencia sobre la precipitación en el estado de Yucatán. Sin embargo, se refuerza la circulación del oeste. Al chocar frontalmente los vientos del oeste con los vientos circumpolares, se producen inestabilidades denominadas "frentes polares", cuyo desplazamiento es de oeste a este. Estos vientos fríos abarcan grandes masas de aire que llegan hasta latitudes bajas, como es el caso del Mar de las Antillas y Golfo de México. Al pasar por estos mares, se saturan de agua, la cual es depositada en forma de lluvia; a este fenómeno se le conoce ampliamente como "norte". En el estado de Yucatán la lluvia invernal en algunos años llega a ser tan elevada que abarca más del 15 % del total anual.

5.- Las corrientes marinas son desplazamientos de grandes masas de agua en la superficie de los océanos que siguen aproximadamente los mismos patrones de circulación de la atmósfera y tienen fuerte influencia sobre los climas en los continentes. Las dos corrientes marinas cálidas que influyen sobre la Península son: 1) un ramal derivado de la Corriente Ecuatorial Norte, denominado Corriente del Caribe que recorre las Antillas. Esta masa de agua se desplaza de este a oeste atravesando el canal de Yucatán, entre el sur de Cuba y la Península siguiendo el contorno de la Península y las costas del Golfo. 2) En el Golfo de México, se presenta una corriente que sigue el contorno del continente en el sentido de las manecillas del reloj; es el inicio de la Corriente del Golfo, que desemboca en el estrecho entre el norte de Cuba y sur de Florida. Esta corriente continúa hacia el norte del Océano Atlántico.

6.- Las ondas del este y depresiones tales como las tormentas tropicales y ciclones tropicales o huracanes, que se presentan a partir del verano. Su frecuencia se intensifica hacia el mes de septiembre que es cuando se registra la mayor cantidad de depresiones. La península se encuentra entre dos zonas matrices de depresiones tropicales que eventualmente forman tormentas o huracanes: la sonda de Campeche y el Mar de las Antillas. Muchos huracanes han dejado su huella en la región por los daños ocasionados, con influencia sobre la línea de costa, la vegetación y las actividades humanas. Las ondas del este son inestabilidades que se forman en la superficie de los mares tropicales por el sobrecalentamiento ocasionado por los rayos solares durante el verano. Tal fenómeno ocasiona que se formen depresiones o zonas de baja presión sobre el océano. Dependiendo de la magnitud de esta depresión, se puede formar una tormenta tropical o un ciclón, denominado localmente en la zona caribeña como "huracán". Los huracanes y tormentas tropicales se mueven en el hemisferio norte en sentido contrario al de las manecillas del reloj y tienen una trayectoria inicial de este a oeste y posteriormente hacia el norte. Al chocar con alguna corriente marina fría se atenúan y pierden su fuerza con lo que dejan de ocasionar el mal tiempo que las caracteriza. La importancia de los huracanes es que en la actualidad conociendo su sitio de origen se puede predecir su trayectoria, que en ocasiones causa grandes estragos. Es importante mencionar que la influencia directa o indirecta de los huracanes en la Península de Yucatán proporcionan

una considerable cantidad de lluvia, sobre todo en septiembre que es el mes en el que se presenta este fenómeno con mayor frecuencia.

Para estudiar la lluvia en la península de Yucatán se tiene que entender tres procesos atmosféricos:

1.- Existe un marcado gradiente barométrico desde la zona de altas presiones del Atlántico hacia las bajas presiones. La condición anticiclónica provoca sequía.

2.- Al no existir marcada orografía en la península, las masas de aire cargadas de humedad no precipitan de manera frontal.

3.- Sin embargo, el ascenso por calentamiento de estas masas de aire, seguido por enfriamiento adiabático y posterior descenso con precipitación, son fenómenos muy comunes denominados lluvias convectivas.

Una información mas a detalle de los diversos parámetros a nivel penínsulas y estatal pueden consultarse en Duch (1988), Orellana (1999) y en la Comisión Nacional del Agua.

Principales tipos y subtipos climáticos.

A partir de lo anterior, en la zona geohidrológica del anillo de cenotes, encontramos los siguientes tipos y subtipos climáticos:

1.- Zona cálida seca con ligera estacionalidad pluvial.

Se localiza en la porción noroccidental de la península. Comprende una franja territorial que parte de Celestún por el occidente hasta Dzidzantún. Los tipos climáticos que agrupa son los cálidos secos, de áridos a semiáridos de la forma Bso(h´) y BS1(h´). Pese a que en esta zona climática existe cierta cantidad de lluvia invernal, las posibilidades de utilización de la tierra con propósitos agrícolas, desde el punto de vista de las necesidades de consumo de agua por las plantas de cultivo, se encuentran muy restringidas en diversos grados, conforme varía el monto que aporta la precipitación, la humedad que aporta solamente podría permitir un ciclo agrícola al año y seguramente bajo circunstancias azarosas y con alto riesgo de pérdida de cosechas, sobre todo en la porción noroccidental, la mas seca de todas. La actividad solo sería posible mediante la aplicación de riegos todo el año, aunque con menor intensidad en el verano. Mas allá de los arenales costeros y el cultivo de coco, la existencia de condiciones de terrenos planos y profundos favorables solo se restringe al extremo oriental.

Subtipo BSo(h')w(x')

El subtipo BSo(h')w(x') ocupa una pequeña extensión, colindante con la línea de costa, de la porción noroccidental de la entidad, entre las localidades de Sisal y Telchác Puerto. Siendo representativo de las condiciones térmicas y pluviométricas estipuladas en la definición general de los climas BS(h')w(x'), este subtipo se distingue por ser el más seco de ellos, condición que se refleja en el cociente p/t que varía entre 17.4 y 22.4, muy abajo del límite de 22.9 que lo separa del subtipo BS1(h')w(x') relativamente menos seco. En el área que le corresponde, la temperatura media anual varía entre 25.5 y 26.5 y la precipitación total en el año entre 450 y 580 mm aproximadamente, con un porcentaje de lluvia invernal entre 10.5 y 12, además de que la cantidad de lluvia en el mes más

húmedo (septiembre) si alcanza a ser 10 veces mayor que la que recibe el mes más seco, tal como sucede en cualquier localidad de la porción occidental de Yucatán, independientemente del monto anual de la precipitación; en adición, el fenómeno canicular muestra una más acentuada y regular manifestación que en otras porciones del estado de Yucatán. La variación anual de las temperaturas medias mensuales oscila entre 4 y 5 oC por lo cual se considera isotermal. Asimismo, se observa que la temperatura media mensual más alta corresponde a mayo, lo que significa que el régimen térmico tiene un comportamiento tipo ganges. Bajo estas condiciones la fórmula climática completa queda expresada de la siguiente manera: BSo(h')w''(x')ig.

Subtipo BS1(h')w(x')

El subtipo BS1(h')w(x') es el más extendido de los climas cálido-secos que aparecen en el estado de Yucatán. Salvo la pequeña superficie que le corresponde al subtipo anterior, éste conforma totalmente la franja territorial que se despliega a todo lo largo de la costa norte de Yucatán. La principal característica que lo distingue de aquél es su mayor grado de humedad, el cual se expresa en los valores del cociente p/t que varían entre 23.2 y 27.6, superando el límite de 22.9 establecido para separarlos entre sí. Este subtipo climático se caracteriza también porque la temperatura media anual fluctúa entre 24.7 y 26.4 oC y la precipitación total en el año lo hace entre poco menos de 600 y 700 mm. El porciento de lluvia invernal es siempre mayor de 11.0 pero menor de 17.0. Sin embargo, la precipitación que recibe el mes más húmedo (septiembre) no alcanza a ser 10 veces mayor que la del mes más seco, tal como sucede en las distintas localidades que se encuentran en el centro y oriente de Yucatán, cualquiera que sea el monto anual de su precipitación. El fenómeno canicular aparece regularmente entre julio y agosto, pero con menor grado de intensidad. Del mismo modo que en todas las localidades costeras, la temporada de lluvias regulares no se estabiliza sino hasta junio, quedando mayo en la temporada seca. El mes de abril es siempre muy seco y conforme se avanza hacia el oriente, noviembre se ubica en la temporada húmeda, lo cual podría significar un aparente desplazamiento de la época del temporal respecto a lo que ocurre tierra adentro. para completar la simbología correspondiente se incluye, finalmente, la de la condición isotermal, dada la pequeña oscilación que experimentan las temperaturas medias mensuales en el transcurso del año. Por otro lado, siendo junio el mes más caliente, no es necesario agregar ningún símbolo más, con lo cual la fórmula climática queda expresada como sigue: BS1(h')w''(x')i.

2.- Zona cálida semiseca con marcada estacionalidad puvial.

Se extiende por toda la zona del anillo de cenotes, el norte de la planicie interior y al sur de la entidad, se distribuye sobre los declives del a Sierrita de Ticul que se despliegan hacia el suroeste, desde Maxcanú hasta Becanchén en el extremo más sur. Esta zona es la más extendida de la entidad. Comprende localidades con clima del subtipo Awo(i´)g. En la porción septentrional, y en relación a la actividad agrícola, puede señalarse que el hecho de que la precipitación está concentrada en mas del 80 % durante mayo a octubre, al mismo tiempo el mes más caliente, limita la eficiencia para el consumo vegetal. Primero porque llueve mas de lo que se requiere, favoreciéndose pérdidas por evaporación e infiltración y, segundo, por el largo e intenso período de sequía entre el otoño y el invierno. Si bien el temporal es suficiente para el desarrollo de cultivos adaptados, durante la estación invernal es indispensable el riego para satisfacer la demanda de los cultivos. En la porción sur de esta zona, si bien es parecida a la anterior, el marcado descenso térmico del invierno puede disminuir la evaporación, con la subsecuente disminución de

aplicar el riego invernal. Además de que esta porción territorial se destaca por la presencia de áreas mas o menos extensas con suelos planos, profundos y arcillosos, lo cual modifica favorablemente los niveles de humedad disponible para el crecimiento vegetal. En la actualidad esta porción del territorio corresponde con una de las zonas agrícolas de mayor desarrollo en la entidad.

Subtipo Awo

El clima correspondiente al subtipo Awo, se distingue por ser el más seco (o menos húmedo) de los climas cálidos-subhúmedos con lluvias en verano. la temperatura media anual varía entre 24.5 y 27 oC, mientras que la temperatura media del mes más frío en ningún caso desciende más allá de los 20.5 oC. En relación a la precipitación, se aprecia una amplia variación entre 838 y 1,128 mm, con un porcentaje de lluvia invernal menor de 10.2 pero siempre mayor de 6. Por lo regular el mes más lluvioso es septiembre cuyo monto es consistentemente 10 veces mayor que el del mes más seco. Como regla general, la marcha anual de la precipitación en este subtipo climático indica que la época de lluvias regulares se inicia en mayo, mes a partir del cual el temporal se estabiliza. Sin embargo, en localidades cercanas a la costa ello no ocurre sino hasta junio. Conforme se avanza tierra adentro, el subtipo Awo adquiere la expresión típica de los climas subhúmedos con lluvias en verano. Este subtipo climático se caracteriza también por la eventual ocurrencia del fenómeno canicular (sequía de medio verano), durante un breve periodo entre los meses de julio y agosto, aun cuando no se pueden precisar las razones de su ausencia en unas localidades y su presencia en otras, así como sus diferentes grados de intensidad dentro de una misma área territorial en la que las localidades consideradas muestran el mismo subtipo climático. El tipo AWo (i')g, se distingue por la pequeña magnitud que existe en la oscilación de sus temperaturas medias mensuales a través del año, con valores entre 5 y 7 oC. El símbolo g indica que la marcha anual de la temperatura es de tipo ganges, es decir, que el mes más caliente, en este caso mayo, se presenta antes del solsticio de verano. El subtipo Awo (i')g se distribuye en su mayor parte sobre la porción occidental del estado de Yucatán, abarcando desde las vecindades de Buctzotz en su límite oriental hasta el extremo sur, cerca de Becanchén, sobre el sotavento de la sierrita de Ticul.

Figura IV.42).- Mapa de tipos climáticos del estado de Yucatán.

Fuente: Atlas de Peligros de Fenómenos Naturales en el estado de Yucatán (2013)

Las características físico - geográficas del área de estudio, y en general para prácticamente la porción norte de Yucatán, existe relativa homogeneidad espacial de las temperaturas, no así desde el punto de vista de su distribución dentro del año para cada estación o localidad geográfica.

La información básica para el análisis fue la temperatura máxima mensual, media mensual y mínima mensual para todo el período de observación de cada estación, Progreso (1961-1980) con 20 años y Mérida (1921-1992) con 72 años, como representativos de la zona costera y continental respectivamente.

La temperatura media anual para toda la región de estudio oscila entre 24.5 oC y 25.5 oC, es decir, que la diferencia espacial máxima para estos valores promedios es de solo 1 oC, y el coeficiente de variación del valor medio anual no excede el 5 %.

Cuando se analiza la distribución mensual de las temperaturas medias mensuales se evidencia que los meses de más alta temperatura son mayo y junio entre 27 oC y 29 oC y los de más baja temperatura los meses de diciembre y enero entre 22.3 oC y 23.7 oC. Si se analiza en detalle y con mayor rigor la distribución mensual de las temperaturas medias mensuales en las cercanías a la costa y tierra adentro, tomando como ejemplos las estaciones Celestún (extremo noroccidental), Progreso (extremo noriental) y Mérida (extremo suroccidental), se puede apreciar la tendencia de que, siguiendo la zona costera de oeste a este, generalmente las temperaturas medias mensuales aumentan en la mayoría de los meses en décimas de grado, mientras que en la dirección norte en general se aprecia una disminución de la temperatura para los meses invernales y un aumento para los meses de verano, aún en décimas de grados. Los coeficientes de variación de los valores mensuales oscilan generalmente entre el 6 % y 10 %.

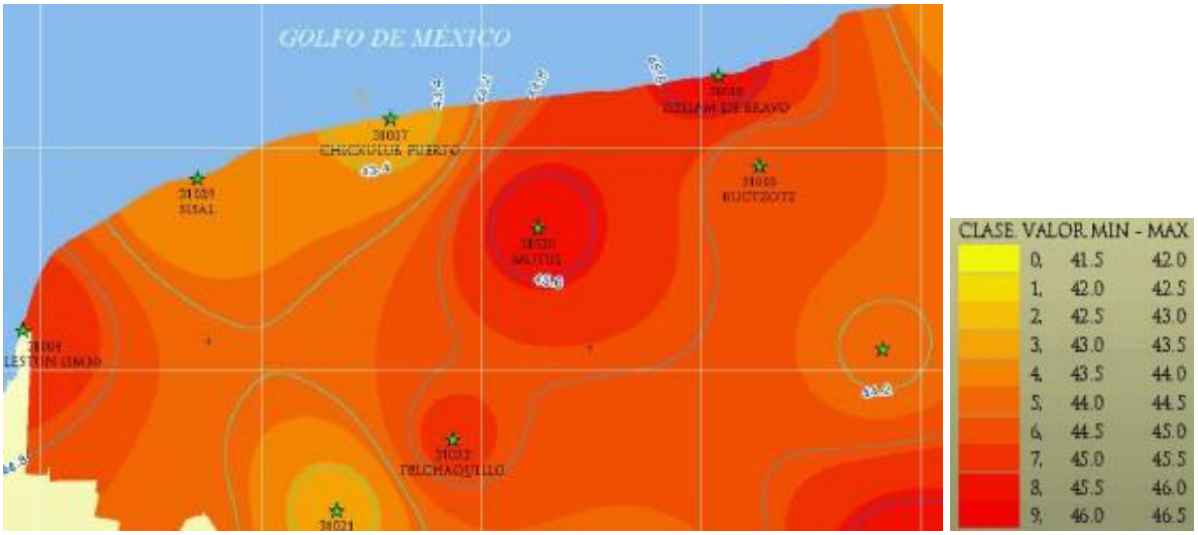
Si se analizan las temperaturas máximas mensuales, los meses de abril a junio reportan valores del orden de los 38.5 oC a los 40.3 oC para la generalidad de las estaciones, siendo los meses de diciembre y enero de valores más bajos, del orden de los 30.7 oC a los 33.4 oC.

La variabilidad mensual de las temperaturas máximas mensuales es relativamente baja, oscilando entre el 5 % al 7 % la generalidad de los coeficientes de variación, mostrando cierta homogeneidad temporal para los diferentes años y para las distintas estaciones al no mostrarse significativas diferencias entre éstas.

En cuanto a las temperaturas mínimas mensuales, la generalidad de las estaciones tiene valores entre los 18 oC y 22 oC en los meses de junio a agosto, casos excepcionales son las localidades de Hunucmá y Progreso; entre 16.7 oC y 17.7 oC y entre 25.1 oC y 25.2 oC para los mismos meses, respectivamente.

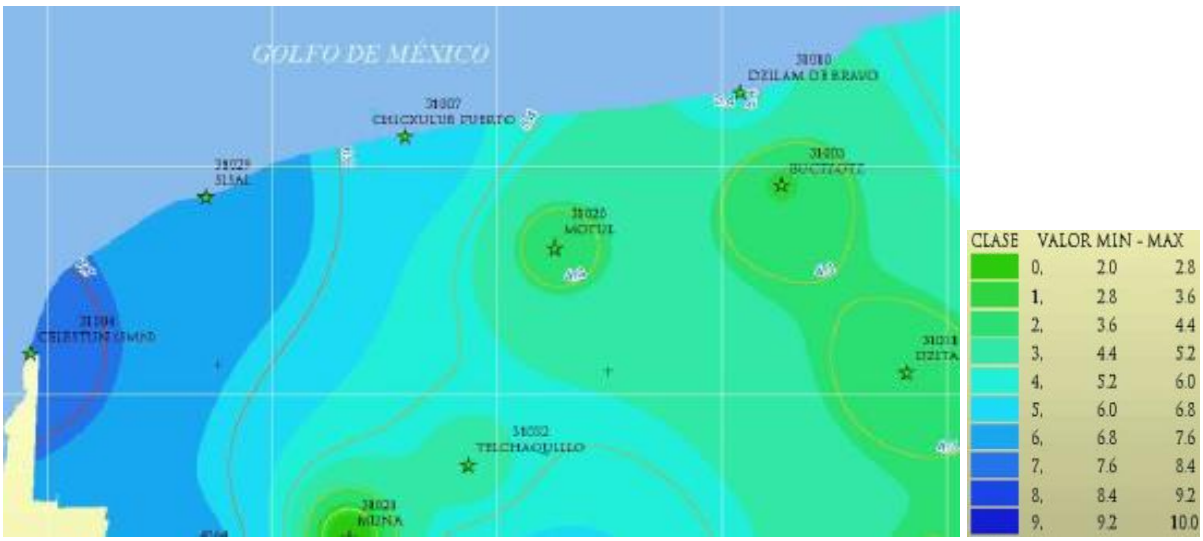
La variabilidad mensual de las temperaturas mínimas mensuales es relativamente alta, comparando con las analizadas anteriormente. Los valores del coeficiente de variación oscilan entre el 18 % y 30 % en la generalidad de los años y de las estaciones. Caso excepcional es la localidad de Progreso en que sus coeficientes de variación oscilan entre 6 % y 8 % aproximadamente.

Figura IV.42).- Distribución de los valores registrados de temperatura máxima en la zona geohidrológica del anillo de cenotes.



Fuente: Atlas de Peligros de Fenómenos Naturales en el estado de Yucatán (2013)

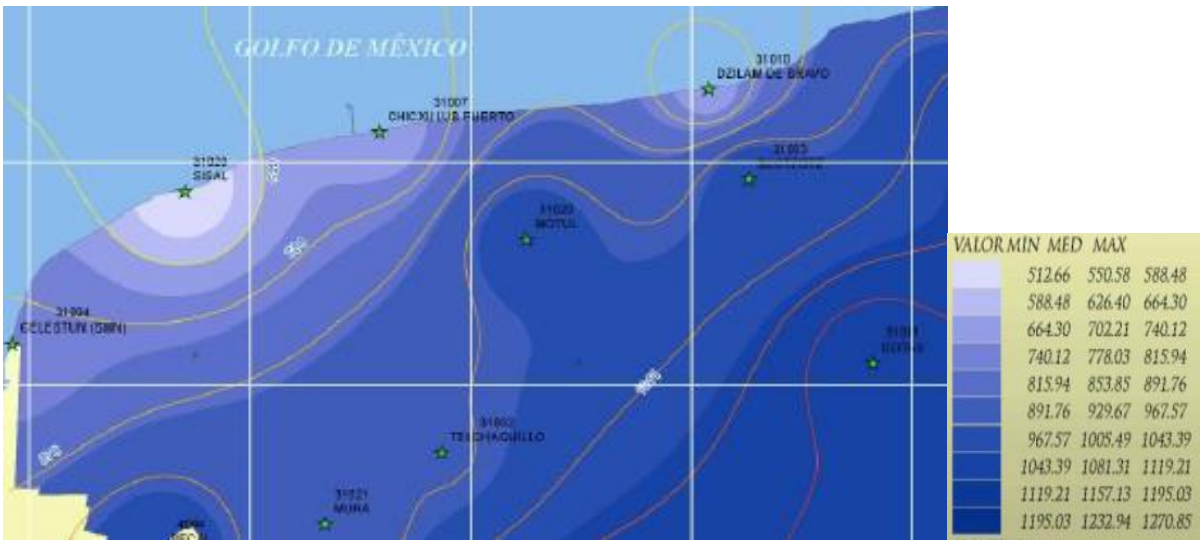
Figura IV.43).- Distribución de las temperaturas mínimas registradas en 40 años (1960-2000) en la zona geohidrológica del anillo de cenotes.



Fuente: Atlas de Peligros de Fenómenos Naturales en el estado de Yucatán (2013)

La lluvia es el más importante de todos los factores ambientales que influyen en el tipo de vegetación que se encuentra en el territorio. Como principal elemento de entrada y fuente de humedecimiento en la ecuación anterior, oscila, en términos promedio, entre los 400 mm a 1,000 mm anuales para el área de estudio, aumentando de la costa hacia tierra adentro (sur y sureste), siendo el periodo húmedo o de lluvias entre Mayo y Octubre y el periodo seco entre los meses de Noviembre y Abril. Sin embargo, durante el huracán Gilberto, la precipitación en Septiembre superó en algunos casos los 500 mm.

Figura IV.44).- Distribución de la precipitación anual registrada en el periodo de 1960 al 2000 en la Zona Geohidrológica Anillo de Cenotes.



Fuente: Atlas de Peligros de Fenómenos Naturales en el estado de Yucatán (2013)

Es notorio entonces que la precipitación presenta grandes variaciones de un año a otro y la de varios sucesivos, puede uno ser muy seco, el siguiente de lluvias torrenciales y el siguiente con precipitaciones moderadas, en sí no hay una tendencia general y más aún en la Península donde se presentan ciclones o efectos de Norte periódicamente, lo que tiene el efecto de variar el régimen de precipitación. Por lo que a continuación presentarremos los datos de precipitación de un año seco, que justamente se presenta previo al la presencia de un huracán, y los datos del año en qiue se presentó el huracán Gilberto en 1988. Además estos datrosa coinciden con los trabajos del Dr. Luis Marín de su estudios doctorales sobre la Geohidrología del anillo de Cenotes, previo y posterior al huracán.

Tabla IV.8).- Precipitación total mensual en 19 estaciones climatológicas (mm) para el año 1987.

Municipio	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGT	SEP	OCT	NOV	DIC
Abala	7.50	34.50	45.20	0.00	5.00	248.00	206.00	223.00	120.00	0.00	59.00	0.00
Buctzotz	20.70	55.30	49.70	1.00	12.70	349.90	156.00	123.80	190.50	30.10	12.40	18.50
Dzan	5.50	2.00	23.00	8.00	38.00	238.60	256.50	180.00	186.00	70.50	14.50	38.50
Dzilam de Bravo	2.00	8.50	69.50	21.50	3.00	90.00	91.10	67.00	60.00	12.60	18.00	0.00
Izamal	2.70	66.10	14.50	0.50	0.00	0.00	153.30	24.50	37.50	17.00	26.50	15.00
Kinchil	10.00	26.00	51.50	2.00	8.50	271.50	281.50	157.50	148.50	27.00	12.50	14.50
Motul	6.60	38.40	0.00	0.00	0.00	0.00	332.10	188.30	128.00	53.30	74.80	28.80
Progreso	6.40	60.40	70.30	3.30	1.00	321.70	95.40	27.10	40.90	11.10	10.00	23.10
Rio Lagartos	11.50	61.00	70.00	17.50	6.33	105.00	51.50	62.50	89.50	57.00	14.50	13.00
Sotuta	7.50	43.80	69.70	8.00	45.10	185.40	328.90	169.70	164.90	20.20	7.00	29.30
Telchac Puerto	3.00	0.00	5.00	12.00	15.00	102.00	61.00	16.80	44.60	33.00	26.80	21.00
Tecoh	2.00	0.00	7.00	3.00	40.00	63.40	398.00	162.10	49.00	8.00	0.00	0.00
Celestun	6.00	22.80	35.80	1.50	1.00	219.10	147.20	87.60	101.70	145.00	5.30	20.03
Peto	7.60	18.00	124.00	5.00	0.00	151.00	195.00	129.00	137.00	29.00	24.00	4.00

Mococha	13.00	27.00	54.50	13.00	0.00	206.30	171.30	126.30	55.00	49.20	7.80	0.00
Ticul	2.00	2.00	37.00	12.00	39.00	209.00	153.50	145.00	118.00	30.50	40.50	9.50
Kantunil	14.00	57.50	31.50	5.50	0.00	250.00	204.50	71.00	178.00	21.00	37.50	2.50
Dzidzantun	0.00	34.20	3.50	0.00	0.00	106.40	57.60	8.50	21.40	0.00	0.00	24.50
Merida	0.00	0.00	55.50	5.00	0.00	0.00	170.50	142.40	115.50	2.00	43.40	7.60

Tabla IV.9).- Precipitación total mensual en 19 estaciones climatológicas (mm) para el año 1988, con la presencia del huracán Gilberto en el mes de Septiembre.

Municipio	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGT**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**
Abala	0.00	0.00	0.00	0.00	51.00	332.50	393.00	0.00	0.00	154.00	24.50	49.50
Buctzotz	37.20	3.40	20.70	0.00	17.30	292.50	262.20	114.10	139.40	67.50	23.50	28.60
Dzan	58.50	0.00	20.50	0.00	11.00	598.00	206.60	119.10	287.60	37.60	37.00	71.00
Dzilam de Bravo	39.00	8.00	0.00	0.80	1.00	146.00	0.00	0.00	0.00	8.00	19.40	52.00
Izamal	51.80	4.50	0.00	1.00	11.50	63.50	43.40	43.00	92.20	24.00	13.50	12.00
Kinchil	54.00	5.00	11.50	0.00	0.00	0.00	132.50	141.00	581.50	121.50	33.00	45.80
Motul	0.00	4.60	6.80	9.30	60.10	248.90	150.40	258.40	336.40	44.60	41.90	101.50
Progreso	73.00	1.70	5.30	2.40	13.40	186.70	104.60	87.20	327.10	34.30	30.30	27.50
Rio Lagartos	57.50	8.50	10.50	11.60	69.50	110.50	170.50	86.50	168.50	38.50	125.00	34.82
Sotuta	89.30	2.40	49.20	16.70	55.10	298.00	213.40	376.50	584.30	130.30	52.40	10.30
Telchac Puerto	32.20	0.00	0.00	0.00	22.80	212.20	69.60	54.50	353.30	45.30	18.80	7.00
Tecoh	98.00	0.00	0.00	0.00	60.00	164.00	186.00	64.00	264.00	18.00	15.00	16.00
Celestun	16.70	1.00	1.70	1.20	18.10	155.40	133.60	190.50	570.50	37.40	61.40	1.00
Peto	92.80	5.00	23.00	3.00	23.00	215.00	223.00	158.00	161.50	21.20	35.00	49.00
Mococha	52.00	2.50	15.00	2.50	23.50	291.00	160.00	100.90	286.00	48.20	23.80	0.00
Ticul	86.50	2.50	18.00	0.00	16.00	289.00	137.00	203.50	269.00	76.50	29.00	51.00
Kantunil	68.00	19.00	14.00	1.50	18.50	362.00	20.15	204.50	521.00	170.00	88.00	42.50
Dzidzantun	29.00	0.00	25.40	31.60	35.00	99.60	25.50	30.70	18.80	32.80	22.20	59.60
Merida	100.70	3.10	1.00	7.50	0.00	435.40	218.60	0.00	298.60	69.00	29.00	30.60

En la temporada de lluvias, las formaciones nubosas más características son del tipo cúmulos y estrato cúmulos con lluvias por la tarde. Para los meses de septiembre a noviembre se presentan cúmulos de gran desarrollo vertical, que producen las más intensas precipitaciones y en ocasiones se prolongan hasta las primeras horas de la noche. Este tipo de precipitación se conoce como de origen convectivo. De diciembre en adelante y en presencia de "nortes", las formaciones más importantes son cirros y cirrostratos de nubosidad alta.

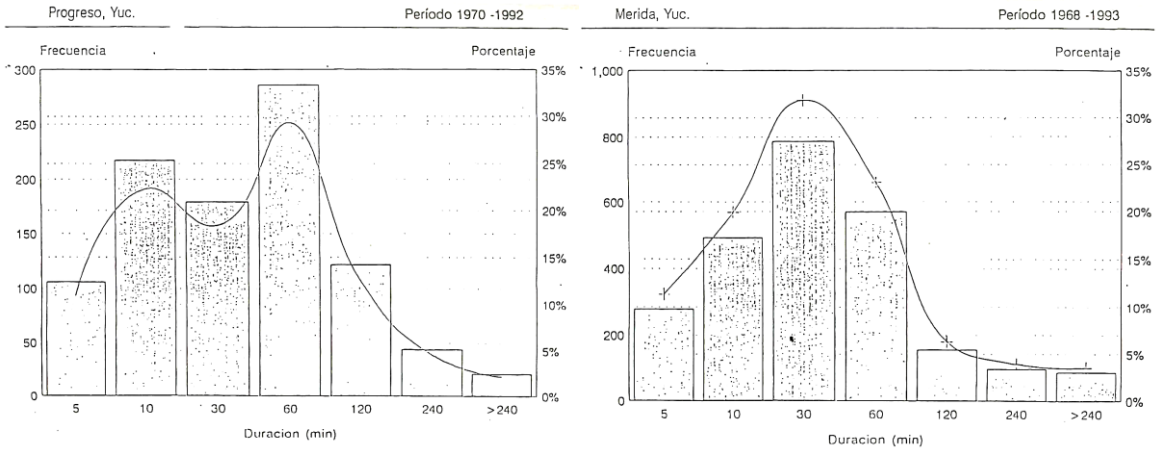
El valor representativo de la lluvia total anual de una cuenca hidrológica está dado por el valor promedio de este para un periodo lo suficientemente largo en que se compensen los años húmedos y secos. Este valor se denomina precipitación total anual promedio para el periodo hiperanual. Para el caso de Progreso la serie cuenta con 66 años, para Mérida son 72 años los que conforman el periodo de muestra de la población de datos, se estimó la sumatoria, la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación para todos los años representados en la muestra. Los totales anuales en correspondencia con las

probabilidades del 25 % (años húmedos), 50 % (años medios) y 75 % (años secos), Para el caso de Mérida, los valores medios (50 %) encontrados agrupan a casi el 25 % de los datos anuales de la serie utilizada de 72 años, lo que puede indicar su bajo coeficiente de variación en la serie original (0.16), mientras que para Progreso esta variabilidad se incrementa a 0.37. La homogeneidad encontrada en la variabilidad de los datos de Mérida, permite suponer que la dispersión de los valores de precipitación durante los años secos no supera en magnitud a los encontrados en años húmedos.

Para Progreso la prueba de ciclicidad muestra ciclos donde se compensan años secos y años húmedos, que fluctúan entre 9 y 12 años. Para el caso de Mérida se evidencia la presencia de varios ciclos que varían de 9 a 11 años siendo los más frecuentes los 10 años donde se compensan años lluviosos y años secos. La variabilidad no afecta la distribución general de la serie. De manera general, los meses de mayor lámina de lluvia van desde mayo hasta octubre, definiéndose de hecho el período húmedo dentro del año, mientras que en el resto de los meses, de noviembre hasta abril, se considera el período seco. Por lo general puede estimarse que para las zonas costeras el período húmedo representa entre el 85 % y el 90 %, del total de la lluvia, y el período seco el 15 % al 10 % en realidad, mientras que hacia el interior o tierra a dentro, el período húmedo es aproximadamente el 78 % al 82 %, y el período seco el 22 % al 18 %. Es característico además que los meses más lluviosos de todo el año para toda la región son agosto, septiembre y octubre siendo los más secos marzo y abril

Se obtuvieron y analizaron registros de lluvias de distinta duración, con esta información se elaboró un histograma de frecuencias para cada una de las series de datos (ver figuras siguientes). Es de hacer notar que el promedio de lluvias por año es de 42.4 y 94.8, para los Municipios de Progreso y Mérida, respectivamente. La distribución de frecuencias de las lluvias de Mérida predomina las de 30 minutos, y con menos frecuencia las de 60 y 10 minutos, mientras que para el caso de Progreso las de mayor frecuencia fueron las de 60 minutos, siguiéndole en orden decreciente las de 10 y 30 minutos.

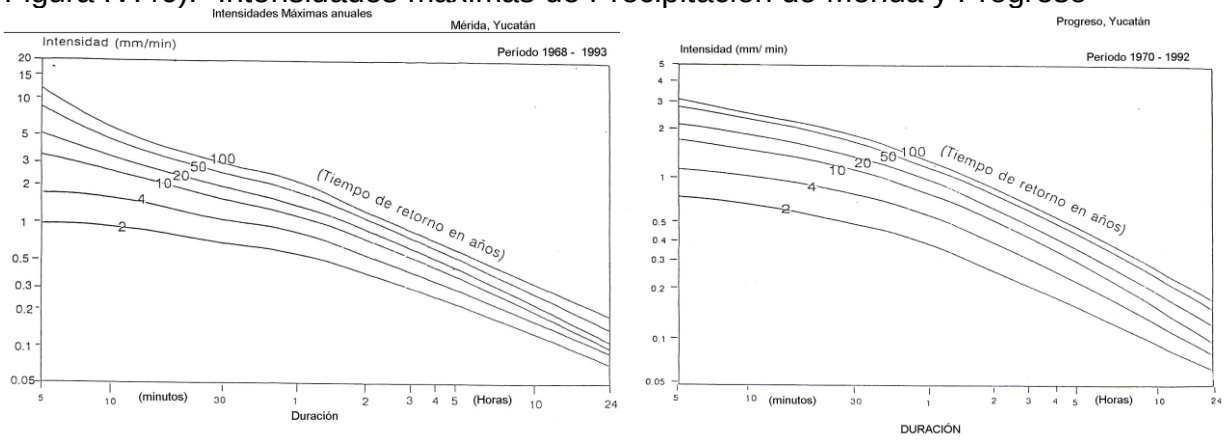
Figura IV.45).- Histograma de frecuencias de duración de la precipitación para Progreso y Mérida.



Con el fin de conocer las magnitudes de las intensidades, para distintos tiempos de duración de las lluvias de acuerdo a su probabilidad, frecuencia o tiempo de retorno en que ocurren las máximas y establecer una comparación entre las dos estaciones, se elaboró la familia de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (I-D-F) para cada una de ellas (ver figura siguiente). En estos gráficos puede observarse que para el caso de Mérida una lluvia con duración de 5 minutos y un tiempo de retorno de 100 años, las

intensidades son superiores a 12 mm./min, mientras que para el Municipio de Progreso es de aproximadamente 3 mm./min. Las intensidades de mayor ocurrencia (tiempo de retorno de 2 años), para un tiempo de duración de cinco minutos es entre 0.8 a 1 mm./min en el caso de las dos estaciones. Para las lluvias con una duración de 30 minutos, de mayor frecuencia en las localidades de Mérida y con un tiempo de retorno de 100 años, corresponde a una intensidad de 3 mm./min, mientras que para el Municipio de Progreso, con lluvias de mayor frecuencia con duración de 60 minutos y para el mismo tiempo de retorno, su intensidad es menor, con un valor de 1.5 mm./min.

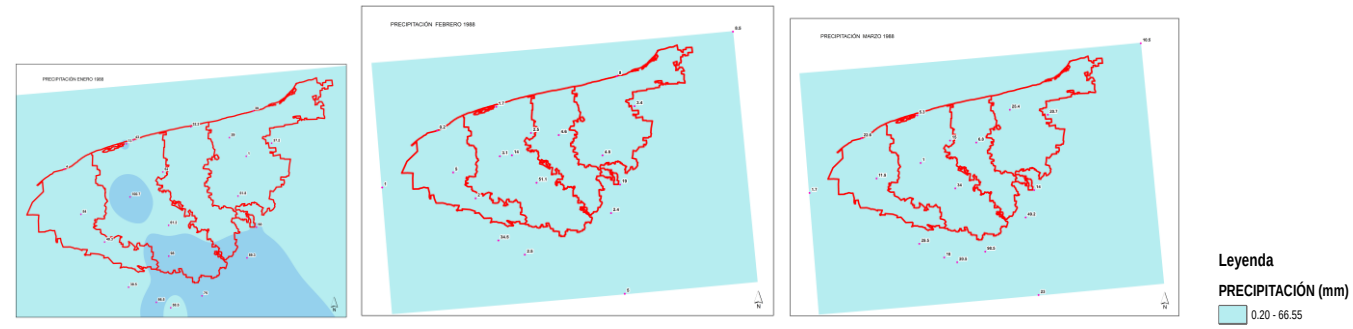
Figura IV.46).- Intensidades máximas de Precipitación de Mérida y Progreso



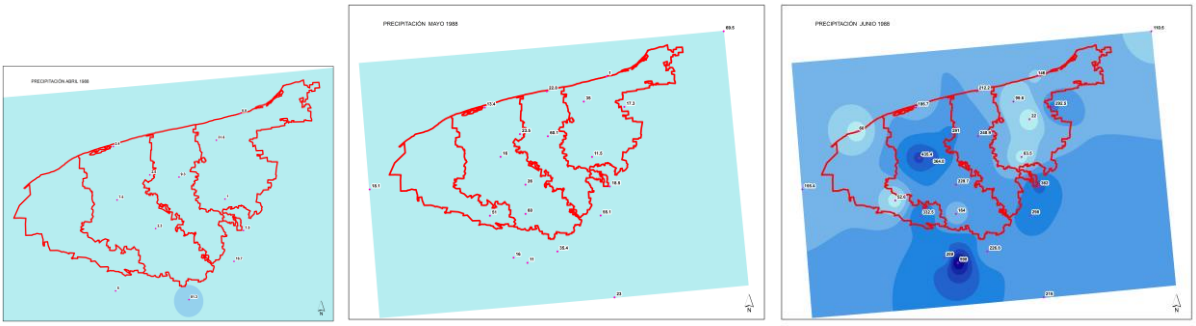
A continuación se presentas el ciclo anual de precipitación para el año 1988, año del huracán Gilberto, el cual nos servirá posteriormente para comparar con datos de evaporación y de altura de manto freático. Las figuras muestran las zonas en que el COTASMEY dividió a la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

Figura IV.47).- Precipitación mensual para el año 1988 en la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

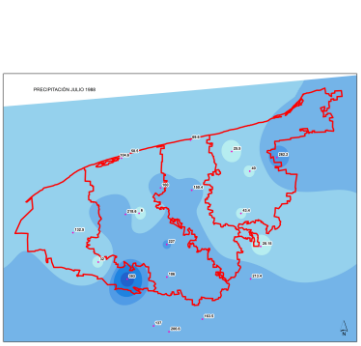
Enero, febrero y marzo

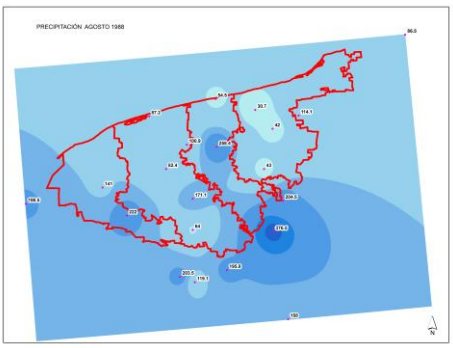


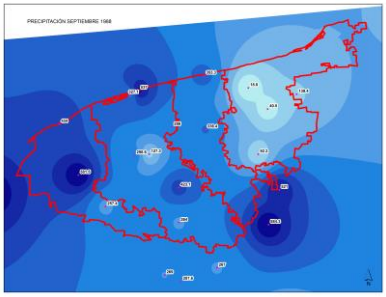
Abril, mayo y junio



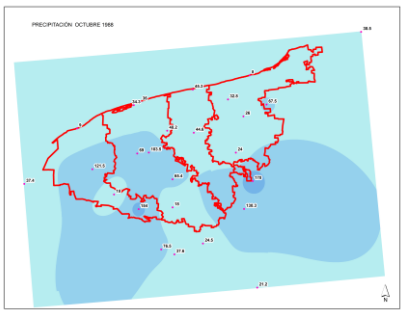
Julio, agosto y septiembre

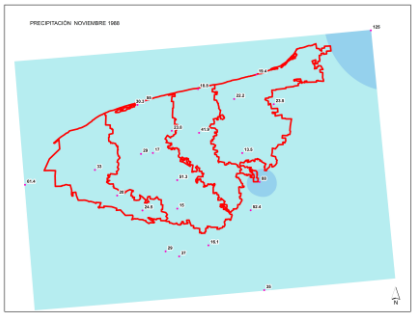


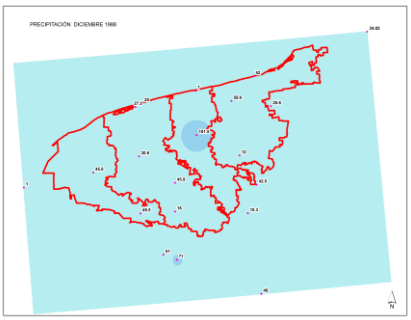




Octubre, noviembre y diciembre







El análisis de la insolación se realizó solamente para las estaciones que contaban con tales observaciones, Mérida y Progreso, que, además, pueden considerarse como representativas de la zona más continental la primera y como representativa de la zona litoral o costera la segunda.

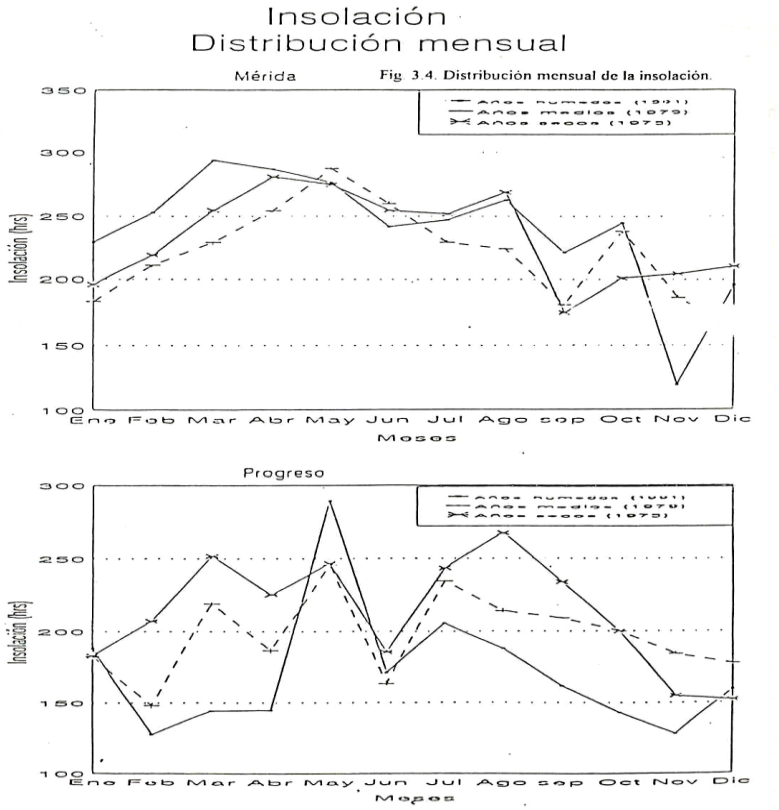
Para la primera localidad (Mérida), el valor promedio de insolación mensual es de 235.4 horas-sol, siendo los valores máximo y mínimo extremo mensual, para todo el período de observación (1970-1992) de 334.6 horas-sol y 119.4 horas-sol, respectivamente.

El valor del coeficiente de variación de la insolación mensual promedio y para todo el período de observación fue del 6.7 %, mientras que, para los valores mensuales por año, estos coeficientes de variación oscilan entre el 8.9 % y el 19.1 %. Para esta misma localidad, los meses de mayor insolación son abril y mayo con promedios de 259.7 horas-sol y 278.9 horas-sol, respectivamente, mientras que los meses de menor insolación son noviembre, diciembre, enero y febrero, con valores entre 208.1 horas-sol y 217.2 horas-sol.

Para la localidad de Progreso, zona litoral costera, el valor promedio de insolación mensual es de 200.2 horas-sol, siendo los valores máximos extremos y mínimos extremos mensuales para todo el período (1970-1992) de 289.3 horas-sol y 101.4 horas-sol, respectivamente.

El valor del coeficiente de variación de la insolación mensual promedio y para todo el período de observación fue de 10.2 %, mientras que, para los valores mensuales por año, estos coeficientes de variación oscilan entre 8.1 % y 25.1 %. Los meses de mayor insolación para esta localidad son agosto, abril y mayo, con promedios de 224.1 horas-sol y 220.6 horas-sol, respectivamente, mientras que los meses de menor insolación son diciembre, enero y febrero, con valores entre 180.5 horas-sol y 189.8 horas-sol.

Figura IV.48).- Distribución mensual de la insolación



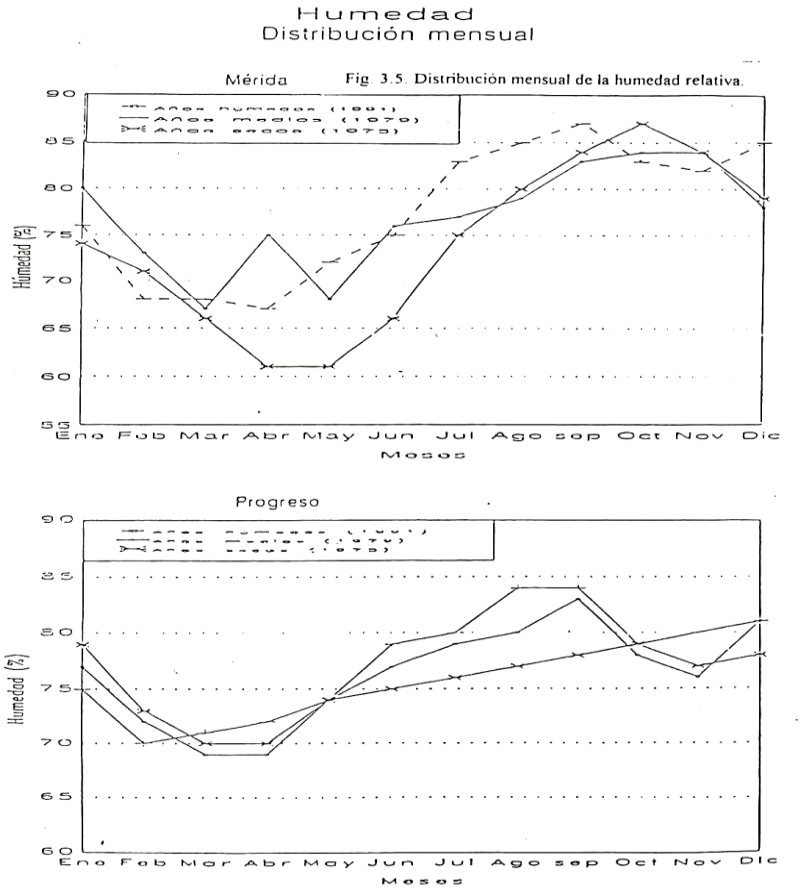
Para la humedad relativa se analizaron las observaciones medias mensuales para las estaciones de Mérida y Progreso, continental y costera respectivamente. En el caso de Mérida, el valor promedio de humedad relativa mensual es de 76.0 %, con un valor máximo y mínimo extremo mensual para todo el período de estudio (1970-1992) de 90 % y 60 % respectivamente.

El valor de coeficiente de variación de la humedad relativa mensual promedio para todo el período de observación fue de 2.1 %. En el caso de los valores mensuales por año, los coeficientes de variación oscilan entre 5.4 % y el 11.7 %. En Mérida los meses con mayor humedad relativa son agosto, septiembre y octubre con valores promedio entre 84 % y 82 %, mientras que los meses con menor humedad relativa son marzo, abril y mayo con valores que van 68 % a 65 % .

En el caso de Progreso, zona costera, el valor promedio de humedad relativa mensual para el período de observación (1970-1992) es de 77.0 % siendo los valores máximos y mínimos extremos mensuales de 86 % y 66 % respectivamente.

El valor del coeficiente de variación de la humedad relativa promedio y para todo el período de observación fue de 0.8 %, y para el caso de los valores mensuales por año, su coeficiente de variación oscila entre 3.8 % y 7.1 %, los meses de mayor humedad relativa para esta localidad son julio, agosto y septiembre con valor homogéneo del 81 %, mientras que los meses de menor humedad relativa son marzo y abril con 73 % y 71 % respectivamente.

Figura IV.49).- Distribución mensual de la humedad atmósferica.



La tensión de vapor fue analizada de igual modo que el anterior para las estaciones de Mérida y Progreso y para un período de observación de los 22 años (1970-1992).

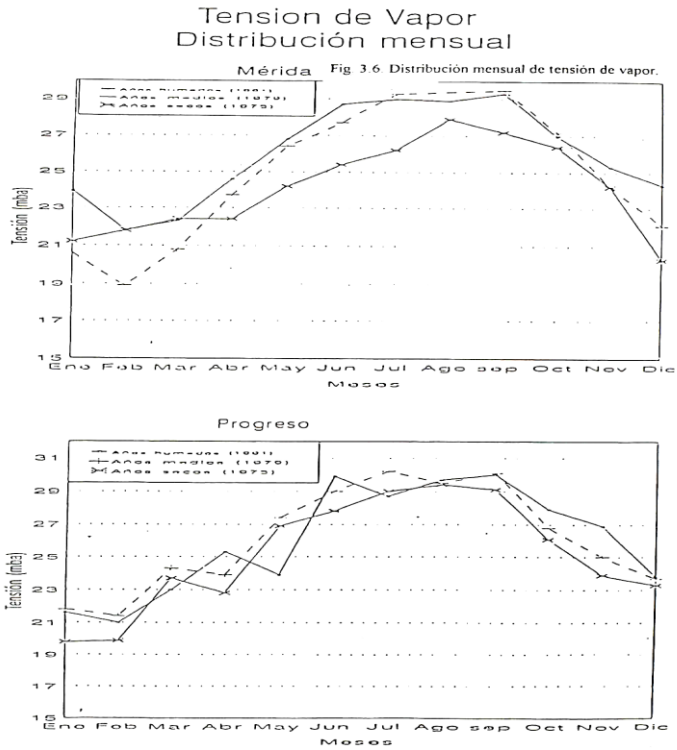
Para la localidad de Mérida, zona continental, el valor promedio de tensión de vapor mensual es de 24.9 mba, siendo los valores máximo y mínimo extremo de 30.8 mba y 17.6 mba, respectivamente.

El valor del coeficiente de variación de la tensión de vapor mensual promedio y para todo el período de estudio fue de 2.2%, mientras que para los valores mensuales por año, los coeficientes de variación oscilan entre el 10 % y 17 %, para esta localidad los meses de menor tensión de vapor son de enero a marzo, con promedios entre 21.8 mba y 20.3 mba y los meses de mayor tensión de vapor son agosto y septiembre con 28.9 mba y 29.0 mba respectivamente.

Para la localidad de Progreso, el valor promedio de tensión de vapor mensual es de 26.2 mba, con valores máximos y mínimos extremos para todo el período de observación de 31.8 mba y 18.3 mba respectivamente.

El valor del coeficiente de variación de la tensión de vapor mensual promedio es de 2.1 % con valores mensuales por año que oscilan entre 10 % y 17 %. Para esta localidad, los meses de menor tensión de vapor son enero y febrero con 22.0 mba y 21.8 mba respectivamente, mientras que los meses de mayor tensión de vapor son los meses de agosto y septiembre con valores de 30.0 mba en ambos casos.

Figura IV.50).- DFistribución mensual de la tensión de vapor.



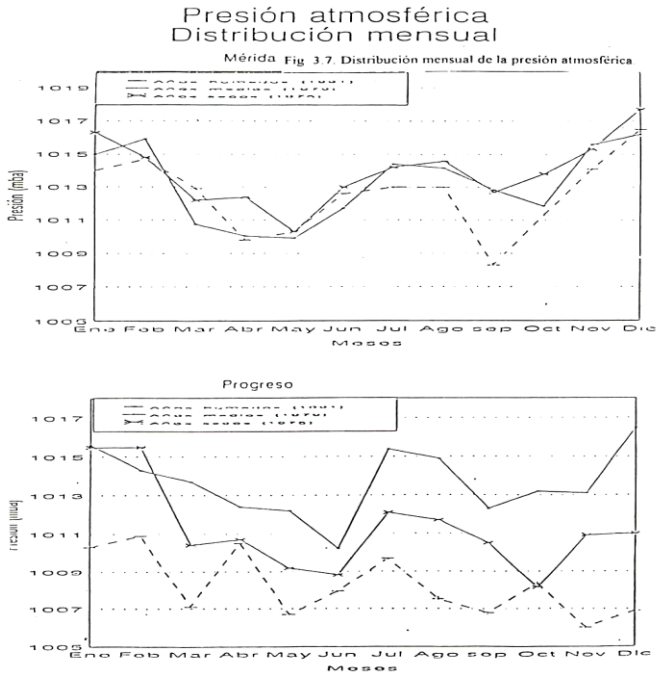
La presión atmosférica fue realizada también para las localidades de Mérida y Progreso con un período de observación de 70-92. Para el caso de Mérida, el valor promedio mensual de la presión atmosférica de la serie fue de 1012.75 mba, con un máximo extremo de 1,018.5 mba y un mínimo extremo de 1,008.2 mba. El valor del coeficiente de variación mensual de la presión atmosférica y para todo el período de observación es de 0.069 % lo que evidencia la homogeneidad de la serie.

Los valores del coeficiente de variación por año oscilan entre 0.12 % y 0.24 %. Para esta localidad los meses con mayor presión atmosférica son diciembre y enero con promedios de 1,015.16 mba y 1,015.27 mba, respectivamente y los meses donde se presenta la menor presión atmosférica son abril y mayo con 1,011.27 mba y 1,010.08 mba, respectivamente.

Para la localidad de Progreso, el valor promedio mensual de la presión atmosférica es de 1,011.95 mba con un máximo extremo de 1,073.8 mba y un mínimo extremo de 1,001.2 mba para todo el período de observación.

El valor del coeficiente de variación de la presión atmosférica mensual promedio fue de 0.27 %, mientras que, para los valores mensuales por año, los coeficientes de variación oscilan entre el 2.3 % y el 0.16 %, para esta localidad los meses de mayor presión atmosférica mensual promedio son diciembre y enero con 1,013.4 mba en ambos casos, los meses donde se presenta la menor presión atmosférica mensual son septiembre y octubre con 1,010.95 mba y 1,010.56 mba respectivamente

Figura IV.51).- Distribución mensual de la presión atmósferica



El movimiento principal del aire, a que queda sometida la región está regido por el centro anticiclónico de las Bermudas-Azores. Los vientos dominantes provienen del sureste y forman parte de las corrientes de los alisios. El anticiclón sigue hacia el norte y hacia el sur los movimientos del sol, lo cual provoca que las masas de aire sufran un debilitamiento en invierno y una acentuación en el estío, en consecuencia los vientos dominantes cambian también y da lugar para que intervenga la corriente occidental, donde grandes masas de aire se desplazan del centro de alta presión al norte de Estados Unidos y Canadá con aire frío y seco se humedecen al pasar por el Golfo de México formando los nortes que levantan el nivel medio del mar en casi un metro afectando de 15 a 20 metros de playa, con vientos del noroeste que se dejan sentir a partir del mes de julio.

Los vientos que acompañan a los nortes alcanzan velocidades de 26 m/s, las principales formaciones nubosas son los cirros y estratocirros y dan origen a la precipitación con origen frontal o ciclónico. Estos vientos, junto con los denominados Chikin´ik (vientos del noroeste), además de levantar el nivel medio del mar en casi un metro afectando de 15 a 20 metros de playa tienen la particularidad de introducir por las bocas de las rías y los bajos inundables, grandes cantidades de agua de origen marino a las ciénagas protegidas por la barra arenosa, transportándola a contracorriente. Los vientos provenientes del norte y del noroeste llegan a viajar a velocidades de casi 7 m/s promedio a una altura de 2.5 m sobre el suelo y alcanzan velocidades de 3.8 a 5.5 m/s a solo 10 cm del suelo, lo cual ejerce una fuerza extraordinaria para levantar los sedimentos de la playa y transportarlos a distancia (observaciones de campo). Las masas de aire sufren un debilitamiento en invierno con velocidades promedio de hasta 1.56 m/s y una acentuación en el estío (mayo) con 4.2 m/s. La región se encuentra ubicada también en el trayecto de tormentas tropicales y huracanes que tienen origen en el Atlántico y el Caribe Oriental. Estos fenómenos atmosféricos son estacionales y se inician en el mes de julio y terminan en noviembre, algunos ejemplos son el huracán Gilberto en 1988, Opalo y Roxana en 1995,

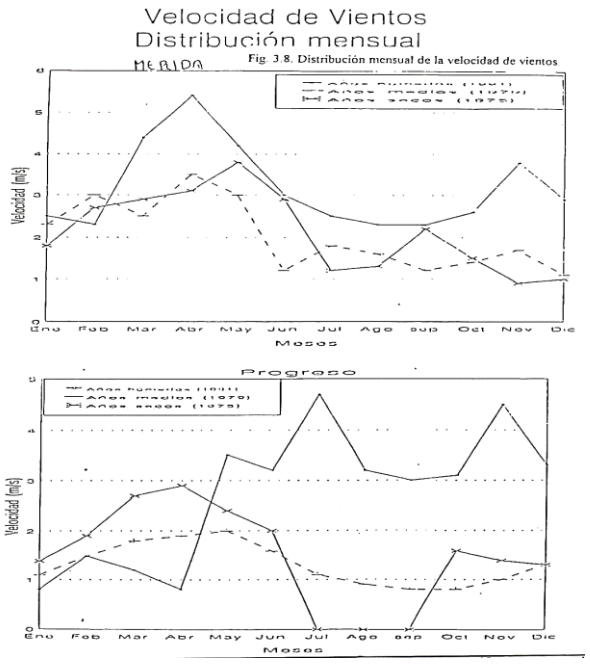
e Isidoro en 2002. También por su ubicación frente a la sonda de Campeche se encuentra sujeta al efecto de marejadas y tormentas tropicales que ahí se generan [3].

La velocidad de viento dominante, como los anteriores, fue analizada para las localidades de Mérida y Progreso con un período de observación del 70-92. En la zona continental de Mérida, el valor promedio mensual para toda la serie es de 2.13 m/seg, con valores máximo y mínimos extremos de 5.4 m/seg y 0.5 m/seg respectivamente. El coeficiente de variación de la velocidad de viento dominante para el período de estudio es de 30 % con valores promedio mensual por año que oscilan entre 15 % y 56 %. Para esta localidad los meses de mayor velocidad de viento dominante son marzo y abril con 3.05 m/seg y septiembre con 1.43 m/seg.

En la localidad de Progreso, el valor promedio de la velocidad de viento dominante mensual es de 1.40 m/seg con un máximo extremo de 4.0.m/seg y un mínimo extremo de 0.0 m/seg (calma total) para todo el período de estudio.

El coeficiente de variación de la velocidad de viento dominante mensual promedio es de 27.5% con valores promedio mensual por año que oscilan entre 15% y 125%. En Progreso los meses en que se presentan las mayores velocidades de vientos dominantes promedio son marzo, abril y mayo con valores de 1.86 m/seg a 1.98 m/seg y los valores menores se presentan durante los meses de agosto y septiembre con 0.75 m/seg y 0.99 m/seg respectivamente.

Figura IV.52).- Distribución mensual de la velocidad de vientos.



Se presenta también la dirección de vientos dominantes por mes, correspondientes a las velocidades de los vientos dominantes registradas en las estaciones de Mérida y Progreso para el periodo de observación comprendido entre 1972 y 1992

Tabla IV.10).- Dirección de vientos dominantes

Dirección de vientos dominantes
Mérida

Años	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	SE	NE	SE	SE	SE	SE	NE	E	E	E	N	ENE
71	E	SE	SE	SE	ESE	ESE	E	ENE	E	N	N	ESE
72	ENE	N	ENE	ESE	SSE	ESE	ESE	E	ESE	E	SSE	ESE
73	VARIOS	NNE	SE	SE	SE	E	E	E	SE	N	E	SE
74	ESE	N	SE	SE	SE	ESE	ESE	SE	E	N	N	VARIOS
75	SE	SE	SE	SE	SE	ESE	E	E	N	N	ENE	ENE
76	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ENE	ENE	ENE	E	N	N	N
77	ESE	N	SE	ESE	ESE	ESE	ESE	E	ESE	N	ESE	N
78	NW	N	N	SE	ESE	ESE	E	E	E	N	NNE	NNE
79	N	ESE	E	ESE	ESE	NE	E	NE	N	N	N	NNE
80	ESE	NE	SE	SE	SE	ENE	ENE	ENE	E	N	N	NE
81	N	N	E	E	E	E	E	ESE	E	E	N	E
82	E	ESE	SE	SSE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	E	E
83	N	VARIOS	SE	SE	SE	SE	ESE	SE	ESE	ESE	SE	E
84	ENE	SE	SE	SE	SE	ESE	ESE	ESE	ESE	E	E	E
85	ESE	SE	E	ESE	ESE	ESE	ENE	E	NE	E	ENE	ENE
86	ENE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ENE	ENE	NNE	ESE	NNE
87	ESE	ESE	N	N	ESE	ESE	ENE	ENE	ESE	N	N	ESE
88	NNE	NNE	ESE	ESE	ESE	ESE	E	ENE	E	NNE	ENE	N
89	ENE	NNE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ENE	NNE	ENE	ESE
90	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ENE	ENE	ENE	E	N	N	ESE
91	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ENE	ENE	NNE	ENE
92	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ENE	ESE	ESE	ESE

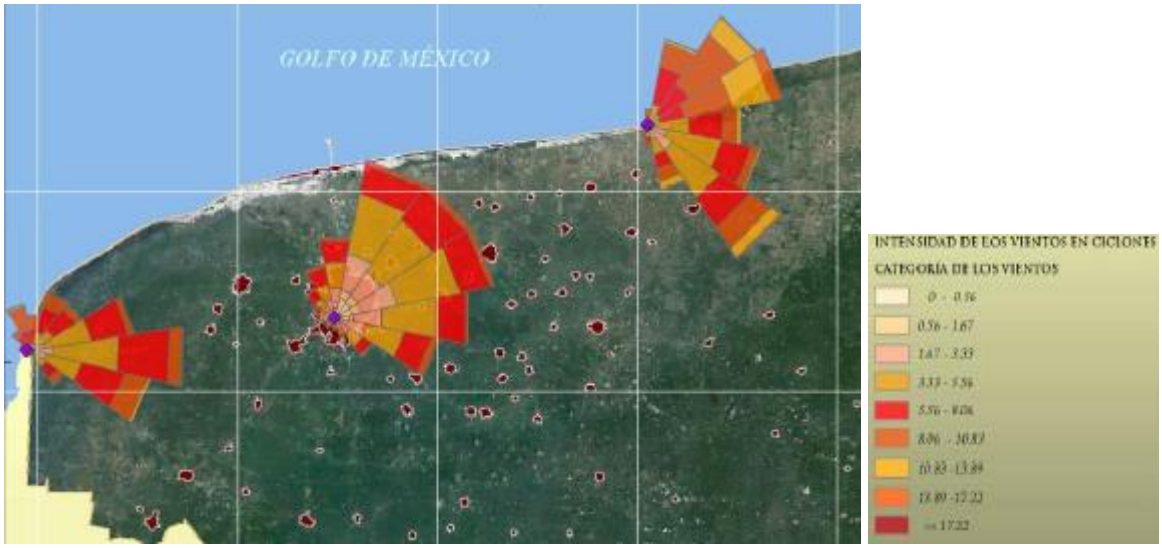
Dirección de vientos dominantes
Progreso

Años	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	E	ENE	SSE	SE	ENE	ENE	E	E	SE	E	N	E
71	NE	SSE	SSE	ENE	ENE	ENE	E	E	ENE	E	ENE	E
72	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	E	E	E	E	E	E	E
73	ENE	ENE	SE	ENE	SSE	ENE	E	E	E	E	ENE	E
74	E	ENE	ENE	ENE	SE	E	E	E	ENE	E	ENE	E
75	ENE	ENE	SE	SE	ENE	ENE	ENE	var	ENE	ENE	var	ENE
76	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	var	var	E	N	ENE	ENE
77	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE
78	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE
79	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE
80	ENE	ENE	SSE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	N	ENE
81	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE
82	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE
83	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE
84	ENE	NW	ENE	SSE	ENE	E	ENE	ENE	E	ENE	ENE	E
85	NNE	ENE	E	E	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	E	E	E
86	E	SSE	SSE	E	E	ENE	ESE	NE	ESE	ENE	ESE	E
87	E	SE	SE	NNE	E	E	E	E	E	ENE	NE	SSE
88	ENE	ENE	ENE	SE	ENE	E	E	E	E	ENE	ENE	ENE
89	ENE	E	SE	ESE	ESE	ENE	ENE	ENE	NNE	ENE	ENE	N
90	E	ENE	E	SE	SE	E	E	E	E	ENE	NE	ENE
91	E	NE	SE	SE	E	E	E	E	E	E	NE	ENE
92	NE	NE	NE	NE	ESE	NE	E	NE	NE	E	NE	NE

Para el caso de la estación climática de Mérida la dirección de los vientos dominantes que mayor frecuencia obtuvo fue la dirección E-SE, siguiendo la SE y la E durante los meses lluviosos y vientos del N y N-NE durante los meses de octubre y noviembre (meses correspondientes al periodo seco del año); mientras que para el caso de Progreso, prevalecieron los vientos del E-NE y E durante el periodo de estiaje y de lluvias, solo de febrero a abril los vientos del S-SE y SE hacen presencia. La frecuencia mensual de vientos dominantes del NW, es muy baja para ambas localidades.

Figura IV.53).- Mapa que integra tres estaciones climatológicas para la temporada de nortes y donde se aprecia espacialmente el comportamiento de los pétalos de cada rosa de los vientos.

Figura IV.54).- Mapa que integra tres estaciones climatológicas para la temporada de ciclones y donde se aprecia espacialmente el comportamiento de los pétalos de cada rosa de los vientos. En esta conjunción de modelos se observa el efecto potencializado de los vientos alisios.



Fuente: Atlas de Peligros de Fenómenos Naturales en el estado de Yucatán (2013)

La región se encuentra ubicada en el trayecto de tormentas tropicales y huracanes que tienen origen en el Atlántico y el Caribe Oriental. Estos fenómenos atmosféricos son estacionales y se inician en el mes de julio y terminan en noviembre. También por su ubicación frente a la sonda de Campeche se encuentra sujeta al efecto de marejadas y tormentas tropicales que ahí se generan (Beltrán, 1958).

Cuando el caldeamiento ha invadido la región insular de las Pequeñas Antillas se forman huracanes de gran recorrido y de potencia extraordinaria, principalmente los formados durante agosto, septiembre y octubre. Algunos llegan a cruzar la Península de Yucatán, por Cozumel y Cancún o por la costa norte, para azotar los Estados de Tamaulipas y Veracruz así como las costas suroccidentales de los Estados Unidos.

Estos huracanes presentan una trayectoria parabólica bien definida y generalmente se recurvan al norte cerca de los 19º N y cinco grados más al norte muestran una inflexión hacia el nordeste, que se hace francamente notable casi a los 30º N, atravesando la Península de Florida y salir al Atlántico. Para el mes de Septiembre de 1988 se presento el Huracán Gilberto, considerado como el evento más poderos registrado en la historia de Yucatán.

Tabla IV.11).- Depresiones tropicales que han afectado el Caribe Mexicano

TablaDepresiones tropicales que han afectado el Caribe Mexicano en el periodo 1969-1995.				
No.	**Mes de incidencia**	**Nombre**	**Categoria**	**Sitio de internación**
1	JULIO DE 1960	ABBY	T (120)	BELICE
2	JULIO DE 1961	ANNA	H (125)	BELICE
3	SEPTIEMBRE DE 1961	CARLA	H (120)	CANAL DE YUCATAN
4	OCTUBRE DE 1961	HATIE	H (240)	BELICE
5	OCTUBRE DE 1964	HILDA	D (50)	CANAL DE YUCATAN
6	SEPTIEMBRE DE 1965	DEBBIE	T (90)	PUNTA NIZUC (CANCUN)
7	JUNIO DE 1966	ALMA	T (112)	BELICE
8	OCTUBRE DE 1966	INEZ	H (200)	A 25 Km DE ISLA HOLBOX
9	SEPTIEMBRE DE 1967	BEULAH	H (120)	COZUMEL Y PUERTO MORELOS

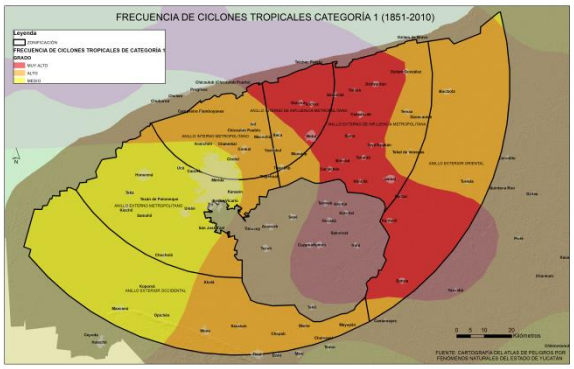
10	NOVIEMBRE DE 1969	FRANCELIA	H (120)	BELICE
11	OCTUBRE DE 1969	LAURIE	D (55)	A 30 Km DE PUNTA NIZUC
12	SEPTIEMBRE DE 1970	ELLA	T (120)	PUERTO MORELOS
13	AGOSTO DE 1971	CHLOE	T (50)	A 65 Km DE BELICE
14	SEPTIEMBRE DE 1971	EDITH	T (100)	BELICE
15	JUNIO DE 1972	AGNES	T (115)	SE FORMA CERCA DE CANCUN
16	SEPTIEMBRE DE 1973	DELIA	D (55)	COZUMEL
17	SEPTIEMBRE DE 1974	CARMEN	H (242)	XCALAC
18	SEPTIEMBRE DE 1974	FIFI	H (185)	BELICE
19	AGOSTO DE 1975	CAROLINE	D (55)	A 20 Km DE CABO CATOCHE
20	SEPTIEMBRE DE 1975	ELOISE	T (75)	COZUMEL Y PLAYA DEL CARMEN
21	OCTUBRE DE 1977	FRIDA	T (55)	FRENTE A CHETUMAL
22	SEPTIEMBRE DE 1978	GRETA	H (153)	BELICE
23	SEPTIEMBRE DE 1979	HENRY	D (55)	A 50 Km DE CABO CATOCHE
24	AGOSTO DE 1980	ALLEN	H (240)	FRENTE A CABO CATOCHE
25	SEPTIEMBRE DE 1980	HERMINE	T (110)	BELICE
26	NOVIEMBRE DE 1980	JEANNE	T (45)	CANAL DE YUCATAN
27	JUNIO DE 1982	ALBERTO	H (137)	CANAL DE YUCATAN
28	AGOSTO DE 1985	DANNY	H (144)	CANAL DE YUCATAN
29	OCTUBRE DE 1987	FLOYD	H (130)	CANAL DE YUCATAN
30	SEPTIEMBRE DE 1988	GILBERTO	H (295)	PUERTO MORELOS
31	NOVIEMBRE DE 1988	KEITH	T (115)	CANCUN
32	SEPTIEMBRE 1995	OPALO	H	COSTA CENTRAL QUINTANA ROO
33	SEPTIEMBRE1995	ROXANA	H	COSTA CENTRAL QUINTANA ROO
33	OCTUBRE 1997	MITCH	H	HONDURAS COSTA SUR QUINTANA ROO

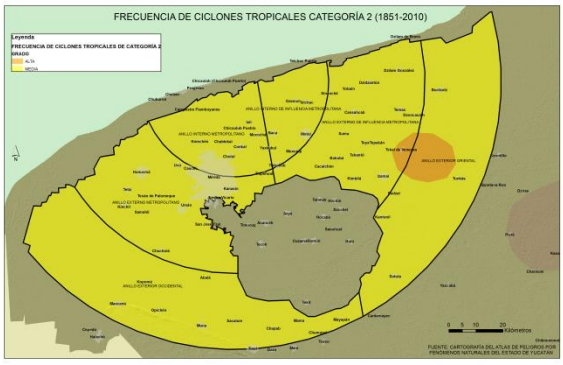
D.- DEPRESION TROPICAL; T.- TORMENTA TROPICAL; H.- HURACAN (120) .- VELOCIDAD en Km/hr con la que la depresión entro a tierra, en el punto más cercano de su trayectoria a la costa de Quintana Roo.

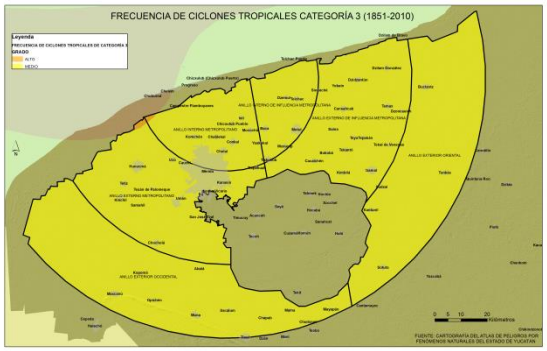
Cuando hablamos de trayectorias de los meteoros, estamos describiendo fenómenos climáticos muy inestables en el sentido de rutas fijas. Estas trayectorias variables pueden ser difíciles de pronosticar y tienen repercusiones importantes en términos de peligros. Típicamente, la velocidad media de avance de un ciclón tropical es de aproximadamente 24 Km/h. Sin embargo, algunos ciclones tropicales pierden velocidad y a menudo causan lluvias devastadoras, como el huracán Isidoro en el año 2002.

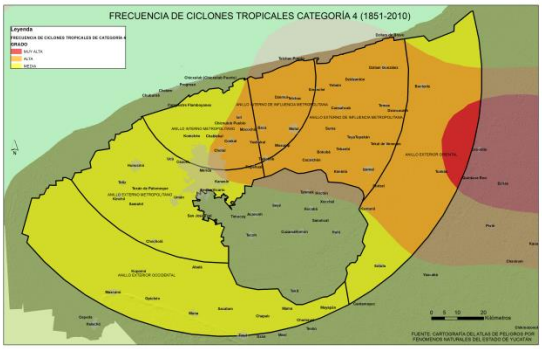
La distribución del impacto de los huracanes por categoría al interior de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes se presenta a continuación:

Figura IV.55).- Mapas de frecuencia de ciclones tropicales categoría 1 al 5.









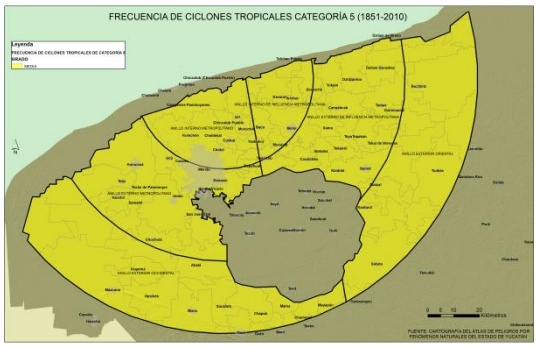


Tabla IV.12).- Superficies de afectación por grado de frecuencia de ciclones.

TABLA DE SUPERFICIES POR GRADO DE FRECUENCIA DE CICLONES TROPICALES POR SUBZONA

Categoría	Grado	Anillo exterior occidental	Anillo exterior oriental	Anillo externo de influencia metropolitana	Anillo externo metropolitano	Anillo interno de influencia metropolitana	Anillo interno metropolitano	Total
	MUY ALTO	1	1,017	1,256		507	33	**2,813**
	ALTO	1,198	1,725	699	339	171	777	**4,908**
	MEDIO	1,791	10		1,677		233	**3,710**
1	**TOTAL**	**2,989**	**2,751**	**1,954**	**2,016**	**678**	**1,042**	**11,431**
	ALTO		257	71				**328**
	MEDIO	2,989	2,494	1,883	2,016	678	1,042	**11,103**
2	**TOTAL**	**2,989**	**2,751**	**1,954**	**2,016**	**678**	**1,042**	**11,431**
	ALTO				13		7	**20**
	MEDIO	2,989	2,751	1,954	2,003	678	1,035	**11,411**
3	**TOTAL**	**2,989**	**2,751**	**1,954**	**2,016**	**678**	**1,042**	**11,431**
	MUY ALTO		299					**299**
	ALTO		1,726	1,954	93	678	399	**4,850**
	MEDIO	2,989	726	0	1,922		643	**6,281**
4	**TOTAL**	**2,989**	**2,751**	**1,954**	**2,016**	**678**	**1,042**	**11,431**
	MEDIO	2989.437	2751.387	1954.432	2015.723	677.626	1042.172	11,431
5	**TOTAL**	**2989.437**	**2751.387**	**1954.432**	**2015.723**	**677.626**	**1042.172**	**11,431**

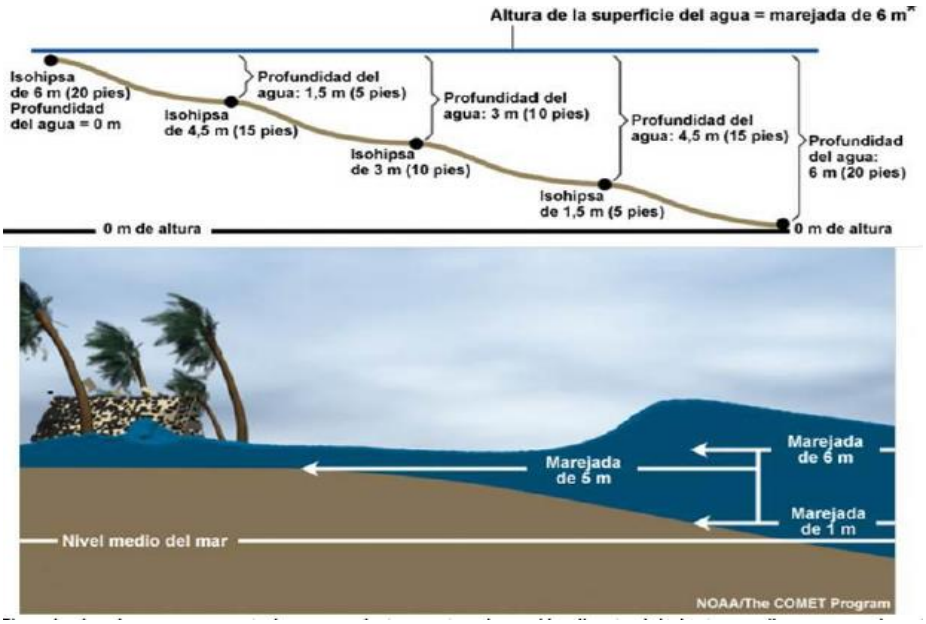
Cuando un huracán toca tierra, es común que cubra una amplia zona con 15 cm o más de lluvia, lo cual a menudo provoca inundaciones mortales y devastadoras. Las lluvias torrenciales de estas tormentas pueden durar varios días. Tales inundaciones han sido

una de las causas principales de la pérdida de vidas (niños, en muchos casos) relacionada con los ciclones tropicales en los últimos 30 años.

Las lluvias intensas no se limitan a las regiones costeras. Pueden acumularse enormes cantidades de lluvia a miles de kilómetros en el interior. Buena parte de los daños provocados por 4 de los 20 ciclones tropicales más costosos no fueron producto de los vientos, sino el resultado de las inundaciones causadas por las lluvias torrenciales en el interior, recordemos que uno de los principales impactos del huracán Isidoro fue en el sur de la entidad. La marejada ciclónica, que a veces recibe los nombres de marea de tormenta, surgencia de tormenta e incluso oleada de tormenta, es el aumento anormal del nivel del mar provocado por un huracán u otra tormenta intensa por encima de la marea astronómica prevista o normal. Su causa principal es la acción de los vientos del huracán, que empujan el agua sobre la costa, aunque la baja presión en el ojo del sistema contribuye en parte, pero en mucha menor medida. El grado de aumento del nivel del mar generado por la marejada ciclónica es la diferencia en la costa entre el nivel observado de la superficie del mar y el nivel que se hubiera producido en ausencia del ciclón tropical.

En el ejemplo siguiente, la marejada ciclónica en la costa mide 6 metros (20 pies) por encima del nivel de la marea normal. Conforme aumenta la altura, la profundidad del agua disminuye, pero las áreas a menos de 6 metros de altura quedan vulnerables a inundaciones.

Figura IV.56).- Marejada que forma el impacto de una tormenta o huracán



El agua regresa a la atmósfera a través de procesos conocidos como evaporación y transpiración. La evaporación tiene lugar a partir de las superficies acuosas, del suelo y de la vegetación, como las hojas que detienen la lluvia. La capacidad o poder evaporante de la atmósfera es la cantidad de agua que puede ser absorbida por superficies libres, y se incrementa con la temperatura, el viento y la baja humedad relativa. Este poder evaporante afecta la transpiración e influye en la humedad del suelo. Cuando el sol brilla sobre un suelo húmedo, este pierde agua por evaporación con mayor rapidez que una superficie acuosa, como en una ciénaga o laguna costera, debido al área superficial expuesta en los poros del suelo., sin embargo, la cantidad de agua que se evapora en la

superficie acuosa es mucho mayor dada la gran disponibilidad de ella. La evaporación edáfica puede desecar un suelo a gran profundidad, de tal manera que el agua que no pueda penetrar con rapidez solo se encuentra disponible para las plantas muy poco tiempo.

La evaporación del territorio del anillo de cenotes, en sus diferentes zonas, se analizó según datos observados y procesados de los evaporímetros de 19 estaciones climáticas de la CONAGUA. En el extremo noroccidental (Celestún), la evaporación de superficie libre del agua ascienda a valores mayores de 1,700 mm al año, como total del año 1987. Asimismo, para Progreso, al centro, los valores ascienden a más de 2,000 mm al año y para Mérida, al sur, alcanza valores cercanos a 1,700 mm al año.

Tabla IV.13).- Evaporación total mensual en 19 estaciones climatológicas (mm) para el año 1987.

Municipio	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGT**	**SEP**	**OCT**	NOV	**DIC**
Abala	118.70	120.70	165.60	176.10	247.20	157.10	180.60	175.40	154.20	129.80	104.30	98.15
Buctzotz	100.90	119.00	131.00	161.10	205.10	167.90	155.20	128.10	132.40	127.80	94.20	85.00
Dzan	118.17	122.06	182.69	188.06	262.14	189.40	131.16	165.49	178.02	135.00	155.65	158.36
Dzilam de Bravo	127.23	115.33	130.95	130.99	182.52	169.89	167.46	163.47	145.16	144.94	135.36	125.30
Izamal	127.40	112.90	79.00	126.50	138.50	150.60	174.70	167.30	132.50	96.70	99.40	110.00
Kinchil	114.20	119.60	165.00	185.00	239.70	185.90	194.50	190.90	156.90	143.60	104.80	100.60
Motul	117.20	130.40	182.50	229.75	220.50	175.60	180.90	152.70	159.60	130.60	104.20	96.50
Progreso	139.30	131.20	175.80	202.11	239.30	161.10	178.54	184.33	173.36	194.39	132.93	122.13
Rio Lagartos	101.80	106.30	138.40	152.80	198.80	172.80	167.60	151.70	154.90	150.20	99.30	90.40
Sotuta	89.00	95.00	86.50	72.70	110.15	147.60	200.40	184.20	156.50	100.90	72.70	84.60
Telchac Puerto	107.40	93.94	132.22	170.50	163.40	150.64	137.88	148.67	136.81	164.22	109.35	120.58
Tecoh	108.09	83.44	84.46	138.32	205.17	189.37	199.58	183.29	129.08	97.25	85.17	90.69
Celestun	190.40	241.00	137.00	116.40	142.50	126.40	130.00	131.20	129.00	133.30	120.60	118.40
Peto	115.50	111.10	126.10	125.90	153.50	125.30	169.40	149.90	137.10	120.00	133.30	102.30
Mococha	152.50	153.40	193.10	196.40	225.20	199.70	193.30	215.50	205.10	177.90	149.90	132.90
Ticul	94.07	119.36	178.78	196.23	243.70	156.88	129.07	152.47	142.93	100.82	114.30	86.05
Kantunil	112.90	137.07	177.32	128.95	218.85	169.45	204.50	173.50	142.53	132.79	123.06	122.97
Dzidzantun	115.90	99.80	119.10	105.70	207.50	157.30	181.90	197.40	126.20	135.75	127.30	84.00
Merida	127.95	118.55	136.75	188.12	210.45	192.17	173.89	175.19	133.80	115.03	100.81	110.24

Tabla IV.14).- Evaporación total mensual en 19 estaciones climatológicas (mm) para el año 1988.

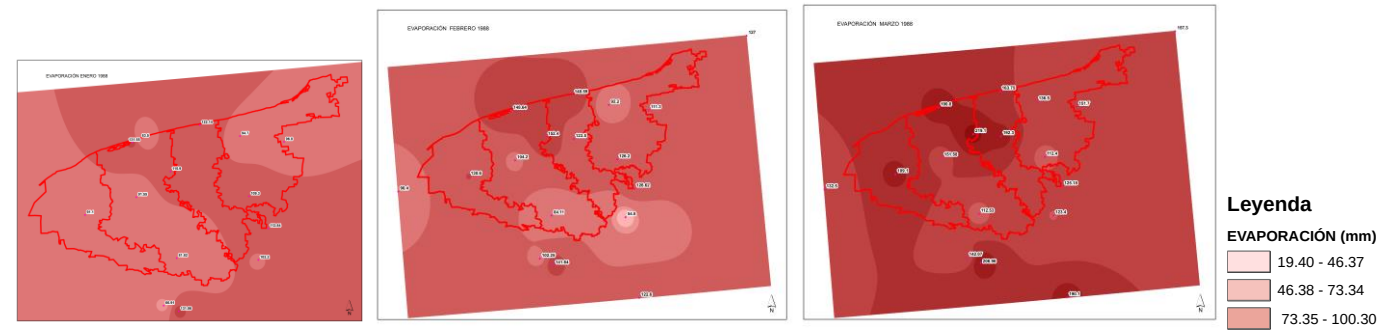
Municipio	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGT**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**
Abala	115.30	132.25	173.47	215.00	245.10	154.50	146.90	167.25	139.72	112.20	105.90	102.70
Buctzotz	96.80	111.30	151.70	155.20	205.60	152.60	151.10	198.40	156.60	129.80	101.10	108.70
Dzan	131.06	141.64	206.96	246.34	209.38	153.85	246.25	233.19	184.11	195.69	157.14	159.64
Dzilám de Bravo	140.76	127.62	142.38	139.80	173.86	144.80	164.55	187.65	137.02	132.35	128.05	136.12
Izamal	109.30	126.20	112.40	74.60	156.40	126.90	163.10	212.80	124.40	127.50	139.50	133.60
Kinchil	91.10	130.60	189.10	218.20	222.30	211.25	202.70	161.80	130.90	122.80	93.80	116.70
Motul	110.00	123.50	192.30	230.20	223.40	169.10	175.40	160.00	128.80	121.10	101.90	86.00
Progreso	131.55	148.64	190.80	210.06	233.16	166.00	196.28	174.37	142.13	179.64	125.64	107.21

Rio Lagartos	100.90	127.00	157.30	204.60	191.30	137.00	178.00	176.90	150.50	147.70	146.40	126.07
Sotuta	102.20	54.80	123.40	166.10	207.80	127.10	145.70	166.30	147.00	103.80	102.10	68.50
Telchac Puerto	122.14	148.59	163.75	173.81	157.91	114.18	128.86	127.30	108.02	111.92	116.83	123.13
Tecoh	81.82	84.11	112.53	137.06	106.56	147.01	171.51	128.45	155.32	119.23	118.01	131.15
Celestun	87.20	90.40	132.50	136.50	141.20	127.50	133.70	197.20	173.40	145.20	128.90	100.50
Peto	113.70	122.60	190.10	164.90	214.20	166.60	160.70	173.40	153.80	131.00	159.40	131.70
Mococha	115.90	152.40	219.10	237.70	258.50	221.80	232.90	189.60	151.10	145.10	154.80	139.73
Ticul	66.91	102.25	142.07	230.01	237.37	138.75	142.19	142.94	113.61	85.83	84.11	108.43
Kantunil	112.84	126.62	125.18	176.63	165.51	117.38	141.43	165.52	138.39	124.78	111.17	100.48
Dzidzantun	94.70	92.20	136.50	149.40	224.00	167.10	188.70	185.80	149.20	163.10	135.90	142.00
Mérida	91.55	104.20	151.58	176.37	195.30	123.41	163.95	154.66	145.37	101.24	109.11	79.84

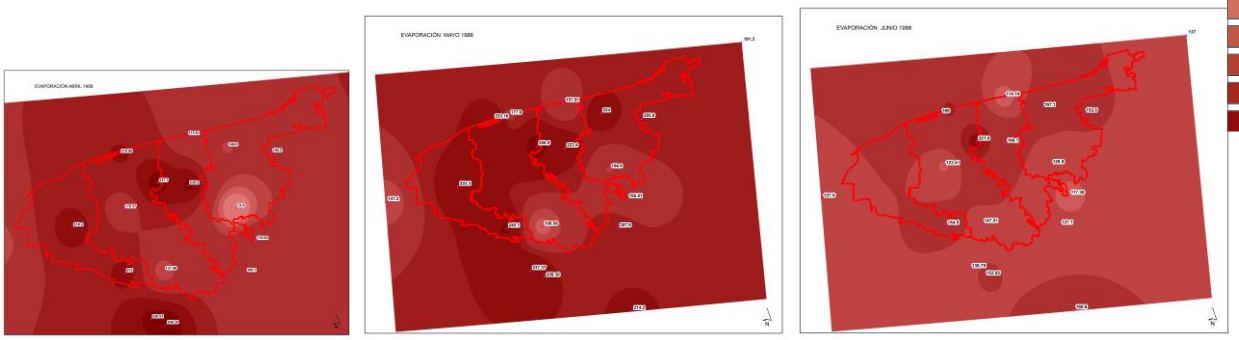
Estos valores de evaporación son realmente altos, propio de esta zona de México, ubicada en la franja de desiertos tropicales, y en donde la lluvia anual oscila entre los 340 mm y 1,080 mm como se muestra en la siguiente tabla. A continuación se presentas el ciclo anual de evaporación para el año 1988, año del huracán Gilberto, el cual nos servirá posteriormente para comparar con datos de precipitación y de altura de manto freático. Las figuras muestran las zonas en que el COTASMEY dividió a la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

Figura IV.56).- Evaporación mensual para el año 1988 en la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

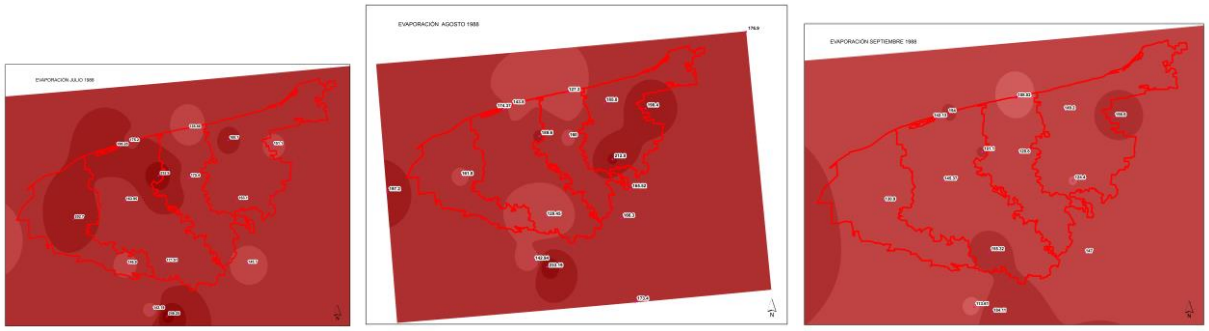
Enero, febrero y marzo



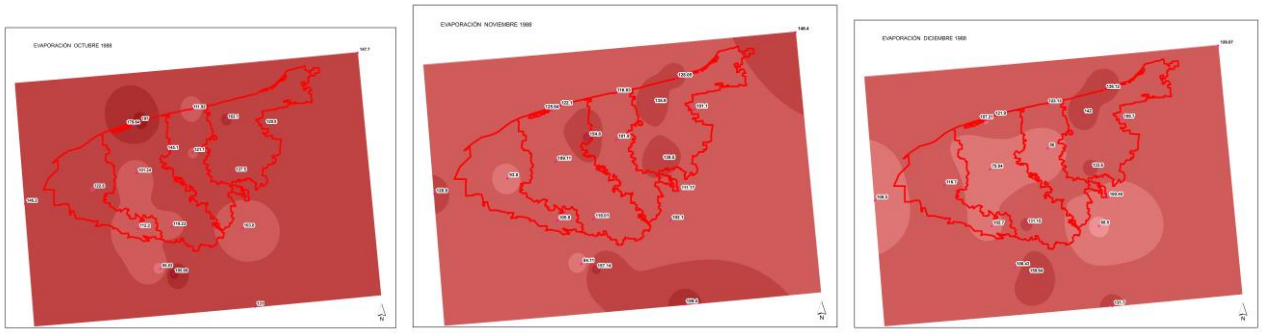
Abril, mayo y junio



Julio, agosto y septiembre



Octubre, noviembre y diciembre



Es válido plantarse que las condiciones de aridez de la Península de Yucatán son singulares por dos razones fundamentales: en primer lugar, le existencia de un acuífero de gran magnitud y de una gran estabilidad a pocos metros de profundidad, y que constituye la principal, y prácticamente única fuente de los recursos hídricos del territorio. Y en segundo lugar, la gran diferencia entre los principales componentes del balance hídrico, es decir, la relativa poca precipitación y la relativa gran evaporación del territorio. Si se hace uso de determinados coeficientes o indicadores de aridez, como por ejemplo la relación o proporción entre la precipitación y la evaporación para cuantificar dicho fenómeno, se tiene que:

$$I_a = P / E$$

Donde:

I_a = Indice de aridez
P = Precipitación anual mm
E = Evaporación anual mm

Para el caso de la zona geohidrológica del anillo de cenotes, y para el año 1987, los valores se presentan en la siguiente tabla para cada estación climática. Se observan valores que van de 0.770 a 0.154, con un valor promedio de 0.419. Lo que significa que la lluvia sólo satisface, en términos generales el 42 % del poder evaporante de la atmósfera del territorio. Según datos de boletines hidrometereológicos publicados referidos a la faja tropical, este índice de aridez generalmente es mayor a 50 %.

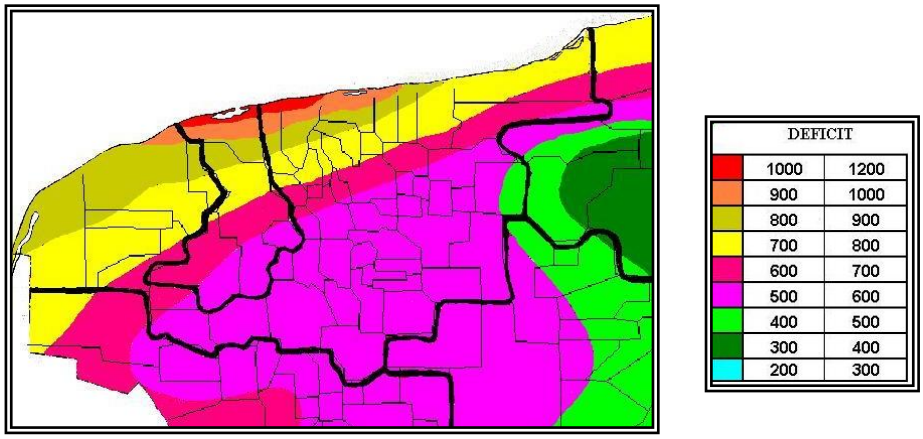
Tabla IV.15).- Relación P/E para algunos municipios del interior del anillo de cenotes.

Municipio	Totprecipit	Totevapor	P/E
Abala	948	1827.85	0.518
Buctzotz	1021	1607.70	0.634
Dzan	1061	1986.20	0.534

Dzilam de Bravo	443	1738.60	0.254
Izamal	358	1515.50	0.235
Kinchil	1011	1900.70	0.531
Motul	850	1880.45	0.452
Progreso	671	2034.49	0.329
Rio Lagartos	559	1685.00	0.331
Sotuta	1080	1400.25	0.770
Telchac Puerto	340	1635.61	0.207
Tecoh	733	1593.91	0.459
Celestun	793	1716.20	0.462
Peto	824	1569.40	0.524
Mococha	723	2194.90	0.329
Ticul	798	1714.66	0.465
Kantunil	873	1843.89	0.473
Dzidzantun	256	1657.85	0.154
Merida	542	1782.95	0.303

Es posible concluir que en la Península de Yucatán este fenómeno de aridez es muy singular, porque lógicamente la lámina que debe evapotranspirarse a partir de la precipitación debe ser menor que ésta última para que se cumpla al menos, sin mucho rigor, el balance hídrico del territorio. En el caso de Yucatán, y particularmente en la zona del anillo de cenotes, un factor importante es que no puede considerarse una transpiración excesiva de la población vegetal debido a la presencia de su estado temporal de marchitez (selva baja caducifolia) y la alta presencia de plantas xerófitas. Orellana (1999) presenta Balances Ombrotérmicos, donde muestra gráficas de varias localidades de la entidad donde se observan aspectos como déficit hídrico, condición de humedad, superávit, así como la presencia de sequía intraestival. De igual forma, la carta de INEGI sobre evapotranspiración y déficit de agua (ver figura siguiente), muestra también una serie de gráficas de Balance de Agua y toca aspectos como, precipitación media mensual, evapotranspiración potencial media mensual, déficit de agua, recarga de humedad del suelo, excedente de agua y pérdida de humedad del suelo. En el mapa de evapotranspiración se observa que en la punta centro norte, sobre el Puerto de Progreso, el déficit de agua supera los 1,100 mm al año.

Figura IV.57).- Déficit de agua en el anillo de cenotes.



Fuente: Atlas de procesos territoriales de Yucatán.

Conforme se avanza hacia el sur se observa un gradiente hasta los 800 mm en los alrededores de la Ciudad de Mérida, zona que se extiende al sureste hasta Peto y Tzucacab, bordeando la sierrita de Ticul por el suroeste. A partir de aquí y hacia el oriente se presenta un menor déficit de agua con 200 mm en los límites del Estado de Quintana Roo. El mapa siguiente muestra el déficit de agua media anual en la zona geohidrológica del anillo de cenotes

IV.4).- Suelos

IV.4.1).- El papel del suelo en el ciclo hidrológico.

El agua del suelo puede ser obtenida por la precipitación pluvial o por el riego. Cualquiera que sea la fuente de aprovisionamiento de ella, al llegar el agua al suelo y entrar en contacto con él, una parte es infiltrada hacia partes profundas por efecto del drenaje, otra parte se queda ocupando ciertos espacios entre las partículas y de la que pueden disponer los árboles para sus necesidades, y otra es retenida con fuerte energía por las partículas del suelo, no pudiendo las raíces disponer de ella. Al primer tipo de agua se le llama gravitante o gravitacional, debido a que al no ser retenida ni en los espacios ni pegada a las partículas de tierra desciende por gravedad hasta capas profundas, o hasta el manto freático, donde se pierde en su utilización por las plantas. El segundo tipo se le llama agua capilar debido a que llena los pequeños espacios de tamaño capilar, que existen entre las partículas del suelo, a la vez que forma sobre éstas una delgada capa húmeda. Esta agua no desciende por gravedad, ya que son mayores en esas reducidas dimensiones las fuerzas de adhesión y de capilaridad, que determinan que se desplace hacia todos lados, siguiendo los conductos capilares. De esta agua capilar puede ser aprovechada por la planta la totalidad que rellena los espacios y gran parte de la que recubre las partículas. El tercer tipo de agua, a la que es fuertemente retenida, pegada a las partículas de suelo y de la que la planta no puede disponer, aún en sus condiciones más críticas de marchitez, se le llama agua higroscópica. Esta agua es más renuente a ser cedida cuanta mayor sea su escasez en el suelo, de tal manera que se requeriría una gran fuerza o tensión para obtenerla (Bautista-Zuñiga, F. y G. Palacio, 2005).

Las raíces de los árboles para obtener agua de cualquier tipo, presentan un modo de energía que está determinado por el poder de absorción, dependiente de la concentración del agua que hay en los tejidos en contacto con el suelo, es decir, en los pelos absorbentes, A esta energía se le llama “potencial hídrico”. El suelo por su parte, también tiene una energía de retención del agua, a la cual se le llama “tensión de humedad del suelo”. La factibilidad de absorción del agua por la planta se logra cuando el potencial hídrico es mayor que la tensión de humedad del suelo.

La tensión de humedad de un suelo secado totalmente en una estufa a 105 ºC a peso constante es de 10,000 atmósferas. Cuando un suelo es secado al aire, a temperatura ambiente retiene agua a una tensión de humedad de 1,000 atmósferas, esto quiere decir, que aunque esta relativamente seco, mantiene un cierto contenido de agua, que solo puede ser extraída mediante un esfuerzo de 1,000 atmósferas, que desde luego las plantas no pueden ejercer, y son incapaces de utilizarla.

Si un suelo secado al aire, en condiciones ambientales de 25 ºC y de atmósfera casi saturada, absorbe humedad. Cuando ya ese suelo no puede realizar mayor absorción de agua, se dice que se encuentra en su capacidad higroscópica, siendo en ese momento la

tensión de humedad de 31 atmósferas, por lo que tampoco es aprovechable por los vegetales superiores. Cuando el suelo retiene al agua con una tensión de humedad de 15 atmósferas, se dice que está en el punto de marchitamiento, ya que a partir de ese índice la mayoría de los vegetales no pueden extraerla de él y comienzan a marchitarse.

Por otro lado, se llama estado de capacidad de campo a aquel que tiene el suelo, respecto al contenido de humedad después de haber permitido el libre drenaje durante uno o dos días. Es decir, es su aptitud retentiva de agua higroscópica y de capilaridad sin que se permita la existencia de agua gravitante. Un suelo normal a capacidad de campo retiene agua a una tensión de humedad de 1/3 de atmósfera, la cual puede ser utilizada por todos los vegetales sin dificultad. Cuando en un suelo se agrega agua hasta que éste ya no pueda admitirla más en su contenido y se observa un encharcamiento se dice que ha llegado al punto de saturación. En este punto, todo el aire del suelo ha sido desplazado por el agua, que ocupa totalmente todos los espacios, poros y microporos, existentes entre las partículas. La tensión de humedad en ese momento es de cero atmósferas.

En el siguiente cuadro se presenta el valor de tensión de humedad de un suelo de textura media en sus diferentes estadios críticos, así como el porcentaje de espacio libre entre las partículas ocupadas por el agua en los mismos estados.

Tabla IV.16).- Valor de tensión de humedad en un suelo de textura media.

Estado del suelo con respecto a su contenido de humedad	**Tensión de humedad en el suelo en atmósferas**	**% de espacio libre ocupado por agua**
Seco a la estufa	10,000	0
Seco al aire	1,000	0
Capacidad higroscópica	31	15
Punto de marchitamiento	15	25
Capacidad de campo	1/3	50
Punto de saturación	0	100

La textura del suelo, es decir, el tamaño de las partículas que lo componen, es un factor de extrema importancia en el comportamiento que el mismo tenga respecto de su capacidad retentiva del agua. Por ello los valores expuestos anteriormente tienen una gran variabilidad de acuerdo con las texturas. En general, en los suelos arenosos el agua capilar que puede ser retenida es bastante reducida en volumen, escapándose un gran porcentaje como agua de gravedad. La cantidad de agua que queda pegada a las partículas es también menor, pero puede ser más fácilmente obtenida que en suelos arcillosos.

Los movimientos de agua, tanto de gravedad como por capilaridad son también influenciados por la textura del suelo, debido al tamaño de los poros. En suelos arenosos el movimiento por gravedad se realiza con mayor rapidez que en los arcillosos, mientras que en los primeros el movimiento capilar es muy restringido, en comparación con los segundos.

La cantidad de agua que es necesario agregar a un suelo que se encuentra en su punto de marchitamiento para que llegue a alcanzar la capacidad de campo se conoce como capacidad de agua aprovechable. Este factor varía de acuerdo con las texturas de los suelos.

Tabla IV.17).- Datos referentes al porcentaje de peso del suelo que representa la humedad, en suelos de diferente textura.

Textura	Punto de marchitamiento %	Capacidad de campo %	Capacidad de agua aprovechable %
Arena media	1.7	6.8	5.1
Arena fina	2.3	8.5	6.2
Migajón arenoso	3.4	11.3	7.9
Migajón arenoso fino	4.5	14.7	10.2
Franco	6.8	18.1	11.3
Migajón limoso	7.9	19.8	11.9
Migajón arcilloso	10.2	21.5	11.3
Arcilla	14.7	22.6	7.9

Como se observa, la capacidad de agua aprovechable, aumenta en función de la firmeza de la textura hasta migajón limoso, a partir del cual disminuye de nuevo, debido a que las arcillas, aún cuando son capaces de contener grandes volúmenes de agua, poseen elevadas fuerzas de adhesión, determinadas por su gran superficie, lo que impide una fácil cesión de ella (Bautista-Zuñiga, F. y G. Palacio, 2005).

Se conoce como infiltración al proceso de penetración al suelo de agua depositada en la superficie del mismo, por riego o por precipitación pluvial. En la velocidad de infiltración intervienen la textura, la estructura y la temperatura del suelo. Es mayor en suelos de textura gruesa, de estructura granular y a más elevada temperatura. La presencia de materia orgánica determina una mayor infiltración, y esto es importante ya que permite un mejor aprovechamiento del agua de lluvia por las plantas, que en lugar de escurrir a lo largo de la superficie del suelo ocasionando corrientes que causan erosión, va penetrando el interior del suelo donde puede ser almacenada y estar disponible para las plantas.

De acuerdo con su velocidad de infiltración, los suelos pueden ser clasificados de acuerdo a la siguiente manera:

1).- Muy lentos. Cuando su velocidad de infiltración es menor a 0.25 cm/hr de lamina de agua. Estos suelos son los que poseen un índice muy elevado de arcillas.

2).- Lentos. Cuando su velocidad de infiltración es de 0.25 a 1.75 cm/hr de lamina de agua. Corresponden también a suelos de textura delgada con bajo contenido de materia orgánica.

3).- Medios. Cuando la infiltración se realiza a velocidad de 1.75 a 2.5 cm/hr de lamina de agua. Son suelos de texturas migajón arenoso o migajón limoso.

4).- Rápidos. Cuando la infiltración corresponde a velocidades de más de 2.5 cm/hr de lamina de agua. Estos suelen ser suelos de textura arenosa o migajones limosos.

Se entiende por percolación el movimiento que en suelos saturados o cercanos a ello, realiza el agua hacia horizontes más profundos de acuerdo con la ley de gravedad. Comúnmente este término se confunde con el de infiltración, que solamente se refiere a la entrada de agua al suelo. Los factores que favorecen la percolación son semejantes a los de infiltración, es decir, texturas sueltas, y estructuras columnares o granulares. Sin embargo el alto contenido de materia orgánica que favorece la infiltración disminuye la percolación al determinar una mayor retención de agua.

Debido a la percolación, que determina el drenaje, grandes cantidades de agua se pierden hacia estratos profundos, pero además arrastran consigo gran cantidad de nutrientes disueltos, por eluviación, el proceso conocido como lavado de suelos. La percolación de grandes cantidades de agua anualmente puede determinar el empobrecimiento del suelo, ya que al irse poniendo en estado soluble los nutrientes y no ser totalmente aprovechados por las plantas, en ese momento pasan a formar parte de la solución del suelo, que al descender la deposita por iluviasión en otros horizontes.

La permeabilidad del suelo se refiere a la cualidad que un suelo tiene de percolación y a la vez de movimiento de aire en él, que comprende también el vapor de agua. La permeabilidad del suelo es factor directamente proporcional de su textura, aumentando a mayor grado de tamaño de las partículas, lo que permite la existencia de gran número de macro poros o espacios de gran tamaño por los cuales movimientos de agua y aire pueden realizarse con gran facilidad. Todas aquellas prácticas agropecuarias que favorecen la compactación del suelo y que disminuyen el tamaño y contenido de espacios hacen disminuir la permeabilidad.

En Yucatán se han identificado 3,024 unidades de mapeo, 187 asociaciones y 13 Unidades de suelo. Sólo el 2.6% presentan perfiles descritos y datos analíticos. El centro, sur y sureste tienen el mayor número de unidades de mapeo. Las asociaciones de suelos con mayor extensión son Rendzinas y Litosoles 67%, en zonas cársticas recientes y juveniles, como lo es nuestra zona de estudio; Gleysoles, 15.5%, en zonas costeras; Luvisoles 4.44%, en planicies cársticas maduras; Vertisoles 3.02%, al Sur y Noreste; Solonchác, en la costa; Regosol e Histosol, en litoral y planicie costera. Dominan los suelos poco profundos (E + I), de reciente formación y escaso grado de desarrollo pedogenético (Bc).

También hay suelos de escasa importancia agrícola como Solonchák, Gleysol, Regosol, e Histosol; pero se encuentran en zonas de gran interés ecológico y ambiental, como los petenes, manglares y planicies costeras, formando una barrera natural que evita el avance del agua de mar y la salinización de suelos agrícolas. El conocimiento de los suelos debe ir acompañado del reconocimiento de sus restricciones de uso y de su potencial productivo (Bautista-Zuñiga, F. y G. Palacio, Coordinadores. 2005 Caracterízación y manejo de los suelos de la península de Yucatán).

Tabla IV.18).- Evaluación agrícola de los grupos de suelo de la Península de Yucatán.

Calidad de la Tierra	E	I	R	L	B	G	V	S	*N*
Humedad del suelo	XX	XXX	X		X		X	X	
Disponibilidad de nutrimentos	X	X	X					XX	
Retención de nutrimentos	X	XXX		X	XX	XX		XX	X
Potencial de mecanización	XX	XXX		X	X	XX		X	X
Resistencia a la erosión	X	X		X					
Disponibilidad de oxígeno		X				XX	X		
Volumen radicular	XX		X	X	X	XX	X	X	X
Condiciones de germinación	X		X			X		X	X
Salinidad								XXX	
Sodicidad								X	
Laboreo	XX				X	X		X	
Riesgos de inundación						XX	X	X	

E + I = Rendzinas más Litosol, R= Regosol; L= Luvisol, B= Cambisol, G= Gleysol, V= Vertisol, S= Solonchack. X=Limitación baja, XX= Limitación media, XXX= Limitación alta.

Los suelos del estado de Yucatán, a pesar de algunas marcadas diferencias morfológicas, muestran una serie de características comunes que permiten plantear algunas consideraciones generales aplicables a todos ellos (Duch, 1986).

En primer término, su aparente origen a partir de materiales calcáreos muy solubles. Esto es un indicador de la dificultad que existe para que se desarrollen suelos profundos, dado que las impurezas constituyen cuando mucho el 10 % del peso total del material carbonatado. Por tal razón, no deja de llamar la atención la presencia de suelos profundos en distintas porciones de la entidad.

En segundo término, se aprecia la variación climática que registra la entidad, en particular la variación pluvial está asociada con la distribución espacial de ciertos suelos. Así, hacia el sur y oriente del estado, que son las porciones más lluviosas, aparecen los suelos con mayor desarrollo, lo cual se expresa en la mayor profundidad que ellos llegan a alcanzar, así como la más clara diferenciación de los horizontes que conforman el perfil. Junto con la alta pluviosidad, las características topográficas del terreno favorecen un mayor arrastre de los materiales edáficos que se van formando de las partes más elevadas (altillos) hacia las más bajas (hondonadas), donde se aprecia su acumulación progresiva. Sin embargo, esto no es suficiente para explicar el gran espesor que logran alcanzar algunos suelos en el extremo sur, como es el caso de los luvisoles, vertisoles y gleysoles, y en especial los nitosoles, que sobrepasan los 2 m de profundidad sin hacer contacto con la coraza calcárea subyacente.

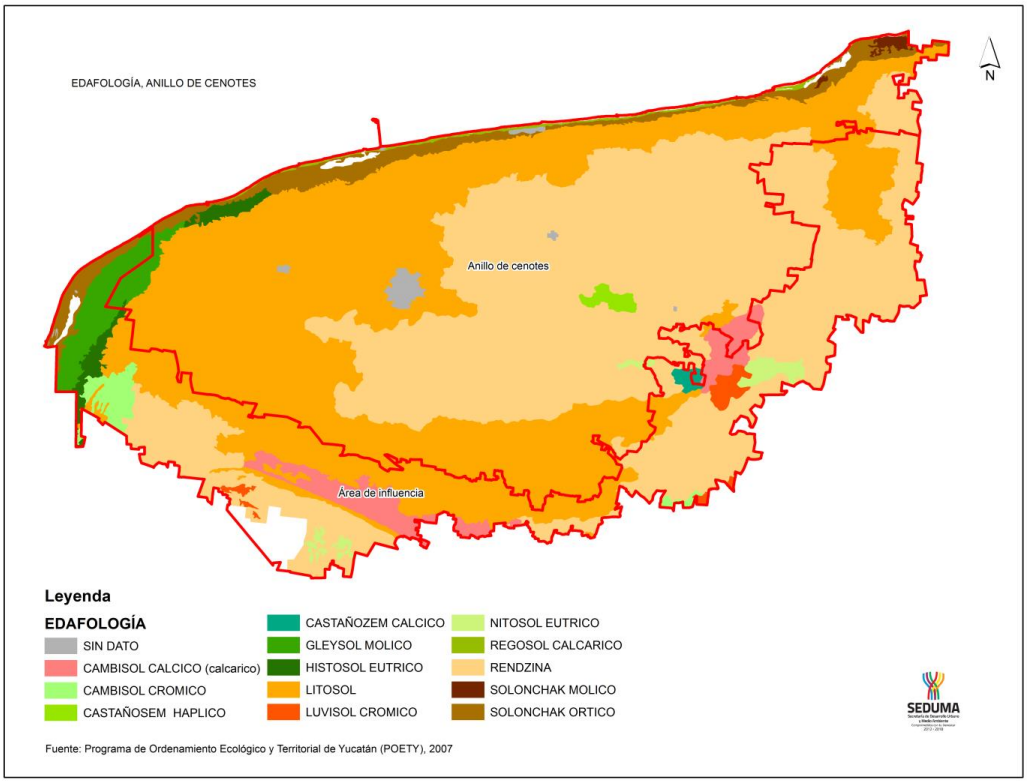
En tercer término, las características topográficas de la entidad tienen una importante relación con las condiciones de humedad del suelo. En los altillos, montículos y formaciones cerriles la cantidad de agua que penetra al interior del suelo es menor que la que recibe en forma de lluvia, debido a que los escurrimientos superficiales la desalojan parcialmente y la concentran en planadas y depresiones circundantes, donde el volumen de agua colectado llega a producir anegamientos e inundaciones de diversa intensidad y duración, sobre todo en los sitios más bajos. De esta manera, se presentan una gran variedad de asociaciones de suelos, por ejemplo, en los terrenos ondulados con montículos se presenta una doble asociación. En las partes elevadas aparecen rendzinas (Box-lu´um) y litosoles (Tsek´el), mientras que en las planadas luvisoles (Kancab) y cambisoles (Chac-lu´um). Los suelos gleysoles y vertisoles (Akálché) según el mayor o menor grado de humedad y el tiempo de permanencia en el perfil del suelo a través del año. Así que puede decirse que en el estado de Yucatán a cada patrón topográfico del paisaje le corresponde una asociación particular de suelos.

Por último, una consideración de carácter general que tiene que ver con la fertilidad del suelo está relacionada con la cantidad de materia orgánica, y su distribución en el perfil edáfico. Bajo condiciones de vegetación selvática (baja y mediana) que crece de manera espontánea en la entidad, el contenido de materia orgánica en el suelo es relativamente alto, por lo general mayor a 5 %. Sin embargo, esta proporción está supeditada al tipo y edad de la cubierta vegetal que los suelos sustentan en un momento dado, misma que año con año constituye un recurso natural cada vez mas alterado por la propia presión de uso de la tierra con fines agrícolas, con excepción de las áreas dedicadas a la ganadería extensiva o simplemente de descanso.

Los suelos de Yucatán presentan serias limitaciones de fósforo y nitrógeno. Después de uno o dos años de uso del suelo, los rendimientos decrecen, aparentemente después del

cuarto año consecutivo las deficiencias de N/P/K son más notables y se procede al cambio de parcela.

Figura IV.58).- Mapa de suelos de la zona geohidrológica del anillo de cenotes en el Estado de Yucatán.



Esto significa que el mantenimiento de la fertilidad natural del suelo y de las condiciones de humedad en niveles favorables para el crecimiento vegetal, es un elemento indispensable para sostener la productividad del suelo, pero que desafortunadamente no depende estrictamente de la fracción mineral del suelo, sino de las características técnicas del tipo de utilización de la tierra en cuestión, así como de las circunstancias económicas y sociales en las que se desarrolla.

De hecho, es muy probable que en la misma medida que la vegetación silvestre no disponga del tiempo necesario para alcanzar su regeneración óptima, el contenido de materia orgánica en los suelos de la entidad, en general, tenderá a decrecer paulatinamente, al igual que su capacidad productiva natural.

Las consecuencias o efectos de la degradación de tierras se manifiestan en: la disminución de los rendimientos agrícolas, pecuarios y forestales; la disminución de la diversidad biológica y alteración ecológica; el empobrecimiento, migración rural y marginación de la población, y el aumento de grupos vulnerables (mujeres y niños); además de influencias de carácter mundial en el contexto del Cambio Climático Global, tales como son el incremento e intensificación de la sequía y otros fenómenos extremos (huracanes e inundaciones, heladas, granizadas, etc.) que afectan directa e indirectamente a la población. Por lo anterior, este fenómeno también tiene implicaciones de carácter global que dependen de factores naturales, socioeconómicos y políticos.

Tabla IV.19).- Superficies de suelos en la zona geohidrológica

Descripción	Área	Superficie zona geohidrológica Ha	Superficie estatal Ha
Sin dato	Influencia	204.97	
Sin dato	Interior	7,949.03	
Total	47%	**8,154.00**	17,226.43
Cambiso calcico (calcarico)	Influencia	37,283.83	
Cambisol calcico (calcarico)	Interior	5,215.52	
Total	59%	**42,499.35**	71,687.99
Cambisol cromico	Influencia 5.9%	**13,916.58**	233,000.00
Castaðosem haplico	Interior 100%	**5,012.59**	5,012.59
Castaðozem calcico	Influencia	2,454.21	
Castaðozem calcico	Interior	822.34	
Total	100%	**3,276.55**	3,276.55
Gleysol molico	Influencia	23,378.23	
Gleysol molico	Interior	9,154.64	
Total	75%	**32,532.87**	43,041.41
Histosol eutrico	Influencia	7,117.92	
Histosol eutrico	Interior	5,700.30	
Total	75%	**12,818.22**	17,088.77
Litosol	Influencia	153,900.00	
Litosol	Interior	501,200.00	
Total	57%	**655,100.00**	1,142,000.00
Luvisol cromico	Influencia 2%	**8,677.90**	400,900.00
Nitosol eutrico	Influencia	10,309.72	
Nitosol eutrico	Interior	960.48	
Total	24%	**11,270.20**	46,503.82
Regosol calcarico	Interior 64%	**7,146.75**	11,162.08
Rendzina	Influencia	270,000.00	
Rendzina	Interior	484,200.00	
Total	41%	**754,200.00**	1,842,000.00
Solonchak molico	Interior 30%	**2,939.27**	9689.63076
Solonchak ortico	Influencia	11,504.55	
Solonchak ortico	Interior	42,432.76	
TOTAL	72%	**53,937.31**	74,222.41

Fuente: Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial de Yucatán (POETY), 2007

Tabla IV.20).- Principales características de los distintos tipos de suelo en la zona geohidrológica.

Principales características de los distintos tipos, subtipos y variantes de suelos encontrados en el estado de yucatán.										
	Nomenclatura maya	Localización	Color	Textura	Espesor (cm)	Pedregosidad	M.O. (%)	Salinidad	Hidromorfismo	pH
Regosol calcárico (variante 1)		Dunas costeras	Café amarillento claro	Arena	> 100	Ausente	< 5	Nula	Nulo	> 8
Regosol calcárico (variante 2)		Cuencas palustres	Café amarillento	Migajón arcilloso	< 50	Moderada	15-20	Media	Ligero	07-Ago
Histosol eutrico (variante 1)		Cuencas palustres	negro	Migajón arenoso	< 50	Moderada	35-40	media	Fuerte	> 8
Histotol eutrico (variante 2)		Cuencas palustres	gris cafesáceo		< 50	Moderada	25-30	Baja	Fuerte	07-Ago
Solonchac gleyico (variante 1)		Cuencas palustres	Gris amarillento claro	Arena	< 50	Ausente	< 3	Muy alta	Fuerte	> 8
Solonchac gleyico (variante 2)		Cuencas palustres	Gris amarillento claro	Franco	< 50	Ausente	05-Oct	Muy alta	Fuerte	> 8
Litosol (distintas variantes)	Chaltun,T'zek-el	Planadas,altillos,montículos y cerros	Negro,café y rojo	Migajón arenoso y migajón arcilloso	< 10	Ausente a abundante	0-40	Nula a muy alta	Nulo a fuerte	07-Ago
Rendzina (negra)	Box-lu'um, Pus-lu'um	Altillos, montículos y cerros	Café oscuro y negro	Migajón arcilloso	< 50	Moderada a muy abundante	15-20	Nula	Ausente	> 8
Rendzina (café)	Kancab	Planadas y altillos	Café y café rojizo	Migajón arcilloso	< 30	Moderada a abundante	Oct-15	Nula	Ausente	07-Ago
Rendzina (roja)	Chac-lu'um	Planadas	Rojo brillante	Migajón arcilloso	< 50	Moderada	< 6	Nula	Ausente	7-7.5
Cambisol crómico	Kancab, Chac-lu'um	Planadas	Café rojizo a rojo	Migajón arcilloso	50-100	Ligera	05-Oct	Nula	Ausente	7-7.5
Cambisol calcárico	Kancab, Chac-lu'um	Planadas	Café a café rojizo	Arcilla	50-100	Ligera	< 5	Nula	Ausente	7.5-8
Luvisol crómico	Kancab,Chac-lu'um	Planadas	Café rojizo a rojo	Arcilla	> 100	Ausente a ligera	05-Oct	Nula	Ausente	7-7.5
Luvisol férrico	kancab, Ek-lu'um	Planadas	Café rojizo oscuro	Arcilla	> 100	Ausente	05-Oct	Nula	Ausente	7-7.5

Otros factores más que intervienen en la degradación de tierras son la sobreexplotación de los recursos naturales; el uso inadecuado de tecnologías en zonas agrícolas de temporal y riego; el abuso de plaguicidas y fertilizantes; la pérdida de control de fuego en labores agrícolas y pecuarias y los incendios forestales; el agotamiento de corrientes y cuerpos de agua superficiales y subterráneos; los asentamientos humanos sobre suelos fértiles, entre otros (Secretaría de Desarrollo Social–Instituto Nacional de Ecología, SEDESOL-INE, 1993).

El 81.46 % del territorio que comprende Yucatán muestra una degradación actual del suelo de ligera a extrema, valor que se aproxima al doble del nacional (45%); sin embargo, el porcentaje más grande de la superficie afectada tiene un grado ligero, como se aprecia en el cuadro siguiente. El nivel de degradación está referido a la reducción de la productividad biológica de los terrenos.

Nivel de degradación de los suelos en Yucatán

Nivel de degradación	Superficie (km2)	Porcentaje del terreno
4. Extremo	236.87	0.54
3. Fuerte	347.10	0.79
2. Moderado	440.64	1.00
1. Ligero	34,937.17	79.14
Terrenos sin uso	32.88	0.07
Terrenos estables	8,067.15	18.28
Cuerpos de Agua	79.28	0.18

Procesos de degradación dominante en Yucatán

Tipo de Proceso	Superficie (km2)	Porcentaje del terreno(%)
Degradación química	30,254.23	68.56
Degradación física	5,693.54	12.90

El proceso dominante en el estado es la degradación química; éste es un tipo de proceso interno de los suelos que ocurre en el 68.56% del área total del estado, equivalente a 30,254.23 km2; corresponde al decrecimiento neto de nutrimentos, es decir, la declinación de la fertilidad y, la reducción del contenido de materia orgánica que también provoca una disminución en la productividad del suelo. El deterioro se debe al balance negativo entre las salidas representadas por los productos de las cosechas, de las quemas, las lixiviaciones, etc. y las entradas, entendidas como la fertilización o el estercolamiento, la conservación de los residuos de cosecha y los depósitos de sedimentos fértiles (SEMARNAT-CP, 2001-2002).

Las grandes áreas destinadas a las actividades agropecuarias en Yucatán, son las que muestran más degradación química por declinación de la fertilidad, otras áreas con este tipo de degradación son las de selvas caducifolias y subcaducifolias colindantes con las agropecuarias. El nivel de deterioro se reporta como ligero en un 97.40% de la superficie con este proceso, en tanto que 1.46% corresponde al nivel moderado, al sur y 1.15 % al fuerte, al norte, en el cordón litoral. Las principales causas del deterioro químico son las actividades agrícolas y la deforestación y remoción de la vegetación. La tendencia, respecto a la tasa de degradación, muestra un incremento ligero en los últimos 5 a 10 años. El segundo proceso de degradación del suelo inducida por el hombre, de acuerdo al área en donde se desarrolla, es el físico (12.90%), que involucra a: la compactación (Fc) caracterizada por la transformación de la estructura del suelo debida al pisoteo del ganado o por el uso frecuente de maquinaria pesada, y a la pérdida de la función productiva de carácter biológico como consecuencia de la urbanización (Fu).

Degradación física de los suelos en Yucatán

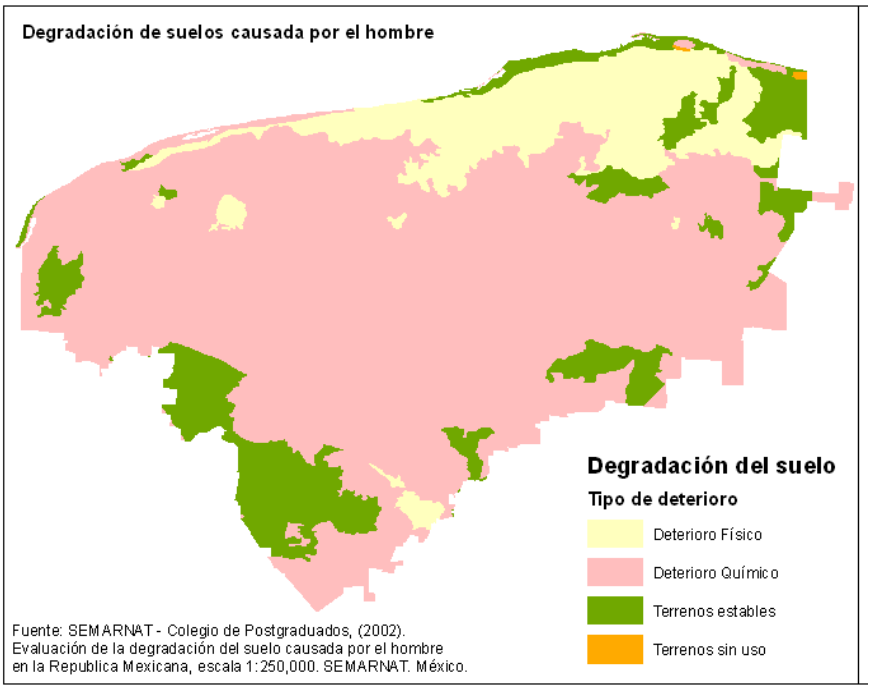
Degradación física por:	Superficie (km2)	Porcentaje del territorio(%)
Compactación	5,456.67	95.84
Áreas cubiertas por concreto o asfalto	236.87	4.16
Total	5,693.54	100.00

A la compactación le corresponde el 95.84% de la degradación física y a la pérdida de la función productiva del suelo por estar cubierto por concreto o asfalto, el 4.16%, (5,456.67 km2 y 236.87 km2, respectivamente).

El fenómeno de compactación se asocia principalmente con la actividad ganadera y el sobrepastoreo en zonas de pastizales naturales, inducidos o cultivados del norte, noreste y sur del estado. El nivel de deterioro se reporta como ligero, sin embargo, localmente hay una notable disminución de la productividad.

En el caso del deterioro físico con pérdida de la función productiva debido al cambio de uso de suelo para funciones urbanas o industriales, comprende las ciudades más grandes, como Mérida, Izamal y Hucnumá, donde el cubrimiento por asfalto y concreto, actividades industriales o extracción de materiales han provocado que el suelo pierda sus cualidades para sustentar a las plantas naturales o cultivadas. El grado de deterioro está considerado como extremo. La tasa de degradación en los últimos 5 a 10 años indica un aumento ligero.

Figura IV.59).- Degradación de suelo y tipo de deterioro en el estado de Yucatán.



Terrenos sin uso. En esta categoría se incluye a las tierras sin vegetación o prácticamente ausente, que básicamente han tenido una degradación natural y la influencia humana ha sido mínima sobre la estabilidad del suelo (SEMARNAT-CP, 2001-002). Ocupan una superficie de 32.88 km2 (0.07%). Dichos terrenos se diferencian, a su vez, en dunas costeras (NUc) que se localizan en la planicie costera, al noreste del estado.

Terrenos estables. Cubren una superficie aproximada de 8,067.15 km2 (18.28%). Se distinguen del tipo que corresponde a unidades del terreno cubiertas por selvas y otros tipos de vegetación en que no presentan signos importantes de perturbación, y hay una estabilidad de manera natural (SN), es decir, la influencia humana sobre el suelo es poca o nula. Sin embargo, algunas de esas áreas son muy vulnerables a cambios que afectan localmente el equilibrio natural (SEMARNAT-CP, 2001-2002). Se distribuyen al norte, este y sur del Estado.

En el estudio de la SEMARNAT-CP (2001-2002) no se señala la erosión hídrica como un proceso importante de degradación de tierras inducida por el hombre, sin embargo, en estudios anteriores se muestran varios sectores con erosión hídrica severa, sobre superficies con vegetación secundaria del flanco noreste de la Sierrita de Ticul (SARH, 1984). Los resultados de este análisis tienen una interpretación regional, sin embargo, son útiles pues muestran las áreas focales, es decir, las que necesitan ser atendidas en el corto plazo pues son también las más vulnerables a los distintos procesos de degradación. De acuerdo con la información examinada, es importante señalar que el estado no presenta más del 1.33% de su superficie con grados fuertes y extremos de degradación de tierras.

Duch (1988) y la SARH (1988) proponen una delimitación de 6 zonas edáficas en correspondencia con la localización de las principales asociaciones de suelos que se presentan en la entidad, aquí solo se describen las que están dentro de la zona geohidrológica.

Zona de suelos halomórficos (regosoles, histosoles y solonchák).

Por su localización a lo largo de la costa, esta zona edáfica se distingue por la presencia de suelos poco desarrollados, los cuales comparten marcadas influencias marinas, desde las características de su matriz mineral arenosa formada en su mayor proporción por residuos conchíferos, hasta la elevada concentración de sales solubles y/o sodio intercambiable que resulta de los movimientos del agua salobre en el interior del perfil. Salvo los suelos profundos de los cordones litorales costeros, generalmente dedicados a la actividad coprera, los demás suelos del conjunto son inapropiados para el desarrollo de actividades agropecuarias, tanto por las restricciones que imponen al crecimiento de los cultivos por los efectos de la excesiva salinidad y el drenaje impedido, como por las dificultades que ofrece al saneamiento y modernización. En esta zona edáfica se asienta la industria salinera y las actividades extractivas artesanales en ciénagas y rías, desde Celestún hasta el Cuyo, localidades extremas de la entidad. En la actualidad, en esta zona edáfica se está desarrollando la acuacultura intensiva o granjas camaroneras como en Dzilám de Bravo y Sisal, así como la acuacultura extensiva y de aprovechamiento diversificado de recursos como en la microcuenca de Chabihau, y el área de Chuburná Puerto. Otras actividades que se realizaban en esta zona era el aprovechamiento forestal, como el palo de tinte, en la actualidad la forestaría esta relegada a la extracción de productos maderables de consumo doméstico, principalmente leña y materiales de construcción rustica, así como la cacería de subsistencia. La principal vocación de esta zona edáfica es aquella dirigida a la conservación y aprovechamiento de la vida silvestre, así como al turismo.

Zona de suelos líticos y pedregosos (litosoles y rendzinas).

Esta zona edáfica ocupa la mayor proporción territorial hacia la porción noroccidental del estado. Se caracteriza por la presencia de suelos muy delgados denominados litosoles y rendzinas, sobreyaciendo a la coraza calcárea, a la que, gracias a su avanzado estado de resquebrajamiento y fracturación, deben su abundante pedregosidad. Ambos tipos de suelos se encuentran estrechamente asociados siguiendo el arreglo del relieve ligeramente ondulado de la zona. Sin embargo, los litosoles se encuentran mayormente distribuidos hacia el norte, occidente y sur, mientras que las rendzinas se ubican tanto en el centro como al oriente de la zona. Estos suelos someros (no mayores de 0.30 m)

presentan fuertes restricciones para el desarrollo de la agricultura. En esta zona el cultivo de henequén resulto muy adaptada al escaso suelo presente, el cual tiene una baja capacidad de almacenamiento de agua en su matriz mineral; en la región oriental se ha utilizado fuertemente para el cultivo de ganado bovino de manera intensiva. La presencia de árboles frutales y la horticultura requieren de excavar numerosas pocetas o cajetes, rompiendo la coraza calcárea expuesta, lo cual resulta en un gran esfuerzo. Estas tierras tienen vocación forestal para maderas tropicales y mielíferas, así como para la vida silvestre.

Bautista-Zuñiga, F. et al , 2004, en su relación entre relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán, presenta los modelos de secuencia de desarrollo de los suelos de montículo.

Figura IV.60).- Modelo de secuencia de desarrollo de los suelos de montículo.

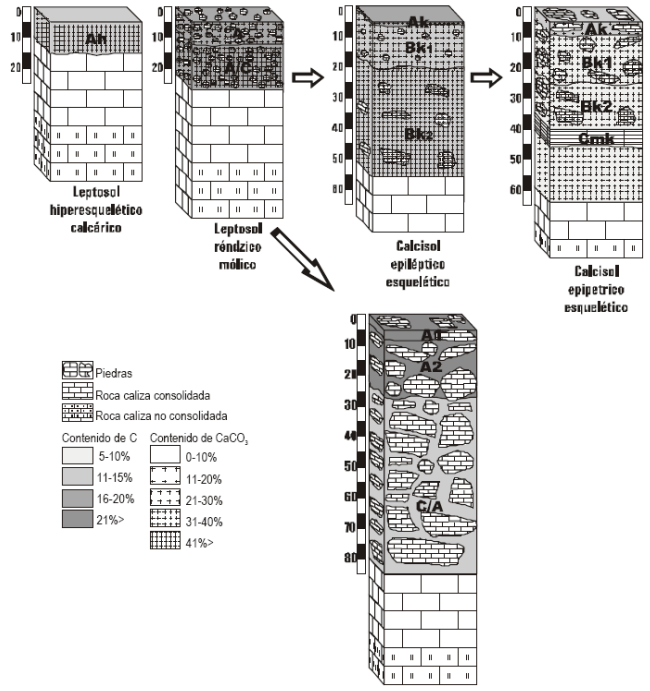


Figura IV.61).- Modelos de secuencia de desarrollo de suelos de planicie.

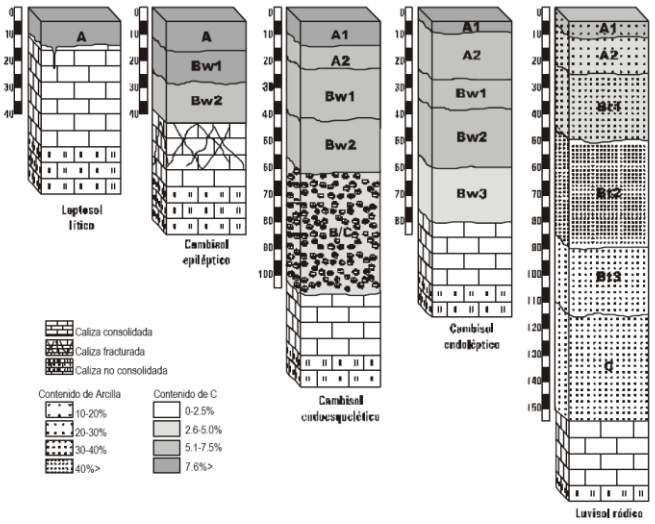
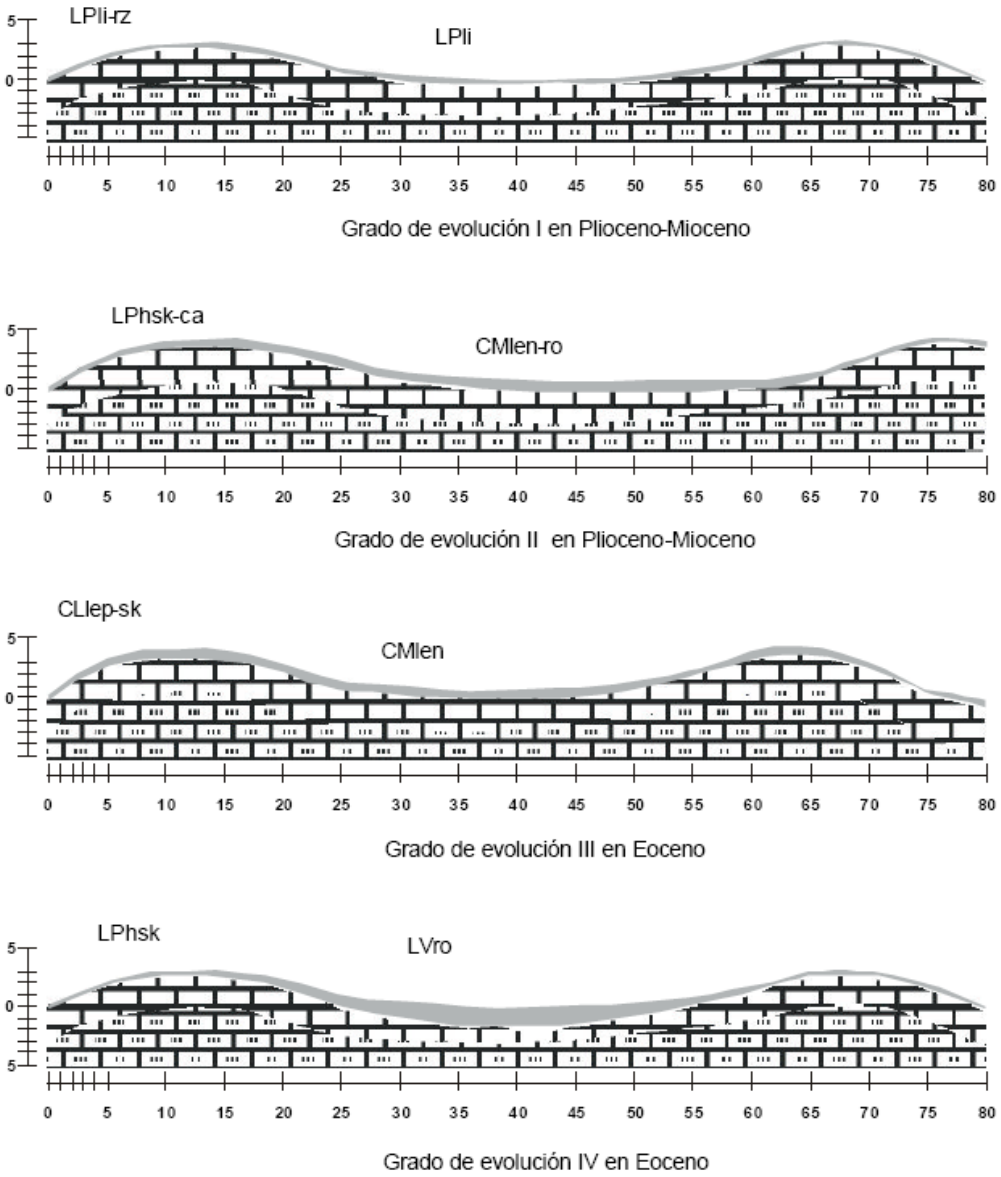


Figura IV.62).- Modelo de grado de evolución de los geosistemas carsticos con base en los patrones de relieve y las catenas.



Una función directa del tamaño de las partículas presentes en el suelo es la densidad, real y aparente, así como la porosidad de este.

La densidad real comprende la cantidad de partículas sólidas por unidad de volumen del suelo. Es una propiedad de los minerales, que puede ser utilizada como propiedad distintiva en Leptosoles. En la mayoría de los suelos minerales, su valor no excede de 2.2 - 2.5 gr/cm3, lo cual se debe a que el cuarzo, feldespatos y silicatos, principales constituyentes, presentan densidades comprendidas dentro de ese valor. Estos valores son similares cuando existe la presencia de grandes cantidades de minerales pesados como magnetita, epídota, circón, turmalina y hornblenda, entre otros. La materia orgánica repercute en los valores de la densidad, originando valores bajos de densidad real (1.2 a 1.5 gr/cm3).

La densidad aparente comprende tanto las partículas como el espacio poroso del suelo. Es una propiedad que permite la valoración agronómica del suelo, debido a que de ella dependen principalmente la percolación, infiltración y aireación (León, 1984). Se utiliza en diferentes cálculos y en la caracterización de los horizontes de suelos; por ejemplo: 1) La presencia de capas endurecidas (2.0 gr/cm3) provoca problemas en el desarrollo de las raíces de las plantas; 2) Presencia de amorfos (< 0.85 gr/cm3) como el Alófano en Andisoles; 3) Grado de intemperización, comparando las densidades de los horizontes superficiales con la del horizonte C; 4) Cálculo del peso de una capa de suelo que es un dato indispensable para expresar analitos en kg/ha.

En algunos estudios realizados a nivel de parcela, como la que se presenta a continuación representada en colores de suelo, relacionados también con el microrelieve de la zona, se observa en la parte baja un suelo de color rojo con valor espectral 5YR asociado a una nula pedregosidad y rocosidad; el color café rojizo y negro se corresponden con el suelo delgado (1 a 29 cm), esto concuerda con lo reportado por Bautista *et al.,* (1999).

El grupo I está caracterizado por un color rojo (Leptosol crómico), de origen mineral y presenta las mayores densidades, está conformado por 10 subparcelas (18.5%), sin piedras, ni rocas, es un grupo que se localiza en la zona más profunda y se distribuye homogéneamente en la parte oeste de la parcela.

El grupo II (Leptosol crómico) de color café rojizos y rojos, de clase textural arcilloso, con baja pedregosidad y rocosidad, contiene un valor bajo de carbono orgánico y baja capacidad de campo.

El grupo III (Leptosol lítico) presenta colores café rojizos, rojos, con piedras, altos contenidos de carbono orgánico y son someros.

El grupo IV (Leptosol lítico/Leptosol esquelético) son suelos pedregosos arcillosos, ocupa la mayor extensión (22.22%), ubicado en la parte Este. Predomina el color café-rojizo, sin embargo, se incluyen dos subparcelas de color rojo y una de color negro. En este grupo existe una alta variación en la textura y contenido de carbono orgánico.

El grupo V (Leptosol lítico esquelético) presenta un suelo de color café rojizo, negro, pedregoso y limoso.

Tabla IV.21).- Distribución de los grupos en función del color de los parches.

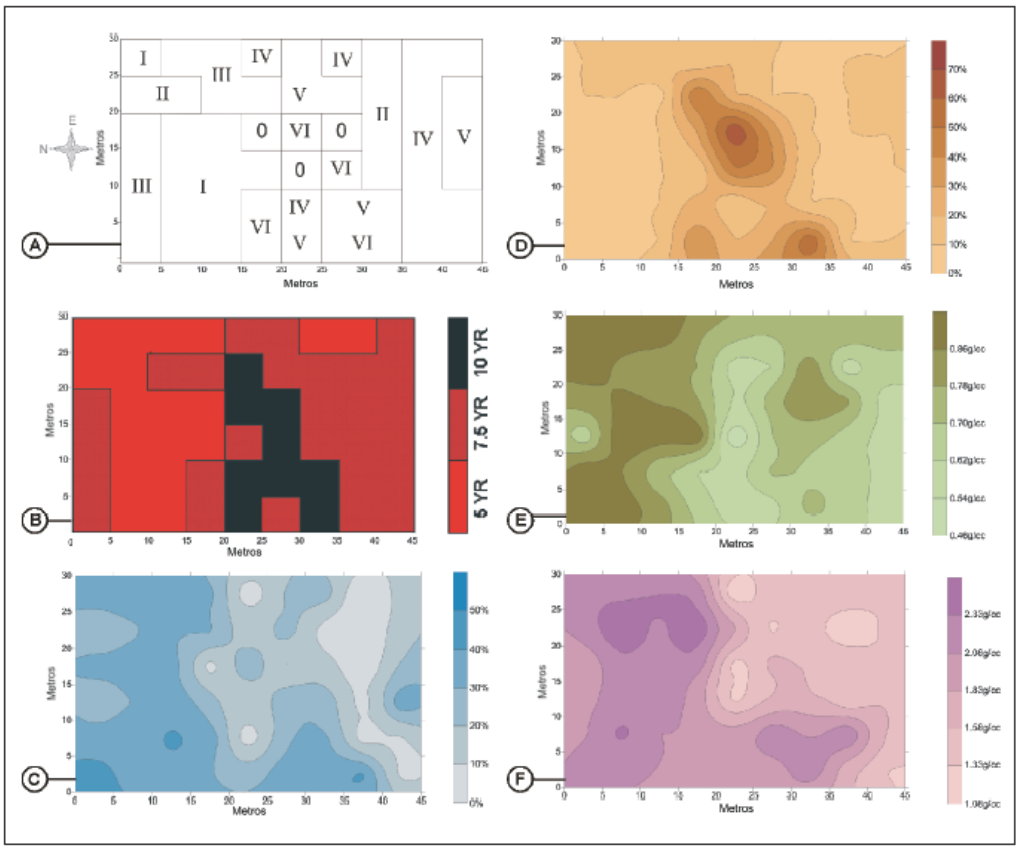
		Color			
		Rojo	Café-rojizo	Negro	**Unidad edáfica***
Grupo	0	X	X	X	
	I	X			Leptosol crómico
	II	X	X		Leptosol crómico
	III	X	X		Leptosol lítico
	IV	X	X	X	Leptosol réndzico esquelético húmico / Leptosol lítico esquelético húmico
	V		X	X	Leptosol esquelético húmico
	VI		X	X	Leptosol lítico húmico
	Total de superficie	33%	50%	17%	

* De acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO/UNESCO, 1999).

Tabla IV.22).- Estadistica descriptiva de los grupos

	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V	Grupo VI
Piedras (%)	16 ± 12	20 ± 5	40 ± 12	63. ±12	66 ± 10	22 ± 4
Rocas (%)	9 ± 2	10 ± 0	14 ± 16	10 ± 0	15 ± 5	44 ± 17
COT (%)	5.69 ± 2.53	7.40 ± 3.70	9.21 ± 2.84	12.55 ± 4.37	12.49 ± 2.95	13.39 ± 5.93
DA (g cc^{-1})	0.87 ± 0.07	0.81 ± 0.07	0.83 ± 0.09	0.68 ± 0.08	0.64 ± 0.06	0.65 ± 0.05
DR (g cc^{-1})	2.17 ± 0.12	1.81 ± 0.46	2.17 ± 0.22	1.62 ± 0.37	1.63 ± 0.39	1.84 ± 0.36
Arcilla (%)	42 ± 7	51 ± 9	41 ± 4	46 ± 23	29 ± 10	25 ± 14
Limo (%)	34 ± 5	21 ± 9	34 ± 6	12 ± 13	22 ± 10	32 ± 5
Arena (%)	24 ± 5	28 ± 4	25 ± 5	42 ± 20	45 ± 10	40 ± 12
Prof. (cm)	23.85 ± 13.45	20.16 ± 7.06	9.46 ± 3.38	11.52 ± 4.66	9.86 ± 2.88	6.75 ± 4.15
CC (%)	33.01 ± 4.01	34.91 ± 4.98	36.76 ± 4.20	37.99 ± 4.59	38.75 ± 5.66	39.92 ± 3.08

Figura IV.63).- Mapas parcelarios.



A=mapas de grupos de suelos; B=mapa de color superficial del suelo; C= Mapa de limo; D= Mapa de carbono orgánico total; E= Mapa de densidad aparente y F= Mapa de densidad real.

El grupo VI (Leptosol lítico húmico) presenta un color negro, café rojizo, rocoso y tiene el valor más alto de carbono orgánico en toda la parcela y la más alta capacidad de campo; se caracteriza por conservar un mayor tiempo su humedad, debido a que la pedregosidad y rocosidad reducen la evaporación.

La pedregosidad y rocosidad favorecen un incremento del carbono orgánico y la capacidad de campo, como consecuencia de la estabilización del humus por el calcio derivado del material geológico. Sin embargo, deben tomarse en cuenta como factores limitantes en la producción de los cultivos y el empleo de ciertas tecnologías agrícolas.

La clasificación de los suelos presentes en la zona geohidrológica del anillo de cenotes corresponde al establecido en 1961 por la FAO y la UNESCO.

Regosol (Rc).- (o arenosotes)

Son suelos formados por materiales no consolidados, excluyendo a los depósitos aluviales recientes, no presentan otros horizontes de diagnóstico más que un A ócrico; carecen de propiedades hidromórficas dentro de los primeros 50 cm. Cuando la textura es gruesa, carecen de laminillas de acumulación de arcilla. Los regosoles calcáricos presentan altas concentraciones de carbonato de calcio entre los 20 y 50 cm. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable, dependiendo del terreno donde se encuentren.

Horizonte C_1.- de 0 a 10 cm de profundidad. Color amarillo grisáceo obscuro (2.5 y 4/2) en seco y amarillo grisáceo obscuro (2.5 y 5/2) en húmedo, textura arenosa, estructura granular pequeña, consistencia suelta en seco y en húmedo y ligeramente adherente en saturado, abundantes poros finos, permeabilidad muy rápida, pocas raíces finas con orientación en todas direcciones, reacción al HCl. 18 % de materia orgánica y 87.6 % de carbonato de calcio. 88 % de arena, 6 % de limo y 6 % de arcilla.7.9 de pH en agua.

Horizonte C_2.- de 10 a 100 cm de profundidad. Color amarillo grisáceo (2.5 y 6/2) en seco y amarillo grisáceo (2.5 y 7/2) en húmedo, textura arenosa, estructura granular pequeña, consistencia suelta en seco y en húmedo y ligeramente adherente en saturado, abundantes poros finos, permeabilidad muy rápida, muchas raíces gruesas y medias con orientación en todas direcciones, reacción al HCl. 1.8 % de materia orgánica y 86.3 % de carbonato de calcio. 93 % de arena, 3 % de limo y 4 % de arcilla. 7.9 de pH en agua.

Horizonte C_3.- de 100 a 175 cm de profundidad. Color amarillo opaco (10 y 7/2) en húmedo, textura arenosa, estructura granular pequeña, consistencia suelta en seco y en húmedo y ligeramente adherente en saturado, permeabilidad muy rápida, reacción al HCl. 1.03 % de materia orgánica y 87.6 % de carbonatos. 90 % de arena, 4 % de limo y 6 % de arcilla. 7.9 de pH en agua.

Histosol.-

Los histosoles son suelos que presentan contenidos de materia orgánica muy elevados, por lo regular superiores al 20 %, y que se forman debido a la acumulación de residuos de tejidos vegetales y animales sobre la superficie rocosa o de cualquier otro suelo mineral. Se encuentran asociados a terrenos pantanosos, principalmente aquellos que se localizan en las inmediaciones de las lagunas costeras y ciénagas, particularmente en los petenes. Existen dos variantes: en primer lugar, se reconoce la presencia de histosoles que muestran un horizonte hístico de color café oscuro, casi negro, cuyo contenido de materia orgánica es poco menos del 40 %, el cual descansa sobre un depósito mineral de textura arenosa, generalmente similar a los regosoles calcáricos. El horizonte superficial, por su naturaleza orgánica, constituye una capa de suelo poco compacta que lo hace muy liviano

y con un incipiente desarrollo estructural. Presenta una fuerte reacción al HCl y un pH alcalino de 8 en la superficie y con una clara tendencia a incrementarse conforme aumenta la profundidad, generalmente menor de 1 metro. La segunda variante de histosoles encontrada en la región tiene sus diferencias más evidentes en el color sensiblemente más claro que muestra el horizonte orgánico y en la presencia del nivel de agua subterránea muy cercano a la superficie del suelo. El contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y la concentración salina y sódica, muestran valores ligeramente inferiores que en el caso anterior. La denominación completa que le corresponde a las dos variantes de este grupo de suelos es la de histosol eútrico (Oe), con la cual se pone de manifiesto la ausencia de condiciones de fuerte acidez en los primeros 50 cm del perfil. No son susceptibles a la erosión.

Solonchác (Zo).-

Se distinguen por la presencia de un horizonte sálico (rico en sales solubles) dentro de la porción del perfil comprendida desde su superficie hasta una profundidad de 50 cm. Se localizan en la franja de terrenos bajos y pantanosos de la ciénaga que se extiende a lo largo de la costa, y en sus inmediaciones, motivo por el cual se destacan en la morfología de su perfil las influencias del agua y la salinidad que las caracteriza. El nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie del suelo, por lo regular a menos de 30 cm de profundidad. La mayoría de estos suelos muestran efectos de gleyzación (hidromorfismo) en los horizontes más superficiales por lo que se denominan como solonchác gleyico (Zg). En ciertos casos es posible que a pesar de que el nivel freático esté presente a poca profundidad, el fenómeno de la gleyzación no se manifieste morfológicamente en el perfil del suelo con su característica coloración de moteado gris a rojo, lo cual puede derivar en que a estos suelos se les aplique la denominación de solonchác órtico. Los solonchác gleyico son suelos de color gris amarillento muy claro, incluso estando húmedos. Son suelos con alto contenido de sales solubles, tal como lo indican sus valores de conductividad eléctrica superiores a los 20 mmhos/cm como regla general, y casos en los que alcanza poco menos de 60. Son suelos alcalinos, con valores de pH que varían entre 8 y 9, ricos en calcio y magnesio y relativamente bajos en fósforo. Existen dos variantes: la primera tiene una textura más gruesa con un contenido de arena que sobrepasa el 80 %; en contraste la materia orgánica apenas alcanza el 2 % por lo cual la capacidad de intercambio catiónico es muy baja, lo que permite que el sodio represente un alto porcentaje de saturación con las implicaciones fisicoquímicas que conlleva esta condición frente al crecimiento vegetal. La otra variante tiene una textura más fina con un contenido de arena menor al 40 %. El porcentaje de materia orgánica es mayor con valores de hasta 7.5 % en el estrato superficial. La capacidad de intercambio catiónico aumenta relativamente lo que hace decrecer la saturación con sodio en similar proporción. En las áreas que ocupan los solonchác es frecuente observar instalaciones salineras destinadas a la explotación de sal común. Son poco susceptibles a la erosión.

Litosol (I).- (leptosol)

Son suelos de hasta 10 cm de espesor limitados por roca dura, continua o quebradiza y coherente. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona en donde se encuentre, pudiendo ser desde moderada a alta.

Horizonte A_1.- de 0 a 20 cm de profundidad. Color gris cafezáceo claro (7.5 YR 7/1) en seco y negro (7.5 YR 2/1) en húmedo; textura franco arcillo arenosa, estructura granular, consistencia en seco suelta, en húmedo friable y ligeramente adherente en saturado,

abundantes poros muy finos, permeabilidad rápida, pocos fragmentos rocosos y minerales angulares de grava con roca caliza no alterada, reacción al HCl fuertemente, abundantes raíces finas y medias en dirección vertical y horizontal. 22 % de materia orgánica y 7.5 % de carbonato de calcio. 48 % de arena, 19 % de limo y 33 % de arcilla. 7.7 de pH en agua.

Rendzina (E).-(leptosol)

Son suelos que tienen un horizonte A mólico que contiene o sobreyace directamente a un material calcáreo, con un equivalente de carbonato de calcio mayor del 40 %, carece de propiedades hidromórficas dentro de los primeros 50 cm, así como de las características de diagnóstico de los vertisoles y de alta salinidad. Su susceptibilidad a la erosión es moderada.

Horizonte A_1.- de 0 a 20 cm de profundidad. Color en seco negro cafezáceo (7.5 YR 3/4), y en húmedo negro (10 YR 2/1) sin manchas; textura arcillosa, estructura granular media fuertemente desarrollada, consistencia en seco dura, en húmedo friable y en saturado no adherente y plástica, abundantes macro y microporos, sin cementación, con abundantes fragmentos de roca calcárea de formas redondeadas (gravas), reacción al HCl, con abundantes raíces finas y medias y pocas gruesas de orientación diversa. 10.6 % de materia orgánica y 7 % de carbonato de calcio. 17.5 % de arena, 28 % de limo y 54.5 % de arcilla. 7.4 de pH en agua.

Horizonte C.- a 20 cm de profundidad. Roca calcárea resquebrajada.

Tabla IV.23).- Los suelos presentes en la zona geohidrológica del anillo de cenotes presentan las siguientes características importantes en el ciclo del agua:

Tipo de suelo	Ubicación	Textura	M.O %	Hidromorfismo	Capacidad de campo %	Capacidad de de agua aprovechable %	Infiltración cm/hr
Regosol	Duna costera	Arenoso	≤ 5	Nulo	6 - 9	5 - 6	≥ 2.5
	Palustre	Migajón arcilloso	15 - 20	Ligero	21.5	11.3	1.75 – 2.5
Histosol	Palustre - peten	Migajón arcilloso	35 -40	Fuerte	21.5	11.3	≥ 2.5
	Palustre	Migajón arenoso	25 - 30	Fuerte	11.3	7.9	≥ 2.5
Solonchác	Palustre	Arena	≤ 3	Fuerte	6 - 9	5 - 6	1.75 – 2.5
	Palustre	Franco	≤ 8	Fuerte	18	11.3	1.75 – 2.5
Litosol	Planicies y altillos	Migajón arenoso a migajón arcilloso	0 - 40	Nulo a Fuerte	14 - 21	10 - 12	≥ 2.5
Rendzina	Planadas	Migajón arcilloso		Ausente	21.5	11.3	
	Color Negro		15 - 20				≥ 2.5
	Color Café		6 - 15				1.75 – 2.5
	Color Rojo		≤ 6				0.25–1.75

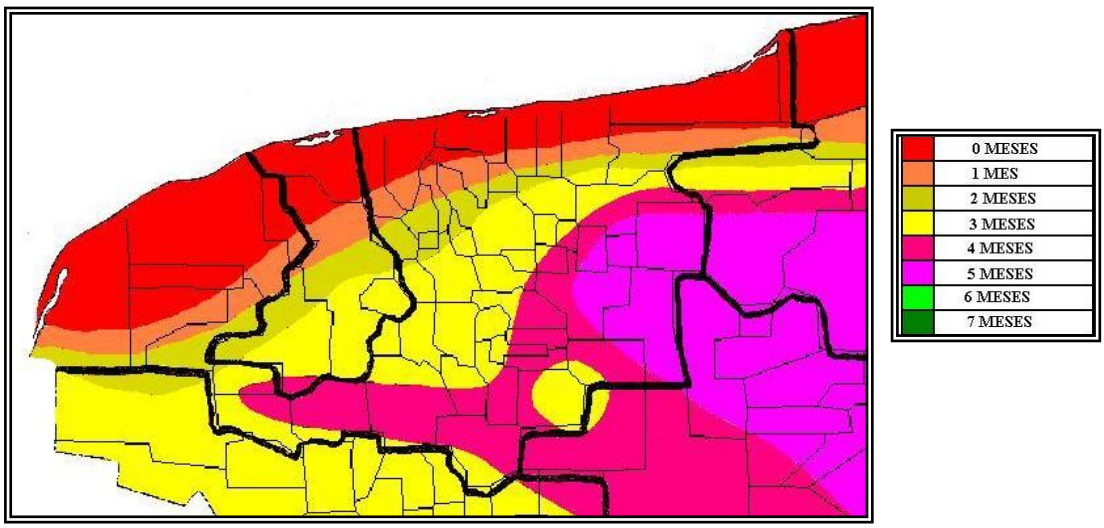
De acuerdo con la Carta de Humedad del Suelo elaborada por INEGI, basada en cálculos según el Segundo Sistema de Clasificación Climática de Thornthwaite de 1948. El concepto de humedad en el suelo es equivalente al de Humedad Almacenada en el Suelo

de ese Sistema. Se toma en cuenta una lámina de 100 mm de agua útil en el suelo para casi todo el territorio, salvo algunos casos que se consideró de 150 mm para suelos planos y profundos, y de 50 mm para suelos someros o sumamente permeables. La humedad del suelo se determina cuando la precipitación de un mes supera a la evapotranspiración potencial de ese mes, y esa diferencia se manifiesta como agua que ingresa en el suelo superficial mojándolo. Si esta diferencia es positiva y persiste, el suelo llegará a estar eventualmente saturado y alcanzará la condición de suelo a capacidad de campo. Este último concepto responde a la cantidad de agua que permanece en el suelo después de que el exceso ha sido drenado, y el movimiento del agua a capas más profundas ha cesado prácticamente, en esta condición las plantas no sufren carencia de agua. Esta condición esta cuantificada como meses en los que se alcanza la cantidad fijada de 150, 100 o 50 mm de almacenamiento de agua.

En la figura siguiente se observa que en toda la región costera incluyendo parte de la Ciudad de Mérida, se observan condiciones muy críticas en donde la humedad del suelo, va de 0 meses a 2 meses, con al menos un mes a saturación de campo. Hacia el oriente, sobre la planicie interior y cerca del límite con el estado de Quintana Roo, las condiciones de humedad del suelo se elevan a 7 meses con 5 meses a condición de saturación de campo. Hacia el sur se extiende una gran superficie que alcanza solo los 4 meses con al menos 1 a 2 meses a saturación de campo.

En el caso de la zona oriental que alcanzan los 7 meses de humedad en el suelo, se entiende que por consiguiente los 5 meses restantes se de déficit de agua, o sea cuando el suelo ha agotado se humedad hasta un punto donde la mayoría de las plantas son incapaces de obtenerlas y por lo tanto se marchitan, a excepción de las plantas con raíces muy profundas y/o adaptadas a estas condiciones climáticas, como sucede en las regiones secas.

Figura IV.64).- Mapa de humedad en el suelo en la zona geohidrológica del anillo de cenotes.



IV.5).- Vegetación

La distribución de la precipitación determina la presencia de selvas bajas caducifolias espinosas y de cactáceas en el área cárstica denudativa de la zona geohidrológica del anillo de cenotes. En estas selvas caducifolias el tiempo en que los árboles se mantienen sin hojas depende de la disponibilidad de agua en el suelo, de aquí la importancia del sahcab como reservorio de humedad durante la temporada anual de secas, donde se pueden observar árboles siempre verdes, sin embargo, estos últimos pueden presentarse también en las áreas donde el manto freático está muy cerca de la superficie, como en la selva inundable, donde es posible que sus raíces estén próximos al borde capilar del acuífero. Conforme nos aproximamos a la costa y el periodo de sequía es más prolongado y la precipitación total disminuye, se desarrolla una vegetación tipo sabana, con grandes extensiones de pastos y otros xerófitos. Cuando existe disponibilidad de agua estos pastos crecen vigorosamente. En estos suelos inundables donde también se desarrollan muchas plantas halófitas como manglares, el suelo nunca se seca por completo, la principal limitante aquí no es la cantidad de agua disponible sino la salinidad y el intercambio gaseoso entre el suelo y el agua.

Figura IV.65).- Mapa de vegetación y uso de suelo de la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

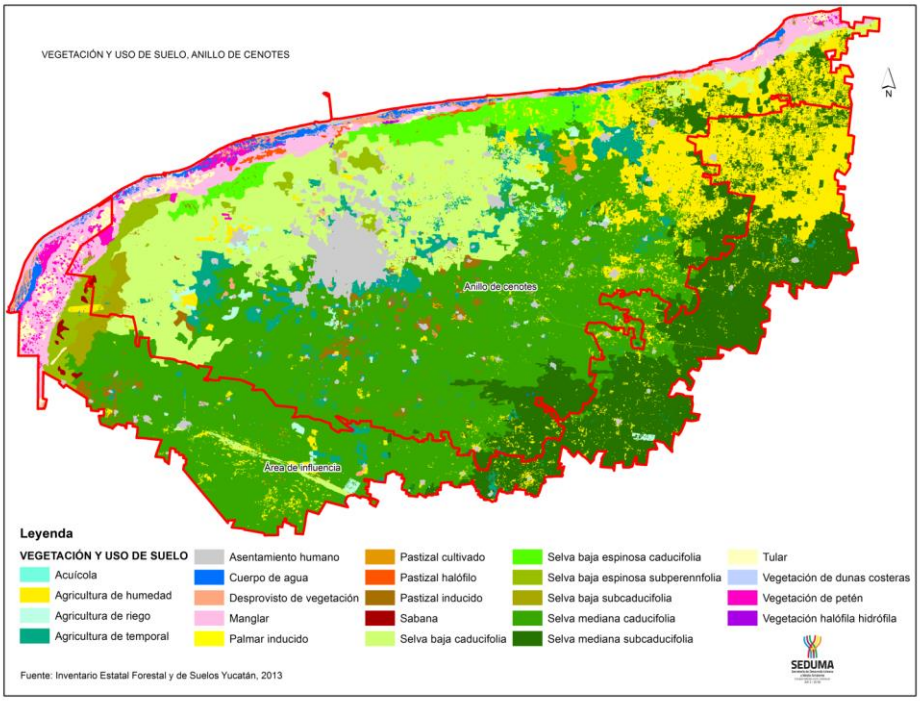


Tabla IV.24).- Superficies de vegetación y uso de suelo de la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

Tipo de vegetación	Área	Superficie en la zona geohidrologica del anillo de cenotes Ha	Superficie estatal Ha
Acuícola	Interior 100%	**126.08**	126.08
Agricultura de humedad	Interior	108,812.51	
Agricultura de humedad	Influencia	84,084.75	
TOTAL	36%	**192,897.26**	529,084.72

Agricultura de riego	Interior	7,082.68	
Agricultura de riego	Influencia	2,549.60	
TOTAL	47%	**9,632.28**	20,282.66
Agricultura de temporal	Interior	54,196.58	
Agricultura de temporal	Influencia	5,860.17	
TOTAL	65%	**60,056.75**	91,527.04
Asentamiento humano	Interior	54,925.29	
Asentamiento humano	Influencia	3,936.57	
TOTAL	81%	**58,861.87**	72,592.71
Cuerpo de agua	Interior	10,659.41	
Cuerpo de agua	Influencia	2,888.43	
TOTAL	50%	**13,547.84**	26,999.97
Desprovisto de vegetación	Interior	9,872.00	
Desprovisto de vegetación	Influencia	1,960.39	
TOTAL	67%	**11,832.38**	17,619.41
Manglar	Interior	41,133.56	
Manglar	Influencia	23,028.66	
TOTAL	70%	**64,162.22**	90,970.96
Palmar inducido	Interior 100%	**162.34**	162.34
Pastizal cultivado	Interior 100%	**1,578.08**	1,578.08
Pastizal halófilo	Interior 100%	**2,640.46**	2,640.46
Pastizal inducido	Interior	14,568.77	
Pastizal inducido	Influencia	5,597.56	
TOTAL	31%	**20,166.33**	64,490.85
Sabana	Interior	370.67	
Sabana	Influencia	1,543.07	
TOTAL	96%	**1,913.75**	1,984.56
Selva baja caducifolia	Interior	222,379.86	
Selva baja caducifolia	Influencia	6,895.65	
TOTAL	91%	**229,275.51**	250,443.36
Selva baja espinosa caducifolia	Interior	**43,920.56**	45,318.42
Selva baja espinosa subperennfolia	Interior	19,587.25	
Selva baja espinosa subperennfolia	Influencia	11,803.80	
TOTAL	62%	**31,391.05**	50,734.36
Selva baja subcaducifolia	Interior	6,156.44	
Selva baja subcaducifolia	Influencia	6,113.44	
TOTAL	100%	**12,269.88**	12,269.88
Selva mediana caducifolia	Interior	375,559.77	
Selva mediana caducifolia	Influencia	203,881.63	
TOTAL	89%	**579,441.40**	652,684.98
Selva mediana subcaducifolia	Interior	81,337.56	
Selva mediana subcaducifolia	Influencia	175,478.56	
TOTAL	14%	**256,816.12**	1,891,713.66
Tular	Interior	6,725.68	

Tular	Influencia	7,332.01	
TOTAL	64%	**14,057.69**	21,828.12
Vegetación de dunas costeras	Interior	1,597.64	
Vegetación de dunas costeras	Influencia	664.63	
TOTAL	52%	**2,262.27**	4,341.11
Vegetación de petén	Interior	6,619.26	
Vegetación de petén	Influencia	6,198.37	
TOTAL	85%	**12,817.63**	15,062.42
Vegetación halófila hidrófila	Interior 100%	**225.77**	225.77

Fuente: Inventario Estatal Forestal y de Suelos Yucatán, 2013

Las plantas xerófitas son adaptadas a ambientes secos. En general hay 3 mecanismos a través de los cuales las xerófitas mantienen su equilibrio hídrico a pesar de la aridez de su entorno:

1).-Reducción de la pérdida de agua, ya sea por reducción de las hojas como la *Acacia sp*., en la sabana, o transformando las hojas en espinas o escamas como en las cactáceas; otras más cubren sus hojas por una pared celular gruesa y cerosa que previene la pérdida cuticular de agua o cierran sus estomas (estructuras celulares que controlan la transpiración, principalmente) durante el día.

2).- Incremento de la absorción de agua a través del incremento del volumen y tasa de crecimiento radicular en mayor proporción que la caulinar, asegurando que solo una pequeña proporción de la planta quede expuesta a la atmósfera como en muchos pastos y,

3).- Conservación de agua dentro de los tejidos de la planta, es decir, plantas suculentas con un gran número de células cuyas vacuolas se han expandido a costa de los espacios intercelulares, como en las raíces de la *Ceiba sp.,* en los tallos de muchas cactáceas o en las hojas como en las *Agave sp.*

Plantas xerófitas se les encuentra en suelos regosol sobre la barra arenosa, se han diferenciado dos grandes comunidades de vegetación: la vegetación de matorral se caracteriza por la presencia de palmas como *Thrinax radiata* (chiit), *Coccothrinax readii* (nakax), que se entremezclan con *Coccoloba uvifera* (uva de mar), *Agave angustifolia* (agave), *Tourmefortia gnaphalodes,* y la orquídea *Schomburgkia tibiscinis.* En la zona de pioneras las especies más representativas son *Sesuvium portulacastrum, Suriana marítima, e Ipomea pes-caprae*. De igual forma a las xerófitas se les encuentra en la selva baja caducifolia, con suelos tipo litosol y rendzina cuyo carácter peculiar es la presencia de cactáceas candelabriformes, intercalados con regularidad. Los más frecuentes son: *Cephalocereus gaumeri*, *Acanthocereus pentagonus* y *Pterocereus gaumeri*. En el estrato arbóreo se presentan especies como *Beaucarnea pliabilis* (mechuda o despeinada), B*ursera simaruba* (chacá), *Acacia gaumeri*, *Mimosa bahamanensis*, *Selenicereus testudo* (pitaya), *Brosimum alicastrum* (ramón), *Ceiba aesculifolia* (ceiba) y *Enterolobium cyclocarpum* (pich)

Las plantas helófitas que crecen en suelos inundables, temporales o permanentes y donde el suelo por lo regular está saturado de agua. Existen 2 variedades, las glicófitas, que para mantener su equilibrio hídrico la concentración de sólidos disueltos en la

solución edáfica debe ser menor que la del interior de las células radiculares y solo toleran la alta concentración de sales a través de reducir la absorción de agua; y; las halófitas, que se desarrollan en suelos salinos, capaces de absorber agua con libertad ya que sus células contienen grandes cantidades de sales que pueden ser excretadas sobre la superficie de las hojas. En estos suelos inundables los poros están llenos de agua de tal modo que los gases tienen que difundirse a través de la solución edáfica, lo cual es muy lento, de aquí que se presenten abundantes organismos anaeróbicos, los cuales utilizan nitratos y sulfatos como sus principales fuentes para la respiración.

Muchas de estas plantas tienen grandes espacios aéreos intercelulares (aerenquima) que permiten transportar el oxígeno desde los vástagos hasta las raíces. En el caso de *Rhizophora sp*., la adaptación consiste en sus raíces aéreas con abundantes lenticelas y en caso de *Aviccenia sp*., con la producción de neumatóforos. Tanto en las glicófitas como en las halófitas, la germinación de semillas y sobrevivencia de la plántula en condiciones de salinidad es difícil. Por tanto, las semillas de las primeras solo germinan durante la época húmeda, después de que se han removido las sales de las capas superficiales del suelo. En las halófitas como el mangle, la semilla germina antes de abandonar el tronco progenitor, condición conocida como viviparidad.

En el manglar, las especies dominantes están representadas por *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle blanco) y *Laguncularia racemosa* (mangle negro). Otras especies que se asocian con estas son *Conocarpus erectus* (botoncillo) y *Batis marítima*.

En los petenes, la característica principal es la presencia de especies vegetales poco comunes en áreas con agua salada, como *Manilkara achras* (chicle), *Ficus tecolutensis* (álamo), *Achrosticum sp* (helechos), *Bravaisia tubiflora*, y *Sabal yapa* que llegan a alcanzar alturas de 25 metros o más. Entre las especies más representativas de la selva inundable y la sabana tenemos a *Typha domingensis, Eleocharis cellulosa, y Cladium jamaicensis* en el estrato herbáceo. En el estrato arbustivo destacan *Byrsonima crassifolia* y *Cresccentia cujete*. Las especies más representativas del primero son *Hematoxilon campechianum* (palo de tinte), *Metopium brownei* (chechem negro), *Conocarpus erectus* (botoncillo), *Thrinax radiata*, y *Bursera simaruba.*

Las plantas hidrófitas son aquellas plantas que viven en el agua, las cuales pueden ser flotantes, suspendidas, arraigadas sumergidas y arraigadas de hojas flotantes. Las plantas totalmente sumergidas contienen grandes espacios intercelulares, que actúan como cámaras para almacenar gases, mientras que las que poseen hojas flotantes cerosas son capaces de retener gotas de agua sobre la superficie y de realizar el intercambio de gases con facilidad.

En la zona costera adyacente se encuentran grandes camas de plantas sumergidas como el pasto *Thalassia testudineum*, algas rojas (*Euchema sp*) y verdes (*Halimeda sp*). En las ciénagas o rías el pulso de corrientes que induce la marea durante la bajamar dejan expuestas una gran variedad de macroalgas y pastos marinos, como *Halodule wrigthii, Syringodium filiforme, Chara fibrosa* y *Enteromorpha oerstedi*. En cenotes y manantiales costeros se desarrollan especies como *Nymphea ampla y Pistia stratoides*.

La interacción entre la atmósfera y la vegetación determinan un sistema que regula la cantidad de agua disponible para la comunidad, siendo la cobertura vegetal el factor de

más relevancia que controla este proceso. La relación hidrodinámica entre las selvas, los petenes y las demás comunidades vegetales se conocen muy poco.

Granados et al (2000), evalúan la precipitación neta que entra a un sistema de Petén, estimando la intercepción que provoca la cobertura vegetal y la escorrentía foliar y cortical. La escorrentía foliar es la precipitación que pasa a través del follaje de la comunidad vegetal y cae al suelo, y la escorrentía cortical es la precipitación interceptada y colectada en el dosel, la cual es canalizada hasta el suelo a través de los fustes de las plantas de la comunidad. El petén presenta tres estratos, alto, medio y bajo o de *Bravaisia/Achrosticum*, las cuales forman los matorrales más densos.

Algunas características importantes de las especies que pueden ser relevantes en la evaluación de la escorrentía cortical son la estructura del árbol y el tipo de corteza que presenta. De esta manera en el petén, las especies con corteza rugosa son *Laguncularia y Conocarpus*; las de corteza lisa son los *Ficus y Rhizophora*. Por otro lado las especies con troncos rectos *son Laguncularia, Rhizophora y Ficus;* y las de troncos retorcidos e inclinados son *Conocarpus y Laguncularia* (en ciertas ocasiones).

En el año de 1996 se presentaron un total de 28 eventos lluviosos en el área del petén (ubicado en Sisal), con un promedio por evento de 7.48 mm, de los cuales la escorrentía cortical fue de 1.01 mm y la escorrentía foliar fue de 2.86 mm, lo que da una precipitación neta de 3.87 mm, es decir, poco más del 50 % de la precipitación total ingresa efectivamente al interior del petén, el restante es interceptado por el follaje y sujeto a la evaporación de superficie libre.

Tabla IV.25).- Análisis considerando un rango de precipitación pluvial. Se consideran diferente número de eventos para cada análisis.

Rango de =0.5 a 3 mm de pp		n = 3 eventos		
PP (mm)	**EC (mm)**	**EF (mm)**	**PP Neta (mm)**	**Intercepción (mm)**
0.5	0.06658707	0.069444444	0.13603151	0.36396849
1.3	0.06733059	0.176319444	0.243650034	1.056349966
2.2	0.07416061	0.140972222	0.215132833	1.984867167
Avg: 1.3333333	0.06935942	0.128912037	0.198271459	1.135061874
Rango de =3.1 a 5 mm de pp		n = 5 eventos		
PP (mm)	**EC (mm)**	**EF (mm)**	**PP Neta (mm)**	**Intercepción (mm)**
4	0.04931197	0.261458333	0.310770306	3.689229694
4.3	0.01850245	0.460069444	0.478571898	3.821428102
4.5	0.03632782	0.240451389	0.276779211	4.223220789
4.5	0.05041181	0.395833333	0.44624514	4.05375486
5	0.51145718	1.786805556	2.298262737	2.701737263
Avg: 4.46	0.13320225	0.628923611	0.762125858	3.697874142
Rango de =5.1 a 8 mm de pp		n = 4 eventos		
PP (mm)	**EC (mm)**	**EF (mm)**	**PP Neta (mm)**	**Intercepción (mm)**
5.9	0.058551	0.902777778	0.961328773	4.938671227
6.3	0.09446365	1.041666667	1.136130314	5.163869686
7.2	0.06435113	0.986805556	1.051156687	6.148843313
7.8	2.03952125	6.076388889	8.115910134	-0.315910134
Avg: 6.8	0.56422175	2.251909722	2.816131477	3.983868523
Rango de = 8.1 a 9.9 mm de pp		n = 8 eventos		
PP (mm)	**EC (mm)**	**EF (mm)**	**PP Neta (mm)**	**Intercepción (mm)**

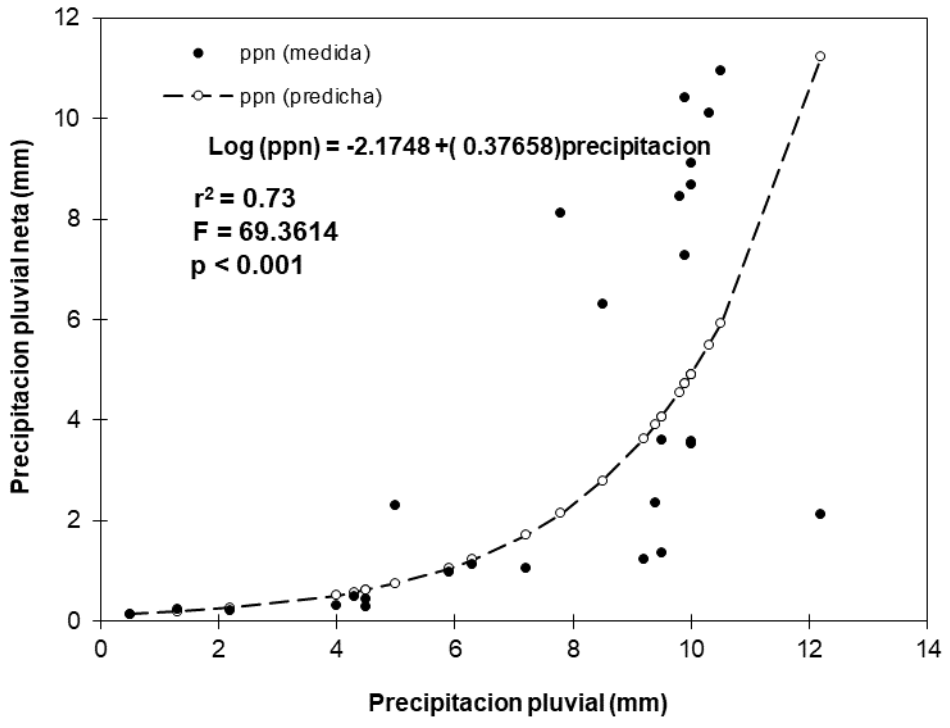
8.5	2.3309074	3.986111111	6.317018511	2.182981489
9.2	0.24608711	0.975694444	1.221781555	7.978218445
9.4	0.39927971	1.965277778	2.364557484	7.035442516
9.5	1.11169276	2.482638889	3.594331644	5.905668356
9.5	0.38579405	0.963541667	1.349335715	8.150664285
9.8	2.03216775	6.40625	8.43841775	1.36158225
9.9	2.6629433	7.743055556	10.40599886	-0.505998856
9.9	2.20745585	5.071180556	7.278636409	2.621363591
avg :9.4625	1.42204099	3.69921875	5.121259741	4.341240259
Rango de = 10 a 13 mm de pp		n = 7 eventos		
PP (mm)	**EC (mm)**	**EF (mm)**	**PP Neta (mm)**	**Intercepción (mm)**
10	0.3662344	3.150347222	3.516581621	6.483418379
10	2.98094663	5.694444444	8.675391076	1.324608924
10	2.42003489	6.701388889	9.121423776	0.878576224
10	1.03604145	2.534722222	3.57076367	6.42923633
10.3	2.68814721	7.430555556	10.11870277	0.181297233
10.5	2.90089325	8.055555556	10.9564488	-0.456448803
12.2	0.55130772	1.5625	2.113807718	10.08619228
avg: 10.428571	1.84908651	5.018501984	6.86758849	3.560982939

En la tabla siguiente se muestra el balance hidrológico para los 28 eventos lluviosos considerados en el análisis de este reporte.

Balance hidrológico considerando el promedio de 28 eventos registrados

Precipitación pluvial media (mm)	EC media (mm)	EF media (mm)	Intercepción media (mm)	PP Neta media (mm)
7.4888889	1.0167004	2.8615651	3.6106234	3.8782654

Figura IV.66).- Ecuación de regresión lineal usando el logaritmo de la precipitación pluvial.



Por otro lado, Granados (1994) estudia una comunidad vegetal de selva alta (que, aunque no es el tipo de vegetación presente en el área de estudio, brinda una idea del proceso que se presenta). En términos generales la selva estudiada está dominada por *Manilkara zapota, Pesudolmeida oxiphillaria, Brosimum alicastrum y Aspidosperma megalocarpon* en su estrato superior, y *Crysophila argentea, Gymanates lucida, Piper sp., y Rhacoma gaumeri* en su estrato medio. Durante el periodo seco se mantiene alrededor del 95 % de la vegetación con follaje, aunque existen elementos caducifolios como *Pseudobombax sp*, por ser muy conspicuo en el dosel. Cabe mencionar que cerca del 23 % de la vegetación estudiada se compone de diferentes especies de palmas, las cuales se encuentran al nivel del sotobosque, *como Sabal mautitiiformis y Gaussia maya*. En esta selva la precipitación promedio supera los 1,300 mm anuales. Para 1993, el número total de eventos lluviosos fue de 113, muy superior a los mencionados para el petén. El 63 % de la precipitación total se distribuye en la temporada lluviosa que va de junio a octubre, el restante se distribuye en la temporada seca. De la precipitación total que entra al sistema más del 60 % se incorpora como escorrentía foliar, siendo menor durante las lluvias de invierno o nortes y máxima en el mes de septiembre. En términos de la cuenca, la parte baja, la cual se caracteriza por una complejidad de la vegetación más baja que en la cabecera, es la que permite una escorrentía foliar más grande, al contrario de la zona de cabecera donde la intercepción por el dosel es mucho mayor.

Para el caso de la escorrentía cortical, Granados (1994) realiza un estudio sobre 6 especies, de las cuales tres son palmas y el resto árboles con diversas características. Para el caso de la palma *Sabal sp*, su capacidad de captación de agua puede alcanzar los 100 litros al mes, mientras que para *Crysophila sp* apenas llega a 1.5 litros por mes. En el caso de los árboles, *Manilkara sp*., puede captar hasta 50 litros por mes. La forma arquitectónica de las palmas son un aspecto importante en el proceso de canalización de agua, en el caso de los árboles, existen otras características, además de la cobertura, que determinan la eficiencia en la canalización de agua de escorrentía cortical. Así, *Manilkara zapota*, por tener la corteza de fuste rugosa canaliza menor cantidad de agua de escorrentía cortical, cuando la cantidad, duración e intensidad de la precipitación es menor. De igual forma, la arquitectura de la copa de *Sabal sp*., a nivel de subdosel, se relaciona con un valor máximo en la cantidad e intensidad de la precipitación pluvial, para un valor óptimo de canalización de escorrentía cortical.

Lo anterior significa que la precipitación neta efectiva que cruza el dosel de una selva de baja complejidad como la selva baja caducifolia de la zona de estudio, o del manglar, particularmente aquel que no es del tipo petén, sino tipo achaparrado o de cuenca, que llega al suelo, los cuales ocupan la mayor proporción del territorio costero, puede ascender más del 70 % de la precipitación total, el restante queda sujeta a los procesos de evaporación de superficie libre en las hojas.

Las características de la selva baja caducifolia que se desarrolla al interior del anillo de cenotes, un área que fue fuertemente impactada por la actividad henequenera, es descrita por González – Iturbe Ahumada, J., Olmsted,I., y Tun-Dzul F., 2002, (Tropical dry forest recovery alter long term Henequen -sisal, *Agave fourcoydes* Lem. – plantation in northern Yucatán, Mexico. Forest Ecology and Management 167 (2002) 67-82), quienes realizan estudios cuyo principal objetivo es la evaluación de la recuperación de la selva baja caducifolia en términos de riqueza de especies, biodiversidad y estructura después de haber sido sujetos de cultivos de henequen prolongados y el subsecuente abandono, comparando los resultados con otros estudios.

Los autores trabajaron es 5 localidades en la zona centro norte del anillo de cenotes, como son: Dzibilchaltún, Chicxulub Pueblo, Sierra Papacal, Ixil y Dzemul. Los sitios de muestreo se seleccionaron a través de imágenes aéreas, ya sea en fotografías y de satélite para los años de 1979, 1985 y 1995. Identificaron diferentes clases de cobertura vegetal del área y los cambios que ocurrieron desde la más antigua hasta la más reciente. Clasificaron sitios de muestreo como de "sucesión temprana" (SS1), cuando las plantaciones de henequén fueron reconocidas en las fotografías de 1985 y que no aparecían en 1995, lo que quiere decir que tienen una edad máxima de 10 años o mas jóvenes en el estado de sucesión temprana. Sitios que presentaban plantaciones de henequén en las fotografías de 1979 pero que fueron abandonadas para 1985 y que por lo tanto tendrían una edad máxima de 15 años para 1995 se clasificaron como "sucesión intermedia" (SS2). Los sitios que presentaron cobertura vegetal en las tres fechas se clasificaron como "sucesión avanzada" (SS3), con edades mayores a 20 años. Así, seleccionaron 5 sitios con tres categorías de edades.

Los autores mencionan que independientemente de la edad de abandono se continua la practica de agostadero, es decir dejar suelto al ganado para que se alimente libremente en el monte. En sus resultados muestran la presencia de un total de 236 especies pertenecientes a 48 familias, siendo 29 de ellas endémicas a Yucatán. Sólo encontraron 2 especies exóticas, *Rhynchelytrum repens* y *Panicum maximun*, ambas gramíneas. Seis familias contribuyen con casi el 50 % de las especies (Leguminosae con 40 especies, Euphorbiaceae con 22, Compositae con 16, Gramineae con 14 y Malvaceae con 12), mientras que 38 familias (casi el 80 % del total) se representan por 5 especies o menos considerando todos los sitios.

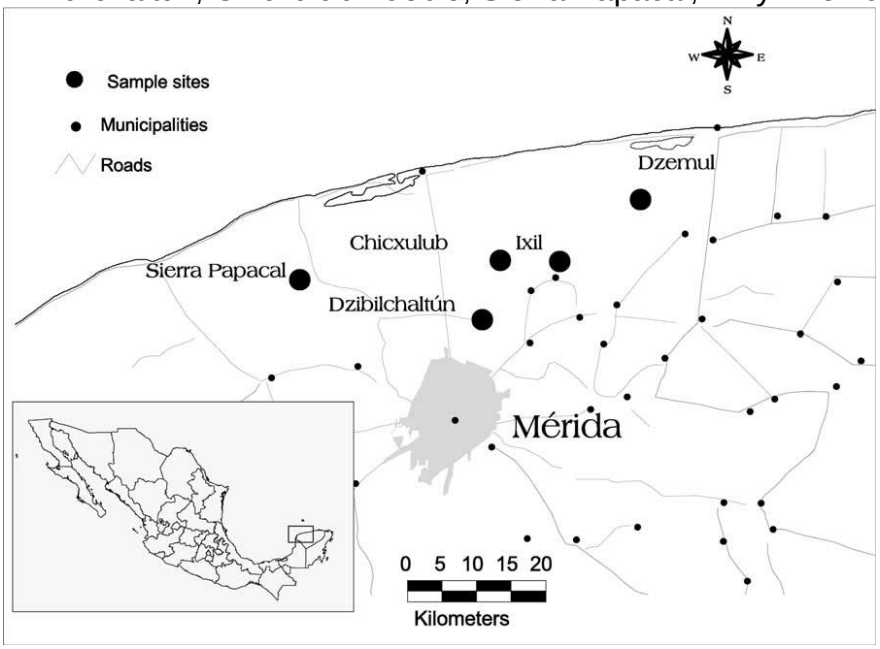
Las Leguminosas son las mas abundantes en todos los estados sucesionales: en SS2 alcanzan más del 50 % de especies, en SS1 alcanzan el 17 % y en SS3 el 28 %. En SS1, las familias Compositae, Gramineae y Euphorbiceae alcanzan la tercera parte de las especies, mientras que en SS2 y en SS3 la Euphorbiceae, Rubiaceae, Malpighiaceae y Cactaceae siguen a las leguminosas en importancia.

Algunos árboles son característicos del estado sucesional tardío (SS3), como *Apoplanesia paniculada, Cordia gerascanthus y Plumeria rubra*, así como los cactos *Pterocereus gaumeri y Cephalocereus gaumeri.* Por otro lado, *Leucaena leucocephala* es indicativa del estado sucesional intermedio y temprano (SS2 y SS1), mientras que *Acacia pennatula* es dominante, así como *Lonchocarpus xuul*, en SS2 y SS3. Sin embargo, *Mimosa bahamensis* es común en SS1 y SS2.

Un total de 44 especies se presentan solamente en sitios sucesionales SS3, mientras que 17 especies sólo aparecen en el estado sucesional intermedio SS2. Los autores mencionan también que, de las 236 especies encontradas en todos los sitios, sólo 103 fueron leñosas (árboles y arbustos), 94 fueron herbáceas, 33 herbáceas y lianas y 6 fueron cactáceas.

En general, los sitios con sucesión avanzada tienen el mayor número de especies leñosas, seguidas por los estados sucesionales intermedios y por último los estados tempranos. Sin embargo, en estos últimos (SS1) se encontraron un número total mayor, considerando leñosas y herbáceas juntas.

Figura IV.67).- Localidades en la zona centro norte del anillo de cenotes para l muestreo de vegetación: Dzibilchaltún, Chicxulub Pueblo, Sierra Papacal, Ixil y Dzemul



Fuente: González – Iturbe Ahumada, J., Olmsted, I., y Tun-Dzul F., 2002

En cuanto a los datos estructurales, muestran que en el estado sucesional intermedio (SS2) los tallos o troncos con un diámetro a la altura del pecho menor a 5 cm contribuyen con el 17.6 % al 48.5% del área basal, mientras que en el estado sucesional avanzado (SS3) esta clase de diámetro a la altura del pecho contribuye con sólo 9.36 – 27.6 % del área basal. Los individuos con mayor área basal pertenecen a las especies de *Phithecellobium dulce, Lysiloma latisliquum, Piscidia piscipula, Bursera simaruba* y *Ficus cotinifolia*.

Tabla IV.26).- Valores de área basal total, densidad de individuos y altura promedio de los estados sucesionales intermedios y avanzados (SS2 y SS3).

Sitio	Área Basal m2/ha		Densidad Ind/ha		Densidad Tallos/ha		Altura Promedio m	
	SS3	SS2	SS3	SS2	SS3	SS2	SS3	SS2
Chicxulub	17.3	9.1	3880	2860	6740	5620	5.62	5.39
Dzemul	20.2	6.2	2660	1720	5820	7060	4.20	4.02
Dzibilchaltun	20.0	19.7	3520	3080	7200	7540	5.65	4.64
Ixil	19.0	7.1	2580	1860	5780	4500	5.34	4.56
Sierra Papacal	17.8	11.6	3780	2800	7180	6140	5.49	4.82

Los promedios generales son:

Área basal promedio	SS3 = 18.8 m2/ha;	SS2 = 10.7 m2/ha
Densidad de individuos promedio	SS3 = 3268 ind/ha;	SS2 = 2464 ind/ha
Altura promedio	SS3 = 5.26 m;	SS2 = 4.69 m

Por otro lado, Gallardo-Cruz et al., (Boletín de la Sociedad Botánica de México, 76: 19-35, 2005), presentan una tabla con diversos valores estructurales, particularmente el área basal de diversos trabajos en diferentes partes del país donde se encuentra la vegetación de selva baja caducifolia, y resalta el hecho de los valores tan altos encontrados, que en algunos cosos coinciden con los valores que arrojan los estudios de González- Iturbe Ahumada et al mencionados en esta revisión.

Las alturas promedio en los estados sucesionales avanzados (SS3) alcanzan los 5.2 m y son significativamente diferentes de aquellos de los estados sucesionales intermedios (SS2). *Buresera simaruba, Thouinia paucidentata, Piscidia piscipula y Lysiloma latisiliquum* ocurren como emergentes, es decir mayores a 8 m de altura en sitios sucesionales avanzados (SS3).

En los estados sucesionales tempranos (SS1) la altura promedio de los árboles y arbustos es en su mayoría no mayor a 2 m dado que abundan las especies herbáceas, la cobertura varia de 2.4 a 3.2 m2/4m2. El número promedio de individuos fueron mayores en los estados SS3 que en los SS2.

En la siguiente tabla se presenta las especies por los estados avanzados e intermedios (SS3 y SS2) que incorporan el 45 a 50 % de los valores de importancia para esos sitios. Para el estado sucesional temprano (SS1) sólo las especies leñosas más importantes se indican. Se observa que considerando todos los sitios, en los estados SS3 hay 16 especies, en SS2 alcanza 12 especies y sólo 7 especies en SS1 con alto valor de importancia.

Tabla IV.27).- Ees pecies por diferentes estados sucesionales.

Especies	Estado sucesional tardío SS3	Estado sucesional intermedio (SS2)	Estado sucesional temprano SS1
Agave angustifolia	4.9		
Thouina paucidentata	7.8		
Pithecellobium dulce	12.8		
Randia obchordata	5.8		
Diospyrus anisandra	10.7		
Apoplanesia paniculata	8.9		
Stenocereus laevigatus	11.5		
Bursera simaruba	14.5	19.6	
Croton reflexifolius	16.4	7.8	
Lysiloma latisliqumm	10.6	11.8	
Nopalea inaperta	5.9		
Gymnopodium floribundum	12.2	16.9	
Bunchosia swartziana	6.2		
Havardia albicans		20.6	
Pisonea aculeata		11.6	
Acacia gaumeri	16.4	33.6	3.6
Mimosa bahamensis	8.9	12.9	5.7
Lonchocarpus xuul	8.1	9.1	5.4
Caesalpinia gaumeri		12.9	7.3
Leucaena leucocephala		13.3	18.5
Senna racemosa		12.1	
Neomillspaughia emarginata			6.1
Prosopis juliflora			5.3

En este estudio es la primera vez que el estrato herbáceo es identificado en detalle en los estados sucesionales tempranos (SS1) en Yucatán. El hecho de que se observen 94

especies de herbáceas (sin contar lianas y epifitas) resulta interesante. En otros estudios después de huracanes e incendios en una selva mediana subperennifolia de Quintan Roo, Olmsted y colaboradores (1991), encontró sólo 26 especies de herbáceas terrestres. Esto sugiere dos explicaciones 1).- la baja estatura de la vegetación en Yucatán por si misma tiene más especies, y/o, 2).- la constante perturbación ha incrementado el número de especies herbáceas en los estados sucesionales tempranos (SS1). La mayoría de las herbáceas son mas demandantes de luz y por ende cuando crecen árboles que crean sombra pueden con el tiempo desplazarlas.

La familia de las leguminosas son las mejores representadas en todos los estados sucesionales, con mayor abundancia en los estados sucesionales intermedios (SS2), con un 50 % de todas las especies. Esto sigue el mismo patrón encontrado en otros tipos de vegetación similares en México (Miranda, 1958; Lott et al, 1987; Rico Gray et al., 1988; Marín, 1997; Trejo, 1988) y en otras partes del Mundo (Gentry, 1995). Las Euphorbiaceae, Cactaceae, Compositae y Ribiaceae le siguen en importancia. Varias son las razones por las que las leguminosas dominen en este tipo de vegetación: la persistencia a las perturbaciones como el fuego; semillas con una testa muy dura, resistente al fuego y a las condiciones áridas, así como su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico.

La recuperación de la vegetación en los estados sucesionales temprano e intermedio (SS1 y SS2) después de abandonar el cultivo del henequén difiere en cuanto a composición de los estados tardíos o avanzados de la sucesión, riqueza de especies, diversidad y también en cuanto a parámetros estructurales. La composición de especies sin embargo es muy heterogenea, esto es, mientras que algunas especies son muy dominantes en un sitio, en otro, aún en un estado sucesional similar pueden sólo estar presentes, pero no dominantes. La fragmentación del hábitat puede ser responsable de la baja similaridad entre los sitios maduros dentro de la zona henequenera.

Los autores mencionan que el diámetro a la altura del pecho utilizada por otros autores (mayores a 1 cm en comparación con los utilizados por ellos mayores de 3 cm), la densidad de individuos es similar al reportado por otros autores, sin embargo, Trejo (1988), menciona que los individuos menores de 3 cm de diámetro a la altura del pecho pueden constituir una gran proporción del número total de individuos y especies, en algunos lugares alcanza más del 50 %.

En los casos en que se presentan ciertas especies de lento crecimiento como las especies de cactáceas columnares *Pterocereus y Stenocereus* indican áreas que no han sido perturbadas por al menos más de 30 o 40 años, así como por los valores de área basal. Estos estados sucesionales (SS3) presentan una riqueza de especies similares a los reportados en otros estudios. Sin embargo, la riqueza de especies en sitios SS2 pueden diferenciarse si la historia del sitio está más ligada a una utilización por el método de roza tumba y quema para la milpa o por el uso permanente del cultivo del henequén.

El manejo histórico de los cultivos de henequén favorece a las especies que tiene una gran capacidad de rebrote. Después del abandono, la remoción de las plantas por el uso del fuego para establecer praderas para ranchos ganaderos extensivos es una práctica común. la invasión de especies herbáceas por semillas (como Gramineae, Euphorbiaceae, Malvaceae) tiene lugar. Los tocones, que fueron podados durante la fase activa del cultivo del henequén rebrotan sin ser cortados. Especies de rápido crecimiento, en su mayoría leguminosas se establecen: *Lysiloma latisiliqumm, Senna racemosa y Leucanea leucocephala, Mimosa bahamensis.*

Cerca del 70 % de las especies en la fase sucesional intermedia rebrotan. Especies como *Bursera simaruba y Gymnopodium floribundium* dan sombra a muchas herbáceas compitiendo por luz. Asimismo, *Bursera simaruba* se dispersa a través de las aves, por lo que es muy común en todo el trópico americano. Por su parte, *Gymnopodium floribundium*, un pequeño árbol, es muy agresivo dado su alta capacidad de rebrote desde las raíces y domina la vegetación rápidamente. Al tiempo que otras especies de árboles mas grandes crecen, compiten por la luz y las poblaciones de *Gymnopodium* empiezan a desaparecer y dejan de ser dominantes en los estados SS3.

Finalmente, la larga historia de uso del ecosistema, junto con las condiciones ambientales ha influenciado la actual vegetación del área. El cultivo de henequén ha tenido un efecto enorme sobre la biodiversidad y la composición en las etapas sucesionales. Sólo aquellos estados sucesionales avanzados (SS3, de más de 40 años) son los más representativos de la selva baja caducifolia, aunque reducido en riqueza de especies. La práctica de la milpa con la roza tumba y quema facilita el restablecimiento de un gran número de especies comparado con un cultivo perenne como el henequén, que genera una baja diversidad, dado también a que el banco de semillas se va agotando año con año por la quema y la limpieza del terreno.

Con la finalidad de efectuar la caracterización y el diagnostico del estado que presenta la vegetación natural y la composición florística del área de Ucu, Patiño, Fernando (Estudio Técnico Justificatorio para cambio de uso de Suelo, IVEY, Yucatán, 2010) realizó recorridos en el área del predio en estudio, determinando las especies localizadas. De igual forma se desarrolló un vuelo para reconocer las áreas más conservadas dentro del predio y centralizar los esfuerzos de muestreo en dichas zonas. Durante los muestreos en el área del proyecto, se localizaron las siguientes especies:

Tabla IV.28).- Lista de especies herbáceas encontradas en el área de muestreo. Clasificación de acuerdo con Durán, *et al* (2000 [2])

Nombre comun	Especie	Familia
Chak anal	*Aphelandra scabra*	Acanthaceae
Kabal xa'an	*Elytraria imbricata*	Acanthaceae
Chak mul	*Ruellia nudiflora*	Acanthaceae
Ak'ab xiw	*Henryia scorpiodes*	Acanthaceae
Henequén	*Agave fourcroydes*	Agavaceae
X-tees	*Amaranthus hybridus L.*	Amaranthaceae
X-tees	*Amaranthus spinosus* L.	Amaranthaceae
pol kutz	*Asclepias curassavica*	Asclepiadaceae
Xtuch kajoy	*Gonolobus barbatus*	Asclepiadaceae
Sal xiu	*Cynanchum schlechtendalii*	Asclepiadaceae
Anik ak'	*Arrabidaea floribunda*	Bignoniaceae
Bilinkook ak'	*Macfadyena ungus-cati*	Bignoniaceae
Kot's nema'ax	*Heliotropium angiospermum*	Boraginaceae
Piñuela	*Bromelia plumieri*	Bromeliaceae
Xnumtsuytsuy	*Acanthocereus tetragonus*	Cactaceae

[2] Durán, R., G. Campos, J.C. Trejo, P. Simá, F. May y M. Juan. 2000. Listado Florístico de la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Yucatán, México. 259 p.

X-pakàm	*Nopalea gaumeri*	Cactaceae
X'pakan	*Nopalea inaperta*	Cactaceae
Cabeza de viejo	*Pilosocereus gaumeri*	Cactaceae
K'anmul	*Bidens alba* (L.) DC. var. *alba*	Compositae
Sooh	*Melantera aspera*	Compositae
Boton de plata	*Melanthera nivea*	Compositae
Jaway, Altaniza	*Parthenium hysterophorus* L.	Compositae
Baken box	*Sanvitalia procumbens* Lam.	Compositae
Ya'ax'ak	*Jacquemontia pentatha*	Convolvulaceae
Pelos de mano	*Merremia aegyptia*	Convolvulaceae
X-kum pex	*Cionosicyos excisus*	Cucurbitaceae
Barbasco	*Dioscorea poligonoides*	Dioscoreaceae
Siit, bambu	*Lasiasis divaricata*	Graminae
Siit	*Lasiacis ruscifolia*	Graminae
Zacate	*Andropogon glomeratus*	Graminae
Zacate	*Cenchrus ciliaris* L.	Graminae
Aj mul	*Cenchrus echinatus* L.	Graminae
J mul	*Cenchrus incertus* M.A. Curtis	Graminae
K'aan su'uk	*Cynodon dactylon* L. Pers	Graminae
Sak su'uk	*Eragrostis ciliaris* (L.) R. Br.	Graminae
Zopilote ch'oom	*Cipura paludosa*	Iridacea
Chi'chi'bej	*Sida acuta* Burm F.	Malvaceae
Chi'chi'bej	*Sida rhombifolia* L.	Malvaceae
Kakaltuun	*Cissampelos pareira*	Menispermaceae
Pants'il	*Boerhavia coccinea*	Nyctaginaceae
Orquidea terrestre	*Oceoclades maculata*	Orchidiaceae
Orquidea de fuego	*Stenorrhynchos lanceolatum*	Orchidiaceae
Tomatillo	*Solanum hyrtum*	Solanaceae
Put balam	*Solanum tridynamum*	Solanaceae
Ich k'iin	*Waltheria americana*	Sterculiaceae
Si'ik, limocillo	*Jacquinia flamea*	Teophrastaceae
Orégano k'aax	*Lantana camara*	Verbenaceae

Este grupo de especies herbáceas obtuvo una representatividad del 38 % del total de individuos registrados, de hecho, es de los más numerosos y ampliamente distribuidos en el polígono de estudio.

Figura IV.68).- Dos panoramas de las zonas que se localizaron con abundantes herbáceas.

El estrato herbáceo descrito estuvo representado por individuos con alturas de 5 cm hasta 1 metro. Se encuentran más en las zonas en las que ha ocurrido un desmonte reciente (milpas, henequenales abandonados, zonas ganaderas) y en los bordes de los caminos y brechas existentes; es decir, en zonas donde la perturbación antropogénica es mayor. El estrato herbáceo esta conformado por especies de rápido crecimiento y oportunistas que aparecen principalmente en los bordes de los fragmentos de vegetación.

Predominan las compuestas como el tajonal (*Viguiera dentata* var. *helianthoides*) y la esterculeácea: *Waltheria americana* L, y las gramíneas (*Cenchrus echinatus, Cynodon dactylon, Eragrostis ciliaris* y un zacate introducido: *Rhynchelytrum repens*). También entre las herbáceas predominan las del género *Ipomoea*.

Tabla IV.29).- Lista de especies con forma de vida de enredaderas y epífitas encontradas en el área de muestreo. Clasificación de acuerdo con Durán, *et al* 2000).

Nombre común	Especie	Familia
Anik ak’	*Arrabidea floribunda* (Kunth) Loes	Bignoniaceae
X-kal p'uul	*Ipomoea heredifolia* L.	Convolvulaceae
Ya'ax ak'	*Jacquemontia pentatha* (Jacq.) G. Don	Convolvulaceae
Tso’ots’ ak	*Merremia aegyptia* (L.) Urb.	Convolvulaceae
Cundeamor	*Momordica charantia* L.	Cucurbitaceae
Calabacilla, X-kum pex	*Cionosicyos excisus*	Cucurbitaceae
Makal k’ uch ak’	*Dioscorea polygonoides*	Dioscoreaceae
K'antin	*Centrosema virginianum* (L.) Benth	Leguminosae
Bu'ul ch'o	*Macroptilium atropurpureum*	Leguminosae
Bu’ul	*Phaseolus sp.*	Leguminosae
Kakaltuun	*Cissampelos pareira* L.	Menispermaceae
Soots' ak'	*Passiflora suberosa* L.	Passifloraceae
Hoyoc	*Morinda yucatanensis* Green m.	Rubiaceae
Tillandsia	*Thillandsia sp.*	Bromeliaceae
Orquidea	*Cohniella cebolleta*	Orchidiaceae

En el caso de las enredaderas, éstas fueron mucho más frecuentes en áreas donde se han presentado incendios (derivado de las actividades de desmontes de milpas, milpas en abandono). Se encontraron creciendo sobre los árboles y arbustos secos, así como en áreas donde se han realizado desmontes. Se observó una fuerte tendencia de encontrarse en los límites de los accesos a las zonas con vegetación más alta. Fueron dominantes las especies del género de *Ipomoea* y *Dioscorea*.

En cuanto a la forma de vida de enredaderas y epífitas, su representación en el polígono fue del 13% (11% para las enredaderas y 2% para las epífitas) con respecto a las otras formas de vida.

Tabla IV.30).- Lista de especies arbustivas encontradas en el área de muestreo. Clasificación de acuerdo con Durán, *et al* 2000.

Nombre comun	Especie	Familia
Kat kut	*Parmentiera millspaughiana*	Bignoniaceae
Baka che’	*Bourreria pulchra*	Boraginaceae
Baka che’	*Bourreria mollis*	Boraginaceae
Siliil	*Diospyros anisandra*	Ebenaceae

Chay, tsiminchay	*Cnidoscolus aconitifolius*	Euphorbiaceae
Xikin burro	*Croton chichenensis*	Euphorbiaceae
X-ik aban	*Croton humillis*	Euphorbiaceae
Kaatzim	*Acacia riparia*	Leguminosae
Chulul	*Apoplanesia paniculada*	Leguminosae
Maay wakax	*Bauhinia divaricata*	Leguminosae
Sak katsim	*Mimosa bahamensis*	Leguminosae
Kibche’	*Bunchosia swartziana*	Malpighiaceae
Be’eb	*Pisonia aculeata*	Nyctaginaceae
Ts´I´ts´ilché	*Gymnopodium floribundum*	Polygonaceae
Sak its´a	*Neomillspaughia emarginata*	Polygonaceae
Culantrillo, Sak sajum	*Borreria verticillata*	Rubiaceae
Kib che´	*Guettarda elliptica*	Rubiaceae
Box k’u’ ch’eel	*Machaonia lindeniana*	Rubiaceae
Hoyoc	*Morinda yucatanensis*	Rubiaceae
Crux-quix	*Randia aculeata*	Rubiaceae
Ah akam k'ax	*Randia longiloba*	Rubiaceae
Crux k’iix	*Randia obcordata*	Rubiaceae
Sutup	*Helicteris baruensis*	Sterculiaceae

El grupo de especies arbustivas representa el 19% de la vegetación en la zona de estudio. En este estrato se encontraron algunas especies arbóreas en estado de crecimiento avanzado, incorporándose al dosel arbóreo. En otras áreas del predio, se presentan conformando la forma de vida dominante seguida por las herbáceas.

Tabla IV.31).- Lista de especies arbóreas encontradas en el área de muestreo. Clasificación de acuerdo con Durán, *et al*. (Op. Cit.)

Nombre comun	**Especie**	**Familia**
Abal ak'	*Spondias purpurea*	Anacardiaceae
Uts' um pek'	*Tabernaeamontana alba* Mill.	Apocynaceae
Sak chakaj	*Dendropanax arboreus*	Araliaceae
Pochote	*Ceiba aesculifolia*	Bombacaceae
Ceiba	*Ceiba schoti*	Bombacaceae
Bojom	*Cordia gerascanthus L.*	Boraginaceae
Chakaj, Chaká	*Bursera simaruba*	Burseraceae
Kolokma'ax	*Crataeva tapia* L.	Capparidaceae
Bonete	*Jacaratia mexicana*	Caricaceae
Pomolche	*Jatropha gaumeri*	Euphorbiaceae
Jabal k’aax	*Samyda yucatanensis* Standl.	Flacourtiaceae
Subin, Xcanan	*Acacia collinsii*	Leguminosae
Box catzim, catzim	*Acacia gaumeri*	Leguminosae
Chimay	*Acacia penatula*	Leguminosae
Xiahtzimin	*Albizia tomentosa* (Micheli) Standl.	Leguminosae
Kitimche’	*Caesalpinia gaumeri*	Leguminosae
Chakte'	*Caesalpinia mollis*	Leguminosae
Yaa´x ek	*Pithecellobium leucospermum*	Leguminosae
Pich	*Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) rises.	Leguminosae

Chakmolche	*Erythrina standleyana*	Leguminosae
Chukum	*Havardia albicans*	Leguminosae
Waxim	*Leucaena leucocephala*	Leguminosae
Kanasín	*Lonchocarpus rugosus*	Leguminosae
Tsalam	*Lysiloma latisiliquum*	Leguminosae
Ts' inché	*Pithecellobium dulce*	Leguminosae
Ja´abin	*Pscidia piscipula*	Leguminosae
Tu-che	*Senna atomaria*	Leguminosae
Kan-lool	*Senna racemosa*	Leguminosae
Boxsalche'	*Senna villosa*	Leguminosae
Alamo	*Ficus cotinifolia* Kunth	Moraceae
Lu'um che	*Karwinskia humboldtiana*	Rhamnaceae
Pimienta che	*Colubrina heteroneura*	Rhamnaceae
Huaya silvestre	*Talisia olivaeformis*	Sapindaceae
K'aan chunup	*Thouinia paucidentata*	Sapindaceae
Besinik	*Alvaradoa amorphoides*	Simaroubaceae
Ya'axnik	*Vitex gaumeri*	Verbenaceae

Este grupo de especies tuvo una representatividad del 30% en el sitio de estudio, lo que significa una elevada representatividad. Esto es debido a que la zona este y sur se encuentra con una recuperación más avanzada, y donde se pudo observar a los individuos arbóreos con los DAP's más elevados. La vegetación arbórea y arbustiva en el resto del predio está conformada con especies como *ts´í´ts´ilché*, *sak katsim, chukum, jabín*, y *tsalam*.

Figura IV.69).- Vista general de las zonas que presentaron vegetación arbórea.

Los fragmentos que presentaron mayor número de especies arbóreas estuvieron localizados en las zonas cercanas a los bancos de material abandonados y se presentaban como fragmentos aislados dentro del predio, así como en la zona norte. Sin embargo, no fueron muy abundantes y los fragmentos con este tipo de vegetación fueron escasos. Las alturas máximas registradas fueron de 6 a 8 metros, pero solamente individuos aislados.

La vegetación presente en el área no se puede estratificar, debido a que es una vegetación secundaria, en la que los estratos arbustivos y arbóreos se encuentran entremezclados como un solo estrato, lo cual hace difícil el acceso al predio en las zonas

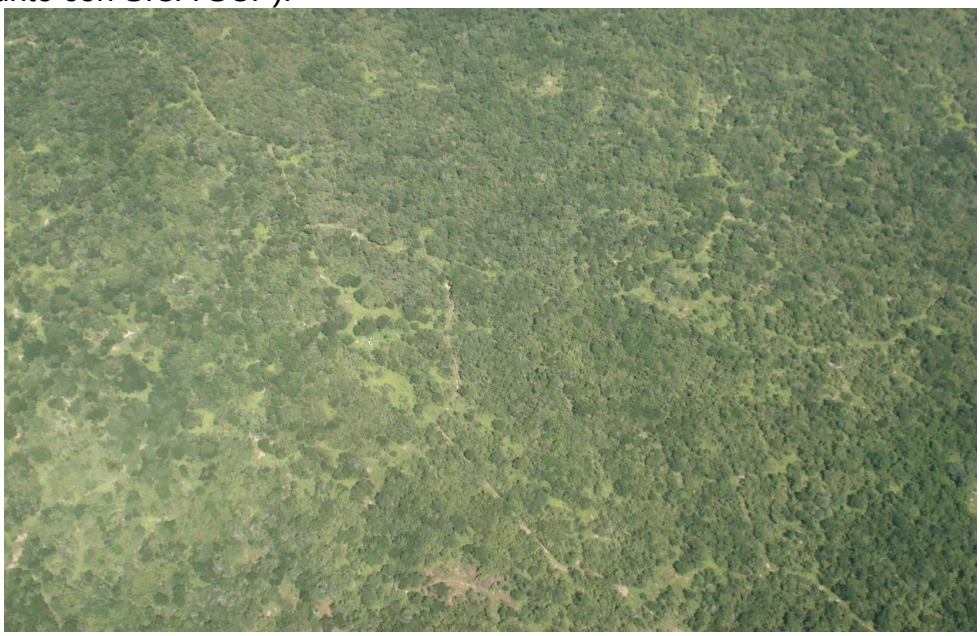
donde aun cuenta con esta vegetación. La vegetación herbácea es la predominante entremezclada con las plántulas de las especies arbóreas y arbustivas. Existen manchones aislados de vegetación de 4 a 5 metros de altura. Existen individuos arbóreos de hasta 7 metros de altura aproximadamente, con un DAP de hasta 20 cm., como el caso del *chacah* (*Bursera simaruba*), el chukum (*Havardia albicans*) y el tzalam (*Lysiloma latisiliquum*), sin embargo, estos individuos se encuentran aislados.

La vegetación secundaria presente posee entre 10 y 15 años de recuperación, no obstante, el sitio se encuentra altamente perturbado. La altura de la vegetación posee en promedio 4 metros; existen algunas zonas en las se distribuyen árboles aislados de alturas de hasta 7 metros, principalmente jabin y chacah, especies de rápido crecimiento.

El terreno se encuentra fragmentado por numerosas brechas, caminos y una línea de transmisión eléctrica. Consecuentemente, el sitio presenta una vegetación pobremente desarrollada. De hecho, en algunas porciones predomina un estrato herbáceo uniforme dominado por tajonal.

Lo anterior refuerza lo dicho al principio de este análisis técnico, respecto a que la vegetación se encuentra impactada y que los procesos de regeneración se ven limitados por la constante entrada de la gente al sitio (en busca de leña o para otros fines). Además de que la zona fue anteriormente henequenera, por lo que actualmente se encuentra en un estado de regeneración, en la cual dominan especies indicadoras de esta etapa como son *ts´í´ts´ilché* (*Gymnopodium floribundium*), *sak katsim* (*Mimosa bahamensis*), Chukum (*H. albicans*) y K'aan chunup (*Thouinia paucidentata*), lo cual disminuye la diversidad del sitio.

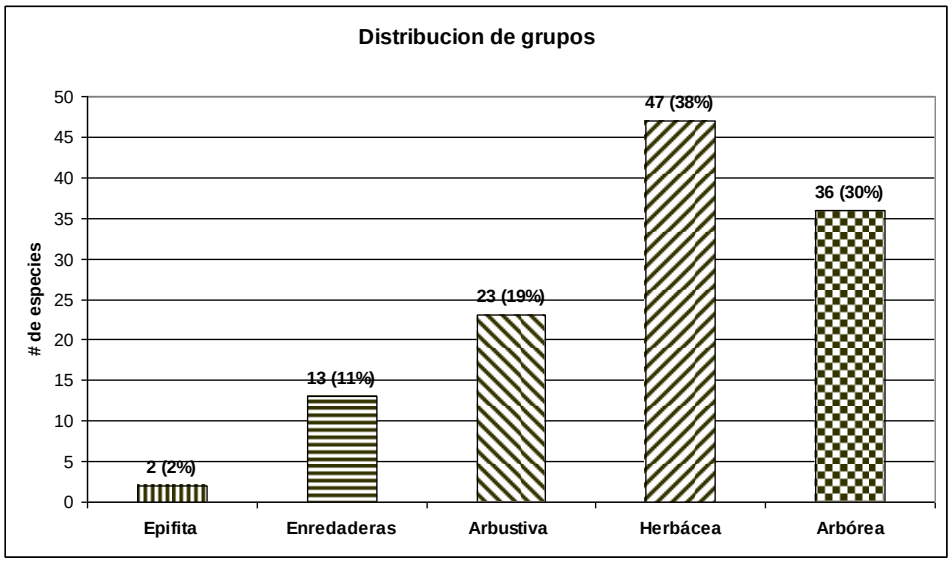
Figura IV.70).- Vista general de las zonas que presentaron vegetación arbórea y arbustiva. Note los espacios abiertos presentes (foto aérea tomada el 14 de agosto de 2008, en vuelo conjunto con SICA SCP).



En toda la extensión del terreno, es común observar la presencia de especies espinosas y al no existir una estratificación vegetal marcada en el área, destacan los elementos arbustivos. Aunque dicho estrato se conforma también por individuos arbóreos juveniles que apenas van creciendo.

En la figura siguiente se puede apreciar gráficamente una mayor abundancia de especies herbáceas, seguidas de las especies arbóreas y las arbustivas.

Figura IV.71).- Distribución de las especies vegetales registradas por la forma biológica que presentan.



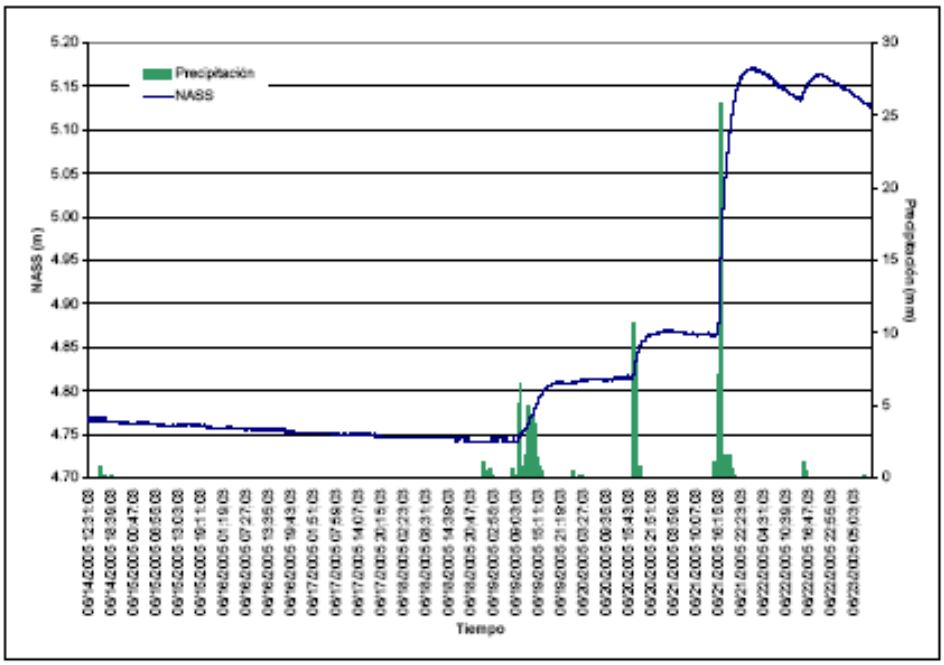
Las zonas en las que la vegetación alcanza una mayor altura, y en las que el estrato arbóreo es el predominante, se presentan alturas que van de los 6 a los 8 metros en promedio. Por otro lado, en la mayor parte del terreno, donde las herbáceas son la constante, la altura promedio de este estrato es un poco mayor que medio metro.

Son estas características de la selva baja caducifolia entonces que permiten inferir que la intercepción de la precipitación por el dosel de la selva es mínima y que la escorrentía foliar y cortical puede alcanzar porcentajes muy altos de la precipitación total.

Sin embargo, para un evento de precipitación, exclusivamente, se observa que la recarga, particularmente en la zona del acuífero libre, ocurre en un breve período de tiempo, iniciando casi inmediatamente al iniciar la lluvia, logrando incrementos de hasta 0.40 m (ver gráficas del lisímetro en la figura siguiente).

Esto es típico de los acuíferos cársticos de tipo libre e indica que la infiltración es rápida (de hecho, el nivel estático en la zona donde se aplicó es de alrededor de 5 m, muy próximo a la superficie del terreno) y que, en consecuencia, la evaporación del agua superficial retenida sobre el terreno sea poca, implicando que la recarga al acuífero sea alto, favorecido por las grietas del terreno cárstico. Esto genera condiciones de estrés hídrico en la vegetación ya que, si las condiciones de capacidad de campo del suelo es poca, la disponibilidad de agua se reduce considerablemente, particularmente en temporada de secas. De aquí la condición de selva baja caducifolia.

Figura IV.72).- Monitoreo del nivel del agua en el lisímetro FIUADY y precipitación, del 14 al 23 de junio de 2005.



Un aspecto particular de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes es la presencia de la selva baja espinosa caducifolia, que se caracteriza por la presencia también de cactáceas candelabriformes, esta selva tiene una altura de 8 a 15 m. pero a veces no alcanza más de 6 m., y muchos de los elementos que la integran son francamente deciduos. Forma una franja de unos 10 a 15 Km. de anchura desde el borde sur de la ciénaga hacia el interior; esta franja se extiende paralelamente a la costa, por lo menos desde el sur de Telchac Puerto a Sisal, incluyendo la región de Progreso. Su tránsito a la selva baja caducifolia de leguminosas espinosas que la substituye es relativamente brusco.

Los terrenos en que se desarrolla son muy llanos, constituidos por grandes lajas calizas que afloran a la superficie y en cuyas partes hundidas y grietas se deposita muy escaso y somero suelo de color obscuro. La precipitación anual en esta zona es la más baja del sureste, siendo menor de 700 mm.; en Progreso solamente 472mm. La proporción de lluvia en la época seca es relativamente alta, pero representa el 27 % de la precipitación total anual. Esto unido a la superficialidad de los mantos freáticos, contribuye a mantener cierta humedad en el suelo, lo que permite en los lugares claros el desarrollo de pequeñas praderas de gramíneas, donde son frecuentes *Andropogon glomeratus*, *Eragrostis domingensis*, *Paspalum vaginatum*, etc.

Tabla IV.32).- En la selva baja de esta clase se encuentran con frecuencia los siguientes árboles y arbustos:

Acacia gaumeri (boxkatsin)
Bumelia retusa
Bursera schlechtendalii
Ceiba aesculifolia (piim)
Diospyros cuneata
Euphorbia schlechtendalii
Beaucarnea pliabilis
Bursera simaruba (chakah)
Caesalpinia vesicaria
Chlorophora tinctoria (mora)
Erythrina standleyana
Guaiacum sanctum

Gymnopodium ovatifolium	*Hampea trilobata*
Jatropha gaumeri	*Leucaena glauca*
Malpighia sp. (oxte')	*Metopium brownei* (chechen negro)
Parmentiera aculeata	*Piscidia piscipula* (ha'bin)
Podopterus mexicanus	*Sebastiania adenophora*
Thevetia ovata	*Zanthoxylum fagara*

No obstante, el carácter más peculiar de la selva baja caducifolia es la presencia de abundantes xerófitos, como Cactáceas candelabriformes intercaladas con regularidad, siendo las más frecuentes, *Cephalocereus gaumeri*, *Lemaireocereus griseus* y *Pterocereus gaumeri*. Incluy también especies más de piso como la *Mamillaria gaumer*i. Al lado de éstas se encuentran también otras grandes cactáceas como *Nopalea gaumeri*, *Acanthocereus pentagonus*, etc. Otros xerófitos especializados incluyen especies de *Pedilanthus*, trepadoras de hojas carnosas (*Cissus trifoliata*).

Hacia el norte de este tipo de vegetación se desarrolla la sabana, la cual es una agrupación constituida por extensas praderas de gramíneas (graminal), a veces con abundantes Ciperáceas, y ordinariamente con árboles bajos dispersos, pero en ocasiones sin árboles. Los árboles más frecuentes y característicos son *Byrsonina crassifolia* (nance), *Curatella americana* (yaha', saha', o tachicón) y *Crescencia cujete* (guiro o jícaro).

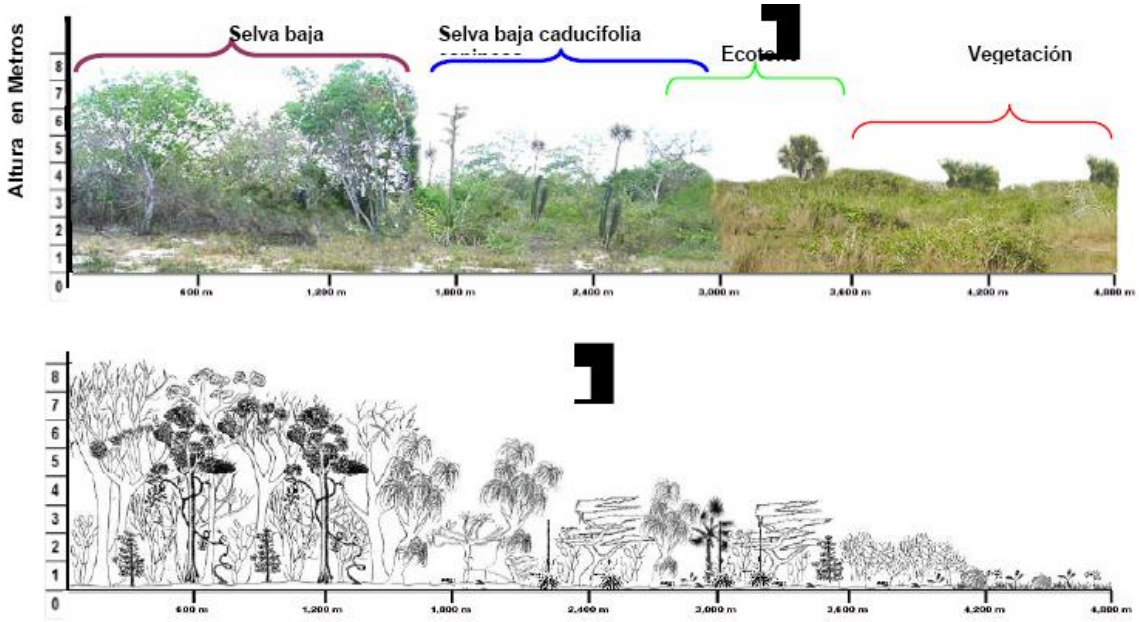
Los suelos son con frecuencia llanos o con escaso declive y por lo común profundos, arcillosos o margosos o arcillo arenosos, con drenaje deficiente. Debido a estas características, en los periodos de lluvias fuertes se vuelven cenagosos en la superficie, aunque no llegan a inundarse; en las temporadas no lluviosas en cambio se vuelven muy secos, de tal manera que las gramíneas que los cubren se secan y son a menudo consumidas por asoladores incendios. Se observan también asociaciones de carrizo (*Phragmites communis*), sibal (*Cladium jamaicense*) y tule (*Typha angustifolia*), las cuales cubren grandes extensiones de terreno pantanoso de aguas salobres.

Mas al norte se presenta el manglar, que constituye una agrupación de helófitos arbóreos que al mismo tiempo son halofitos; es decir, se hallan adaptados a la vida en aguas de salinidad elevada. Cubre el manglar extensiones grandes de lugares fangosos a lo largo de las costas bajas de la costa, especialmente en orillas de los esteros o lagunas costeras, ciénagas.

El manglar es al mismo tiempo una agrupación homogénea y compleja. Típicamente se compone de 3 o 4 asociaciones, que pueden entremezclarse a veces y que, por lo común, se disponen en zonación bien definida, aunque en muchas ocasiones puede faltar alguna de las zonas. Las asociaciones que forman el manglar, desde las de suelo más sumergido o salino a las de suelo menos sumergido o de menor salinidad, son las siguientes: de *Rhizophora mangle* (mangle rojo o tapché) de *Laguncularia racemosa* (mangle blanco o sackokom), de *Avicenia germinans* (mangle negro) y de *Conocarpus erecta* (botoncillo). Las dos primeras se entremezclan con frecuencia, aunque el dominio corresponde casi siempre a *Rhizophora*. La asociación de *Avicenia*, se desarrolla sobre el cieno menos inundable, en lugares donde la salinidad es menor. La asociación de *Conocarpus* subre los suelos más emergidos del lado de tierra, o bien los inundados donde las aguas del mar muy diluidas por filtración de aguas dulces.

La anchura de las franjas o zonas constituidas por las anteriores asociaciones depende de la inclinación de la costa; a menor inclinación de esta mayor anchura de las zonas correspondientes y viceversa. En el norte de Yucatán, en la orilla interior de la ciénaga donde las planas calizas tienen ligerísimo declive hacia el mar, es donde las zonas de manglar alcanzan mayor anchura. En algunas partes de esta región las zonas ocupadas por la asociación *Conocarpus* y por la de *Rhizophora* pueden alcanzar una anchura de varios kilómetros cada una.

Figura IV.73).- Perfil de vegetación desde la selva baja caducifolia espinosa y con catctáceas cadelabriformes hasta la sabana.



Hacia el norte de Yucatán, en las orillas de la ciénaga, es notable que se intercalen en el manglar manchas de otras asociaciones, así como elementos algo extraños en el mismo. Por ejemplo, cerca de Sisal, aparte de manchas de tular, carrizal y del helecho *Acrostichum aureum*, que son frecuentes en muchos manglares, se encuentran intercaladas con la asociación *Rhizophora-Laguncularia* y *Bravaisia tubiflora*. este arbusto de 1 a 3 m de alto constituye con frecuencia una asociación de borde de manglar hacia tierra firme. En los petenes, la característica principal es la presencia de especies vegetales poco comunes en áreas con agua salada, como *Manilkara achras* (chicle), *Ficus tecolutensis* (álamo), *Achrosticum sp* (helechos), *Bravaisia tubiflora*, y *Sabal yapa* que llegan a alcanzar alturas de 25 metros o más. La altura de las diversas asociaciones del manglar es variable según las situaciones. La asociación de *Rhizophora* puede tener de 3 a 25 m. La asociación de Conocarpus es generalmente baja, de 2 a 7 m pero en los petenes del noroeste de Yucatán puede alcanzar una altura de unos 15 m. Por último, la serie costera culmina en la barra arenosa, donde se han diferenciado dos grandes comunidades de vegetación**:** la vegetación de matorral se caracteriza por la presencia de palmas como *Thrinax radiata* (chiit), *Coccothrinax readii* (nakax), que se entremezclan con *Coccoloba uvifera* (uva de mar), *Agave angustifolia* (agave), *Tourmefortia gnaphalodes,* y la orquídea *Schomburgkia tibiscinis.* La zona de plantas pioneras es la más cercana al mar, crecen especies herbáceas y arbustivas de escasa altura, tolerantes a medios extremosos, como son alta salinidad, vientos fuertes, movimientos de arena, olas y mareas altas. En la zona de playa y primera duna, se encuentran manchones de vegetación con herbáceas y pioneras como *Sesuvium portulacastrum*, *Suriana maritima, Ipomea pes-caprae*, *Euphorbia buxifolia*, *Atriplex petandra*, *Lycium carolinianum* y

*Sporobolus virginicus***.** Muchas de estas especies son cubiertas por la arena en temporadas de invierno. Antes de la primera duna se pueden encontrar arbustos de *Tounefortia gnaphaloides*. En la zona de matorrales crecen especies menos tolerantes a cambios ambientales. En la ladera sur de la primera duna, conformada como una hondonada seca se encuentra una hilera de agaves y cactáceas combinados con pioneras de la duna formando un matorral largo, luego se presentan varias crestas y hondonadas donde se desarrollan matorrales bajos con palmas de coco (*Cocos nucífera*). En estos matorrales, la especie *Caesalpinia vesicaria* es indicadora de que el acuífero edáfico de la barra arenosa es alto en salinidad. La presencia de cactáceas y arbustos espinosos formando matorrales cerrados indican, además, un ambiente muy seco. Algunas especies indicadoras de perturbación ambiental presentes son *Tribulus cystoides*, *Flaveria linearis*, *Ambrosía hispida* y *Cenchrus achinatus.*

Particularizando sobre el tema de la selva baja espinosa caducifolia y subperennifolia, la cual se encuentra distribuida preferentemente en la zona costera como se observa en la siguiente figura, y su distribución puede ascender a más de 84,000 ha de terrenos de este tipo de vegetación y que tienen política de conservación en el POETCY. Esta es una característica que distingue a la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes.

Tabla IV.33).- Se presenta a continuación las Cartas de Vegetación y Uso de Suelo Series V y VI editado por el INEGI, en donde se observa la pérdida de cobertura vegetal entre el 2013 y 2016.

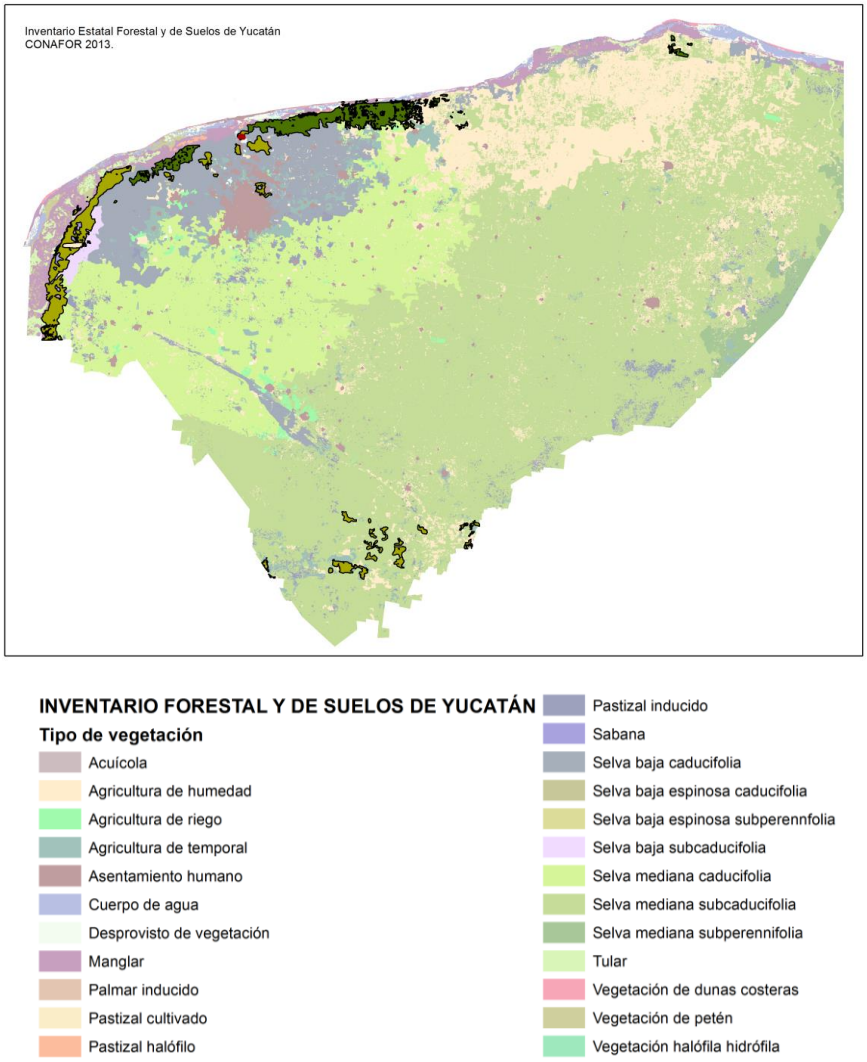
Serie V INEGI

Tipo de vegetación	**Ha**	**% del total estatal**
Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa caducifolia	28,143.49	0.7103
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa caducifolia	12,107.39	0.3056
Subtotal	**40,250.88**	**1.0159**
Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia	23,099.53	0.5830
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa subperennifolia	21,231.65	0.5359
Subtotal	**44,331.18**	**1.1189**
Total	**84,581.36**	**2.1348**

Serie VI INEGI

Tipo de vegetación	Ha	% del total estatal
Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa caducifolia	21,472.74	0.542
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa caducifolia	11,987.76	0.303
Subtotal	**33,460.50**	**0.845**
Vegetación secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia	23,211.39	0.586
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja espinosa subperennifolia	21,478.72	0.542
Subtotal	**44,690.11**	**1.128**
Total	**78,150.61**	**1.973**

Figura IV.74).- Distribución espacial de la selva baja espinosa caducifolia y subperennifolia en el estado de Yucatán.



Como se observa se tiene una pérdida neta de vegetación de selva baja espinosa de 6,430.75 Ha, o el 7.60 % del total, sin embargo, la principal pérdida es de la selva baja espinosa caducifolia, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IV.34).- Pérdida neta Serie V contra Serie VI

Tipo de vegetación	Ha	% del total estatal
Vegetación secundaria de selva baja espinosa caducifolia	-6,790.38	-0.1701
Vegetación de selva baja espinosa subperennifolia	+358.93	+0.0091
	-6,430.75	-0.1618

La característica subperennifolia de la vegetación sugiere que esta no se encuentra en estrés hídrico en buena parte del año, como le sucede a la vegetación caducifolia, que en temporada de secas tira la mayor parte de sus hojas para soportar el estrés hídrico. Por lo tanto esta vegetación subperennifolia debe satisfacer sus necesidades de agua por otras

vías, ya sea por proximidad al manto freático o por que se presenten condiciones de inundabilidad superficial por condiciones del suelo y la roca que subyace.

Como se mencionará más adelante, en el Capitulo sobre geohidrología, la ubicación geográfica de este tipo de vegetación se encuentra en cotas topográficas que van de 0.807 msnm hasta 1.860 msnm, es decir, la superficie del terreno es en general, menor a la cota topográfica de 2 msnm, como se puede apreciar en la siguiente tabla, en donde se incluye la profundidad al manto freático y el potencial hidráulico, todos en metros sobre el nivel del mar (msnm):

Tabla IV.35).- Cotas topográficas del área en que se encuentra la selva baja espinosa subperenifolia en Progreso.

Punto de muestreo	Cota topográfica	Profundidad nivel freático	Potencial hidráulico
Laguna 1	0.790	0.376	0.414
Barreno 2	1.709	1.274	0.435
Sondeo 5	1.020	0.613	0.411
Sondeo 6	1.050	0.607	0.441
Laguna 2	0.807	0.384	0.423
Barreno 1	1.860	1.444	0.416
Sondeo 7	1.540	1.153	0.483

Las variaciones por marea en los alrededores de un área con selva baja subperennifolia, cercano al Puerto de Progreso, varían poco más de 0.10 m durante marea viva, y entre marea viva y muerta los incrementos pueden ser de poco más de 0.20 m.

En condiciones extremas, como en el caso del huracán "Gilberto", se generaron marejadas con una amplitud mayor de 4 metros, las cuales invadieron aproximadamente 5 kilómetros tierra adentro. Este fenómeno modificó significativamente la dinámica del acuífero a 25 kilómetros de distancia de la línea de costa, principalmente en la región noroeste de la Península, donde un día después del huracán, los niveles freáticos se incrementaron entre 0.64 y 1.1 metros. Las elevaciones producidas en la zona de influencia costera sufrieron incrementos adicionales de 0.50 metros en comparación a otros sitios localizados más al sur de la franja de 25 kilómetros. En condiciones normales de recarga, el nivel de agua en los extremos se incrementa de manera muy similar con diferencias de algunos centímetros, manteniendo el flujo natural hacia el mar (Villasuso y Cols., 1989).

En el caso del huracán Isidoro, que tuvo una precipitación extrema, se modificó significativamente la dinámica del acuífero al incrementar el nivel freático alrededor de 1.8 metros con respecto a la recarga media anual. Las elevaciones producidas en la zona de influencia costera sufrieron incrementos adicionales provocando la inundación de ciénagas y sabanas e incrementando la velocidad de descarga de los flujos de agua subterránea, por lo que el tipo de vegetación es muy vulnerable a inundaciones extremas (Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales, del estado de Yucatán (Servicio Geológico Nacional, 2013).

Como se mostró en el Capítulo sobre Geología, la sección litológica encontrada en la zona cercana a la selva baja subperennifolia se caracteriza por la presencia de una roca caliza compacta denominada Caliche con un espesor variable (entre 0.50 y más de 1 m).

Esta roca aflora en toda la superficie del predio, y se encuentra parcialmente cubierta por una delgada capa de suelo. Pruebas de permeabilidad en laboratorio, realizado en estudios de investigación a esta roca, revelan que es prácticamente impermeable.

En el plano de estratificación que separa al Caliche de la Caliza Arcillo-Limosa se encontraron en ciertos casos, algunas evidencias de un delgado horizonte cárstico, con presencia de cavidades de disolución con espesores de 0.30 a 0.40 m. Este horizonte no es continuo en el sitio, ya que solamente se encontró en algunos de los barrenos exploratorios el total explorados.

El plano de estratificación o contacto geológico entre estas dos formaciones juega un papel importante en el desarrollo de flujos laterales. Es importante, establecer una diferencia entre los flujos que pueden desarrollarse a través de estos planos y ante la presencia de fracturas.

Los flujos de agua que puedan desarrollarse en estos planos de estratificación son horizontales, ya que éstos, mantienen su posición original como cuando ocurrieron los depósitos de sedimentos calcáreos de origen marino que originaron este paquete de roca. Lo anterior, en virtud de que la plataforma calcárea de la Península de Yucatán se considera tectónicamente estable.

Por otro lado, la roca caliche que aflora posee una conductividad primaria, tan baja que suele considerársele como un acuitardo. Sin embargo, el intemperismo que ha actuado sobre ella la ha agrietado creándole diaclasas que le confieren una elevada permeabilidad secundaria; permitiendo que el agua pueda escurrir verticalmente hacia abajo hasta alcanzar los planos de estratificación, a partir de donde pueden desarrollarse flujos horizontales. La existencia de la caliza Arcillo- Limosa que subyace a este plano de estratificación evitará que el agua continúe descendiendo y alcance al acuífero libre, debido a que es poco permeable.

Como se verá más adelante, en el Capítulos sobre geohidrología, si bien el agua puede infiltrarse en los primeros centímetros del subsuelo debido a la porosidad secundaria del caliche, lo cierto es que la presencia de una caliza arcillo-limosa de baja permeabilidad impide que ésta recargue al acuífero libre. Si observamos los resultados de la conductividad hidráulica obtenidos en las pruebas de infiltración de la zona vadosa y la clasificación que se le ha dado a esta capa litológica, se tiene que la precipitación tendrá contacto con una capa de caliza arcillo limosa de baja a media conductividad hidráulica; esto sugiere que la permeabilidad del estrato litológico es lenta a moderada y finalmente se determinó que se puede infiltrar en dicho estrato entre el 4 y el 12 % del volumen precipitado (sin considerar que existe vegetación que también puede aprovechar el agua infiltrada); por lo que se puede considerar una recarga nula y generar, dependiendo de las particularidades topográficas y edafológicas del sitio, inundaciones temporales en el terreno. Esto es una razón por la que se puede encontrar selva baja espinosa subperennifolia en la ubicación geográfica cercana a la zona costera.

Esto muestra que la selva baja espinosa subperennifolia es un ecosistema o paisaje que brinda a la heterogeneidad espacial en materia de diversidad de ecosistemas, y que por lo tanto debe ser tratado con especial atención y fortalecer las medidas de protección y conservación necesaria ya que también es hábitat de especies consideradas en la NOM 059 de SEMARNAT, algunas de ellas en peligro de extinción.

El agua regresa a la atmósfera a través de los procesos conocidos como evaporación y transpiración. La evaporación, como se mencionó anteriormente, tiene lugar a partir de las superficies hídricas, edáficas y vegetales, como las hojas que detienen la lluvia. La transpiración es un proceso más complejo donde la superficie de las hojas de las plantas suele ser varios grados más calientes que el aire del entorno, debido a la radiación del sol. De esta manera se establece un gradiente de presión de vapor de agua, el cual permite que las plantas transpiren con libertad y es el único medio a través del cual pueden transportarse los nutrientes minerales desde las raíces hasta los vástagos en desarrollo, además de ser un excelente mecanismo de enfriamiento para las hojas (Vickery, 1987). Estos procesos combinados se conocen como evapotranspiración y su tasa de flujo depende del poder evaporante de la atmósfera y de ciertas características estructurales de la propia planta. Es bien conocido que los sistemas de absorción y conducción de las plantas terrestres son relativamente ineficientes en el suministro de agua para satisfacer las demandas de la transpiración, aun cuando el agua para el crecimiento sea abundante. Durante las horas de luz del día, las plantas pierden más agua de la que pueden absorber y conducir, por lo que su equilibrio hídrico es negativo. Esto puede ocasionar una disminución de la turgencia y las hojas y los tallos se marchitan. Durante la noche, el sistema de transpiración de las plantas puede cerrarse (estructuras denominadas estomas) y la planta puede recuperar su equilibrio hídrico. La marchitez temporal es un fenómeno común en la selva caducifolia, ya que su equilibrio hídrico durante el día y en la temporada de secas es fundamentalmente negativo. La capacidad de campo del suelo en esta porción de la península es muy baja, es decir la cantidad máxima de agua que pueda permanecer como una película y en el espacio poroso del suelo, que no tiene contacto con el nivel freático es poca. Los suelos arcillosos con sus grandes áreas superficiales son capaces de mantener demasiada agua no disponible y en consecuencia el fenómeno de la marchitez se presenta más que en suelos arenosos, aunque muchas plantas han desarrollado adaptaciones interesantes a tales limitantes.

La transpiración estomática represente el 95 % del total transpirado, siendo solamente el 5 % cuticular. De mil partes de agua que entran a una planta a través de los pelos absorbentes de las raíces, 990 partes se pierden por transpiración, 9 partes se destinan a la hidratación de tejidos y una es utilizada para la fotosíntesis. Esto quiere decir que solo se aprovecha el 1 % por el vegetal, el 99 % restante se transpira. Las plantas que se encuentran en una atmósfera saturada de vapor de agua transpiran muy poco o no transpiran. Por su parte, las plantas xerófitas, plantas que viven en zona áridas, como el caso de muchas de las especies de la selva baja caducifolia espinosa y con cactáceas candelabriformes, como se presenta en la zona del anillo de cenotes, no transpiran o lo hacen muy poco, gracias a la gruesa cutícula que rodean su tallo suculento, a la carencia de estomas en los mismos, y a la transformación de las hojas en espinas-

La sensibilidad de la evaporación o transpiración estomática para distintos casos se presenta en la siguiente tabla. En ambientes áridos, las tasas de transpiración son tan altas como 10 mm/día o 1 mm/hr, y son comunes para cultivos bien irrigados, mientras que en los ambientes de climas templados en invierno, su tasa disminuye a menos de 0.3 mm/día. La transpiración a partir de bosques o selvas secas, frecuentemente es más baja que la de los campos de cultivo, debido a los valores relativamente bajos de conductancia fisiológica del dosel (o sensibilidad de la evaporación foliar) (Orellana, R., A. Escamilla y A. Larqué-Saavedra, Ecofisiología Vegetal y Conservación de Recursos Genéticos, Ed. CICY, Mérida, Yucatán, México, 1999).

Tabla IV.36).- Transpiración de ciertos cultivos

Tipo de agrosistema	Transpiración en mm/hr
Frijol	0.35
Tomate	0.25
Huerto citrícola	0.41
Pastizal	0.02
Bosque o selva	0.60

La mayoría de las comunidades vegetales están formadas por mezclas heterogéneas de diferentes especies creciendo en tipos de suelo heterogéneos con distinta disponibilidad de agua. Esto significa que el comportamiento estomático de esta heterogeneidad de plantas en una misma área puede llegar a ser ampliamente asincrónica, entre las especies de raíces superficiales o de aquellas que crecen en suelos rocosos, las que tienden a cerrar sus estomas antes que las que poseen raíces profundas o bien hidratadas. Este comportamiento independiente, significa que las plantas individuales (aisladas) están bien acopladas a su ambiente, siendo las estomas de esta manera las mayores determinantes en la transpiración. Se ha reportado que la susceptibilidad de la planta a la evaporación del agua proveniente del suelo implica que la transpiración de cultivos comienza a disminuir por debajo de la tasa potencial cuando solo el 10 % del agua del suelo ha sido removida, mientras que en otros estudios encontraron que sólo el 80 % del agua disponible debía ser removida antes de que la transpiración del cultivo decrezca significativamente (estos estudios se realizaron en cultivos de maíz de manera experimental).

V).- GEOHIDROLOGÍA GENERAL

El estado de Yucatán carece de corrientes superficiales, las lluvias saturan el terreno, colman el bajo relieve y se infiltran en el subsuelo dando origen a las aguas subterráneas en cavernosidades complejas. La disolución de las rocas puede desarrollarse en la superficie del terreno y afectar a los materiales calcáreos en contacto con la atmósfera; o bien, actuar sobre los mantos calizos subsuperficiales en cuyo caso recibe el nombre de subcárstico. En el estrato rocoso superficial o coraza calcárea, el fenómeno cárstico se expresa en forma de hoyaduras y salientes de superficies rugosas, cavidades y conductos tubulares que en ocasiones traspasan de lado a lado los fragmentos rocosos. En el segundo caso, el agua de infiltración, que proviene de la precipitación pluvial y que aunado al escaso relieve y el alto grado de fracturación de la roca superficial, actúa de manera constante sobre las rocas carbonatadas subsuperficiales, relativamente más blandas que las exteriores, formando una compleja trama de cavidades subterráneas como grutas, cavernas, sumideros, cenotes con o sin comunicación con el exterior (Duch, 1988). Hacia el sur, sólo se manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficial o aguadas. Así, gran parte de la precipitación pluvial se evapotranspira y el resto se infiltra al manto subterráneo a través de fracturas, oquedades y conductos cársticos de las calizas. Una vez que se integra al acuífero, el agua sigue diferentes trayectorias de flujo, controladas por el desarrollo o evolución del karst profundo.

Evidentemente las regiones de mayor carsticidad se presentan en el sur de la entidad, donde se encuentran los sedimentos más antiguos del Paleoceno-Eoceno (L. Velázquez, 1986). Para delinear el sistema de flujo de los acuíferos identificados en el estado es necesario establecer las áreas de recarga y descarga. En la porción norte, la descarga de esta agua se realiza por medio de manantiales y en forma difusa hacia el mar, alimentando a las ciénagas y lagunas costeras. La recarga se produce de manera bastante uniforme a través de toda el área, siguiendo el patrón de distribución de la precipitación. La propuesta de la existencia de dos acuíferos regionales se hizo en función de la edad de las rocas que constituyen las dos unidades hidrogeológicas más importantes: Miocénico y Eocénico; las cuales fueron caracterizadas en base a la evolución geoquímica del agua que contienen, tomando como apoyo el principio propuesto por Back y Hanshaw (1979), a través del modelo esquemático que muestra las trayectorias de reacción del agua en un acuífero carbonatado costero. Existe una diferenciación hidrogeológica e hidrogeoquímica de los acuíferos regionales. En el acuífero miocénico, el proceso geoquímico que prevalece es la mezcla de agua de reciente infiltración y con enriquecimiento salino por presencia de depósitos muy solubles y por mezcla con agua de mar (Villasuso y Méndez, 2000), con un amplio rango de dispersión. En el acuífero eocénico, el proceso dominante es el incremento de sales por disolución a lo largo de la trayectoria de flujo, y enriquecimiento repentino producido por la presencia de depósitos evaporíticos altamente solubles como se muestra en la figura V.1, donde se observa un incremento del valor de la relación Cl/HCO hacia la porción noroccidental del acuífero eocénico. En el mismo esquema es posible observar, para el acuífero miocénico, un incremento hacia las costas en las porciones norte y noroccidental, representando estos valores la acción incipiente de la intrusión salina. Se analizaron también los valores del índice de saturación con respecto a la dolomita (figura V.2), teniendo como fundamento que hacia las áreas de recarga se presenta un alto contenido de CO_2 y relativamente bajo contenido de sólidos totales disueltos, es de esperar una bajosaturación con respecto a la dolomita y hacia donde se presente la dirección de flujo

un incremento en este valor. Hacia las porciones del estado, definidas como áreas de recarga miocénica y eocénica, se presentan valores mínimos o bajosaturados, coincidiendo con los valores de precipitación mas alta.

Figura V.1).- Curvas de isovalores de la relación de cloruros sobre bicarbonatos

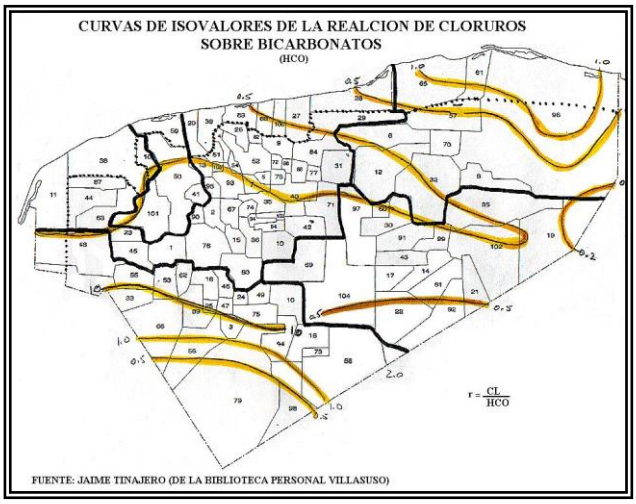
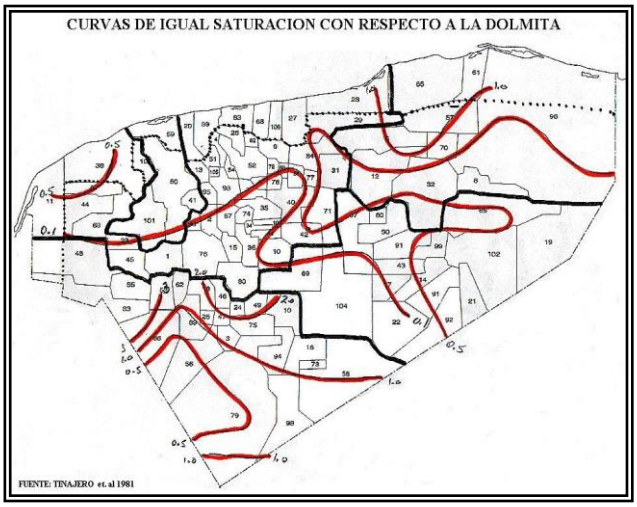


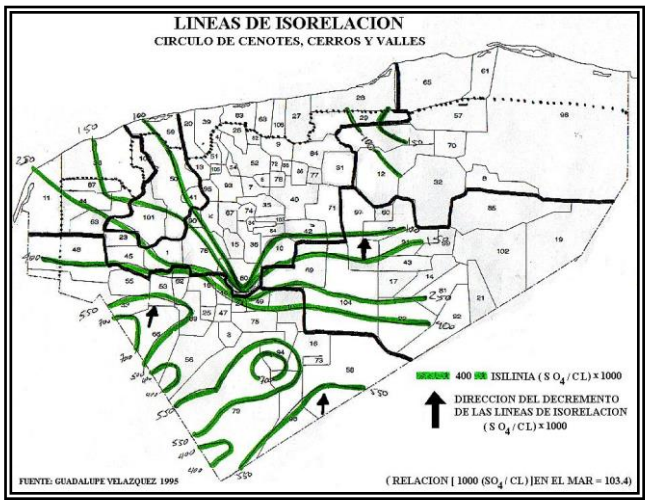
Figura V.2).- Curvas de igual saturación con respecto a la dolomita



Como se mencionó anteriormente, el anillo de cenotes es un conducto de alta permeabilidad (Velázquez, G., 1995), que capta agua subterránea procedente del sur y la transporta a lo largo de éste hacia la costa. Esta hipótesis se apoya en las siguientes evidencias: 1) el decremento que se percibe en la relación SO_4/Cl (Figura 5.3), conforme los sitios al oeste van acercándose al semicírculo; 2) la semejanza de la relación SO4/Cl con la del agua de mar, en los sitios que se encuentran en la parte interna del anillo y 3) la presencia de agua dulce (ojos de agua) en las Bocas de Dzilám (costa este) y el estero de Celestún (costa oeste).

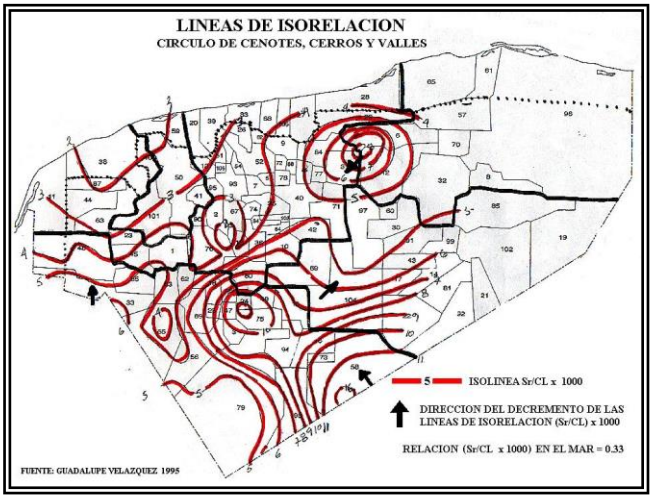
Los resultados de pruebas en pozos profundos de la UNAM indican que el frente de la intrusión salina llega hasta aproximadamente a 110 Km. de la costa norte, lo cual es apoyada por los sondeos eléctricos y mediciones del espesor saturado de agua dulce.

Figura V.3).- Líneas de isorelación de sulfatos y cloro



El flujo de agua dulce que desemboca en las costas este y oeste es evidencia de un parteaguas en el anillo de cenotes, el cual se ubica aproximadamente al sur de Telchaquillo. Las evidencias para esta hipótesis son: 1) el cambio en los valores de la relación SO_4/Cl que se observan en la parte oeste del área, este cambio se presenta a partir de Telchaquillo hacia el este; 2) el decremento de la relación Sr/Cl (Figura V.4) hacia el este y oeste a partir aproximadamente al norte de Tekit.

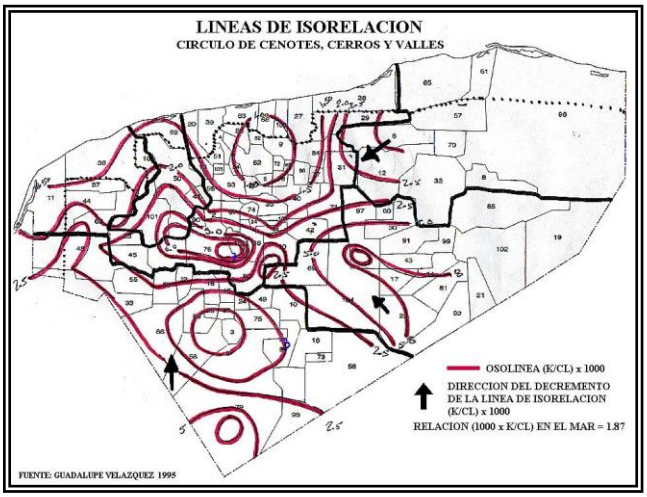
Figura V.4).- Líneas de isorelación entre estroncio y cloro



Los índices de saturación del agua subterránea con respecto a los minerales de celestita, anhidrita, yeso y halita, las relaciones Sr/SO_4, Sr/Cl, Na/Cl, excesoCa/excesoSO$_4$ y la propia relación SO_4/Cl, indican que los procesos geoquímicos que controlan el sistema hidrogeológico de la zona son: 1) la intrusión salina, 2) la disolución de especies de carbonato y 3) la disolución de otras fases químicas como yeso, celestita, anhidrita y halita. Con esos resultados se sabe que el sulfato, estroncio, sodio y cloruro se incorporan al sistema por disolución de evaporitas, además del mar, como otra fuente. Los altos contenidos de SO_4 y la relación Ca/SO_4 en los pozos localizados fuera del anillo de

cenotes indican que no existe paso del agua enriquecida de este mineral al interior del anillo de cenotes en sitios como Tecoh o Telchaquillo (Escolero et al 2000). La relación K/Cl en algunos lugares como Peto, Abalá, Telchaquillo y Sotuta es mucho mas alta que en el mar (figura V.5). Posiblemente esto refleje la contaminación antropogénica por el uso de fertilizantes en la zona frutícola.

Figura V.5).- Líneas de isorelación entre potasio y cloro

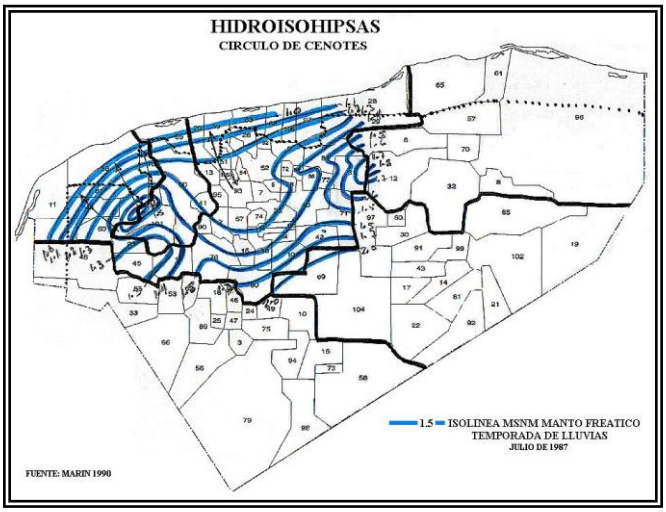


En estudios realizados por Marín (1988), se conoció que las oscilaciones promedio del nivel hidrostático entre épocas de estiaje y lluvias es del orden de los 0.50 m, mientras que el espesor de la lamina de agua dulce oscila desde los 15 a 18 m en la costa, hasta los 45 - 48 m en los alrededores de Mérida, según relación Ghyben-Hersberg. Los niveles de las aguas subterráneas y las líneas de flujo se registraron durante el periodo Julio/1987 - Abril/1989 (Marín, 1988), a partir de los cuales se confeccionaron los mapas de hidroisohipsas para diferentes fechas, así como la dirección predominante de las líneas de flujo. Las principales características de estos esquemas se exponen a continuación:

En el verano (pleno período húmedo) de Julio de 1987 (figura V.6), las hidroisohipsas en la región de estudio van desde 1.25 m en el extremo suroriental (Mérida) hasta 0.55 m en las cercanías de Progreso, extremo nororiental, existiendo una diferencia de nivel de 0.70 m y una pendiente hidráulica de 0.0233 m/Km, evidenciándose las líneas de flujo en una dirección prácticamente hacia el norte. Hacia el noroeste, los niveles de las aguas subterráneas oscilan desde 1.66 m en Kinchil hasta los 0.50 m en las cercanías de la costa por Celestún, siendo la pendiente hidráulica de 0.0258 m/Km aproximadamente, el comportamiento de las líneas de flujo es en el sentido sureste-noroeste.

Al siguiente año, Julio de 1988**,** las hidroisohipsas mantienen una situación bastante similar a la del año anterior, siendo la pendiente hidráulica de Mérida a Progreso de 0.0227 m/Km, y la de Kinchil a las cercanías de Celestún de 0.0222 m/Km, es decir muy similares ambos años, demostrándose la poca variabilidad de niveles para las mismas fechas.

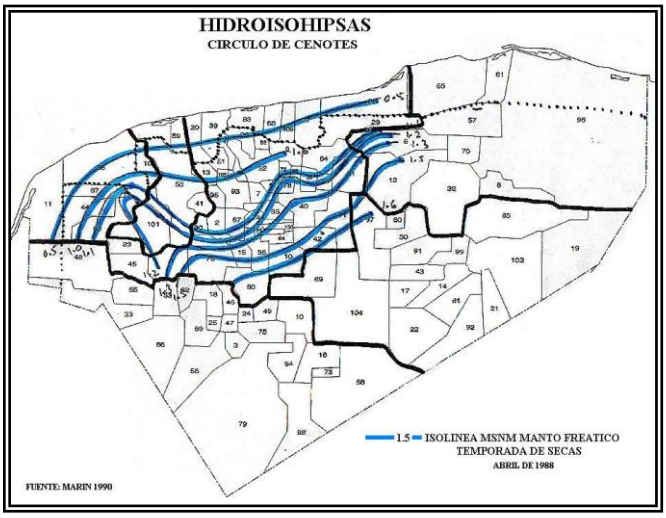
Figura V.6).- Hidroisohipsas en el semicírculo de cenotes. Lluvias



Al final del período seco o de estiaje, mes de abril, cuando los niveles de las aguas subterráneas deben alcanzar sus mínimos valores, las diferencias con el período húmedo no son realmente muy grandes (figura V.7). En abril de 1988 el valor de las hidroisohipsas en la localidad de Mérida fué de 1.02 m y cercanas a Progreso algo menor de 0.50 m, resultando una pendiente hidráulica de 0.0173 m/Km, mientras que para el transecto Kinchíl a la cercanía de Celestún fué de 0.018 m/Km aproximadamente, con valores de 1.22 para Kinchil y de 0.50 m cercano a Celestún.

Al año siguiente, Abril de 1989 y posterior al huracán Gilberto, en Mérida el nivel de las aguas subterráneas fué de 0.96 m (6 cm. menor que el año anterior), pero los niveles en el transecto Mérida - Progreso (que igualmente disminuyen hacia la costa) eran algo superiores a los del año anterior, haciendo que la pendiente hidráulica aumentara un mínimo comparativamente, sobre todo desde unos 10 Km al norte de Mérida hacia la costa y desde Kinchil en dirección a Celestún, siendo la pendiente hidráulica de 0.0252 m/Km y de 0.0247 m/Km respectivamente.

Figura V.7).- Hidroisohipsas semicírculo de cenotes. Secas



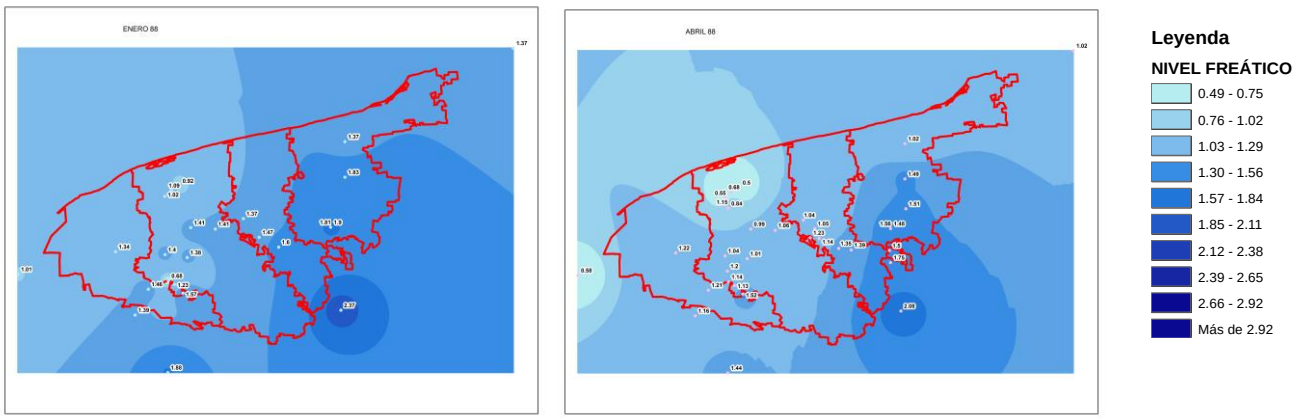
Puede observarse en la figura que se produce un flujo semiradial desde el sur y sureste hacia Mérida y una pequeña zona de reflujo a partir de unos 10 a 12 Km al norte de Mérida donde se localiza una divisoria de las aguas subterráneas, que continuando hacia el norte siguen los flujos normales hacia la costa.

A partir de estos esquemas de hidroisohipsas o equipotenciales se puede concluir que las oscilaciones del nivel hidrostático en el transcurso de un año son del orden de los 20 a 60 cm. como máximo para los puntos de mayor oscilación y las pendientes hidráulicas tienen igualmente muy poca variación, la que demuestra cierta estabilidad en los cambios de niveles en toda la región.

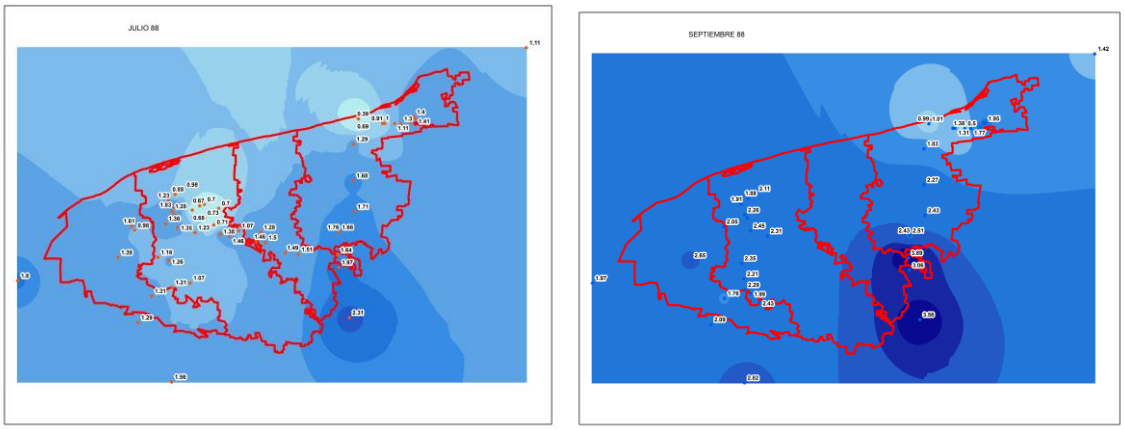
En la siguiente figura se observa la evolución del cambio de nivel freatico durante el año 1988, de enero a septiembre, mes en que se presentó el huracán Gilberto, notese el incremento de nivel de agua derivado de la intensa recarga por la precipitación pluvial que se presento en ese mes. De igual forma es nortorio que la zona en donde el nivel de agua es siempre mayor en el área suroriental del anillo, hacia Sotuta en este caso

Figura V.8. Evolución del cambio del nivel freático durante el año 1988, con el efecto del huracán Gilberto.

Enero y abril

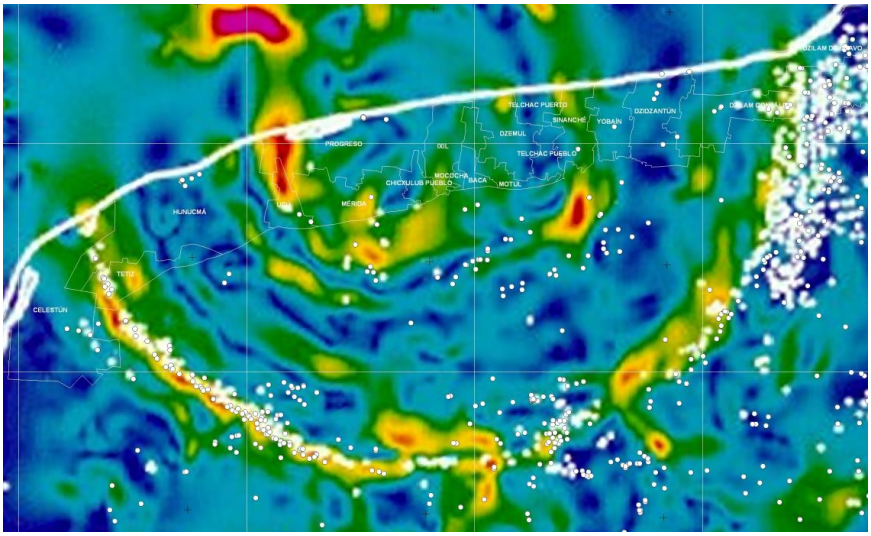


Julio y Septiembre



La figura siguiente representa un estudio que involucra mediciones del campo gravitacional de la tierra en varios puntos en la superficie. El mapa de contornos muestra las fluctuaciones en las fuerzas de gravedad en un datum dado. Estas fluctuaciones son causadas por las variaciones en la densidad de la roca, y permite identificar la localización y configuración de ciertos depósitos, en donde la estructura de la roca pueda presentar relación con el movimiento y almacenamiento del agua, u otros que afecten de otra forma la ocurrencia de las aguas subterráneas.

Figura V.9).- Anomalias gravimétricas del Anillo de Cenotes y zona costera noroccidental del Estado de Yucatán



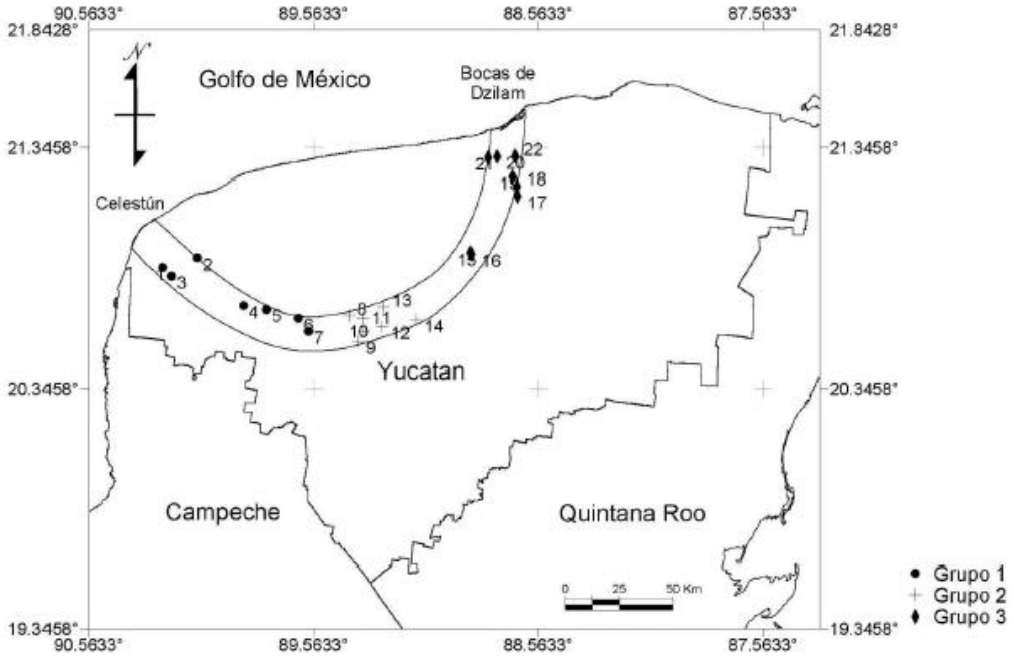
Ahora bien, Perry y colaboradores (2002) presentan un modelo conceptual, con base en a la geoquímica del agua subterránea y de la circulación del agua subterránea a lo largo del anillo de cenotes. En este modelo se propone la existencia de un parteaguas en la zona entre Telchaquillo y Tekit (Fig.); con ello se postula, también, una zona de recarga.

Figura V.10).- Mapa de la zona geohidrológica del anillo de cenotes mostrando de la dirección de flujo en el anillo de cenotes. (Tomado de Perry et al., 2002).

Con base en el análisis realizado sobre la densidad de cenotes en la zona, así como el análisis geomorfológico, se coincide con la propuesta de Perry et al. (2002), puesto que esta es una zona de alta permeabilidad superficial, con la segunda densidad de cenotes por km2, más alta de la zona, sólo por detrás de la zona al sureste de Dzilam de Bravo. Es precisamente en la zona al sureste de Dzilam de Bravo donde se encuentra la zona de mayor densidad de cenotes, por ello Hernández y colaboradores (2011) proponen que es en esta zona donde se encuentra la mayor zona de recarga de la región geohidrológica Cabe mencionar que en esta descripción, se considera las zonas de recarga a un nivel local, ya que no se considera el modelo propuesto por la CONAGUA (2006), ya que éste es un modelo a nivel regional.

El agua subterránea es el medio de transporte de todas las sustancias incorporadas en el continente, por lo que necesario establecer la conexión hidráulica entre los humedales costeros y el agua subterránea. De acuerdo con Pérez-Ceballos, R.Y. (2011), el Anillo de Cenotes concentra y conduce el agua subterránea hacia la costa de Celestún y Dzilam, por lo que entender y conocer la influencia del agua subterránea en la zona costera es de gran importancia. Por ejemplo, en la temporada de lluvia aumentó la disolución de los minerales en el Anillo de Cenotes y que al transportarse hacia la zona costera se sobresatura y se precipita, favoreciendo al aumento de los minerales que llegan a la misma. La autora realiza un estudio de modelación inversa que permiten cuantificar los minerales y su comportamiento en temporada de secas, lluvias y nortes. En la figura siguiente se muestra la ubicación de los diversos cenotes estudiados.

Figura V.11).- Grupos de cenotes basado en las tendencias espaciales y temporales de las variables físicas y químicas del agua de los cenotes.



Con base en las características hidroquímicas como el pH, la conductividad eléctrica y los iones mayores, aplicando técnicas de estadística multivariada, se identificaron tres regiones en el Anillo de Cenotes, determinando que el comportamiento hidroquímico entre cada región fue independiente a la temporada climática.

La Región 1, ubicada al Oeste del Anillo de Cenotes (hacia Celestún) se caracterizó por altas concentraciones de Cl-, Na+ y K+ asociadas principalmente con la influencia de la intrusión marina, así como por las altas concentraciones de los sulfatos provenientes del sur de Península de Yucatán. Los índices de saturación de la calcita, la aragonita y dolomita presentaron condiciones de equilibrio y de precipitación. El modelo inverso regional (de la Región 2 a la 1) determinó que la precipitación de la calcita hacia la Región 1 fue de -0.3112 mmol Kg-1agua y la disolución de dolomita fue de 0.1470 mmol Kg-1agua, en donde la desgasificación fue de -0.5697 mmol Kg-1agua de CO2.

La Región 2, localizada en el centro de Anillo, se caracterizó por registrar valores de pH ligeramente ácidos, menores valores de CE, y una menor concentración iónica (Na+, K+, Mg+2 y Cl-), comportamiento que sugiere la existencia de una zona de recarga. El índice hidrogeoquímico de rMg/rCa y los índices de saturación de la calcita, la aragonita y la dolomita sugieren que se encuentra en estado de equilibrio o subsaturada, corroborando la propuesta que funciona como zona de recarga. Esta Región fue la inicial para la modelación regional inversa hacia la región 1 y 3.

La Región 3, localizada al Este del Anillo de Cenotes (Bocas de Dzilam), se caracterizó por presentar mayores valores de pH y una mayor concentración iónica en comparación con la zona de recarga, mostrando también la influencia marina y de la entrada de agua subterránea provenientes de otra fuente de agua diferente a la que se incorpora en la Región 1. Con respecto a los índices de saturación de la calcita, aragonita y dolomita presentaron condiciones de equilibrio y de precipitación. El modelo inverso regional (de la Región 2 a la 3) determinó que la precipitación de la calcita hacia la región 1 fue de -0.1919 mmol Kg-1agua y la disolución de dolomita fue de 0.2417 mmol Kg-1agua, en donde la desgasificación fue de -1.1340 mmol Kg-1agua de CO2.

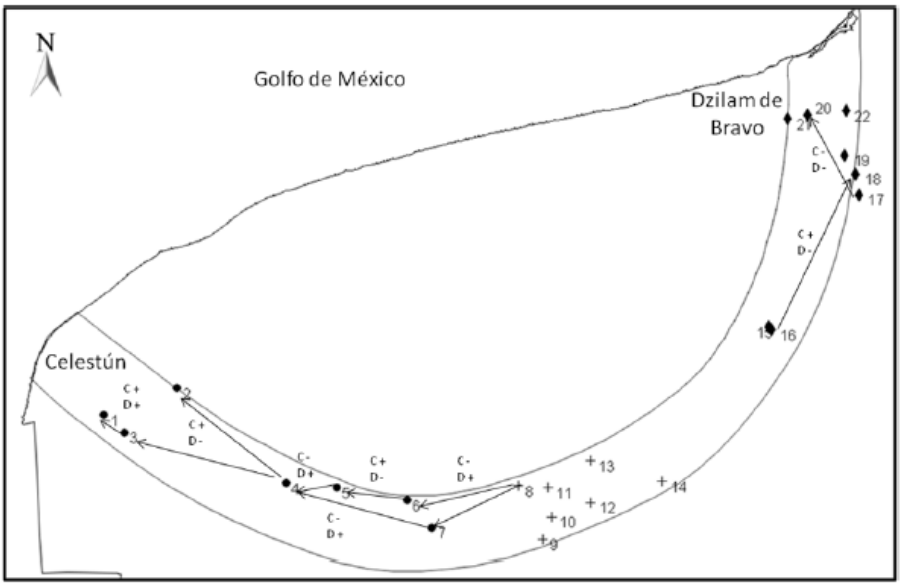
Los índices de saturación de la calcita, dragonita y dolomita en las regiones 1 y 3 presentaron condiciones de equilibrio y de precipitación, aunque en la región 3 presento valores mayores que en la región 1, esto indica una mayor magnitud de precipitación de minerales.

La región 2 se caracterizó por presentar valores de la relación rMg/rCa, de saturación de la calcita, dragonita y dolomita sugiriendo que el área se encuentra en estado de equilibrio o subsaturada, indicativo de un área de recarga.

De la misma forma, Pérez Ceballos R., 2011), determinó que la precipitación de la calcita y la dilución de la dolomita se manifiesta a ambos brazos del anillo de cenotes, mientras que la precipitación de la calcita fue mayor hacia la región 1 en comparación con la región 3 y la dolomita se disuelve mas en la región 3 en comparación con la región 1.

Los procesos de disolución y precipitación de minerales fueron diferentes con respecto a la temporada climática. Así, en lluvias y nortes los procesos dominantes fueron la disolución de la calcita, la precipitación de la dolomita y la gasificación del dióxido de carbono, notandose un incremento en la magnitud de estos procesos químicos durante las lluvias. Sin embargo, durante la temporada de secas los procesos dominantes químicos fueron la precipitación de calcita, la disolución de la dolomita y la desgasificación del dióxido de carbono.

Figura V.12).- Modelo hidrogeoquímico de los procesos de disolución y precipitación de los minerales del acuífero para la temporada de secas.



En la temporada de lluvias aumenta la disolución de los minerales en el anillo de cenotes y al transportarse hacia la zona costera se sobresatura el agua y se precipita, favoreciendo el aumento de los minerales que llegan a la zona costera. Esto muestra que el agua subterránea en el anillo de cenotes es el medio de transporte de todas las sustancias incorporadas en la porción continental y que es posible la conectividad hidráulica entre los humedales costeros y el agua subterránea.

Los valores de los índices de saturación de la calcita, la aragonita y la dolomita determinaron que en las Regiones 1 y 2, fueron mayores en la temporada de nortes y menores en la temporada de lluvias. La Región 3 registró los mayores valores de los índices en las temporadas de nortes y lluvias, y los menores en la temporada de secas. Esto sugiere que las regiones 1 y 2 están influenciadas por un mismo flujo regional, ya que se comportan de manera similar en cuanto a la química el agua y a los índices de saturación, sin embargo, la Región 3 parece estar influenciada por otra fuente de agua subterránea que se incorpora al Anillo de Cenotes por la parte Este y no del Sur del estado de Yucatán.

Es decir, los resultados de la modelación hidrogeoquímica inversa, corroboraron la entrada de agua subterránea cercanas a los cenotes 7 y 4 proveniente del sur de Estado de Yucatán; y hacia el lado Este (Dzilam) se identificó otra entrada de agua subterránea cercana al cenote 18 la cual es de un origen diferente a la que ingresa en los cenotes 7 y 4.

En la temporada de nortes se observó el aumento de la conductividad eléctrica (CE), las concentraciones de Na+ y Cl- en los extremos del Anillo de Cenotes atribuyéndoselo al efecto que tiene esta temporada climática sobre el mar, los humedales y en el acuífero costero, provocando una fuerza de empuje del agua de mar hacia tierra adentro de Yucatán. Corroborando mediante el resultado del modelo inverso donde los porcentajes de las mezclas fueron mayores en esta temporada. Mediante la modelación inversa y la caracterización hidroquímica se determinó que la mezcla de agua de mar con el agua subterránea fue mayor el enriquecimiento de agua de mar hacia el lado de Celestún en

comparación hacia Dzilam, alcanzando hasta un 2% de agua marina en la temporada de nortes. De lo anterior surge entonces el interés por conocer las relaciones funcionales hidrológicas en la porción oriental del anillo de cenotes y la influencia externa de flujos de agua diferentes a los encontrados regionalmente, el cual puede suponerse que proviene del valle cárstico que se encuentra al oriente del anillo hacia los municipios de Buctzotz, San Felipe, Sucila, Panaba, etc, (como se muestra en las figura siguientes) en el cual se llevan a cabo principalmente actividades ganaderas.

Figura V.13).- Brazo oriental del anillo de cenotes y la presencia del valle cárstico.

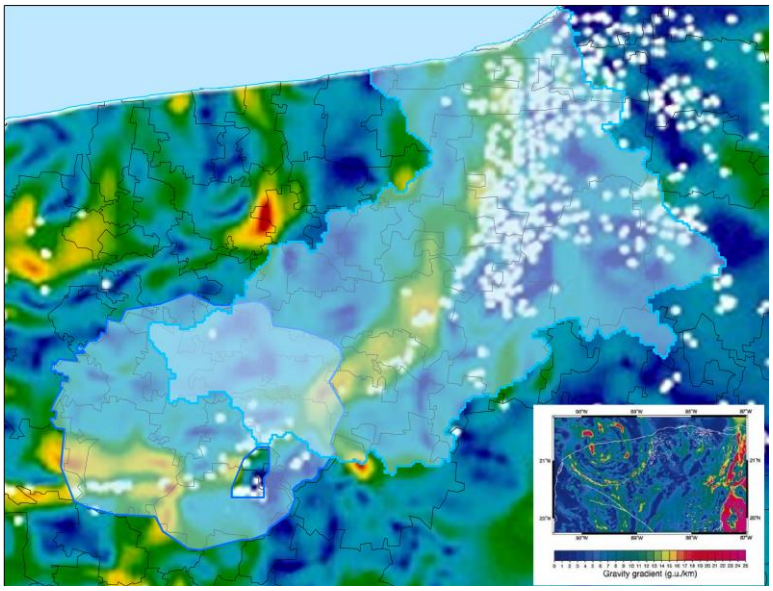
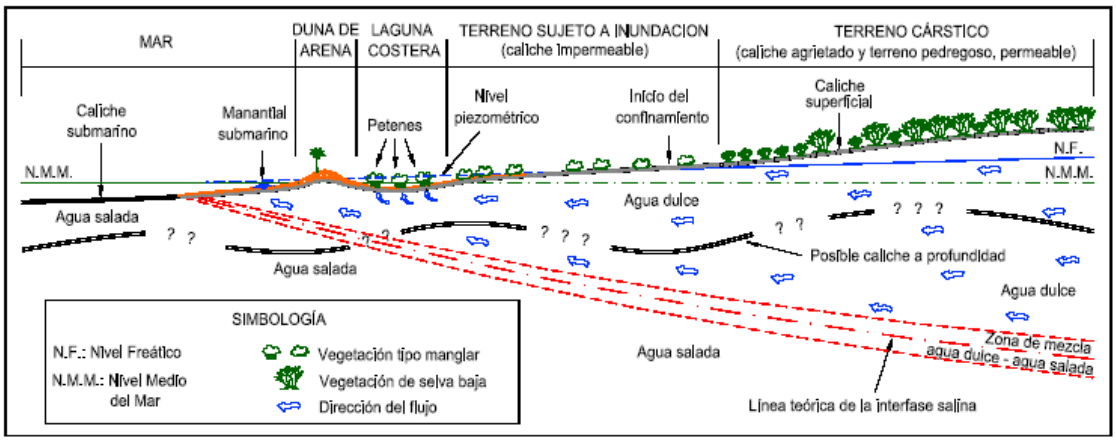


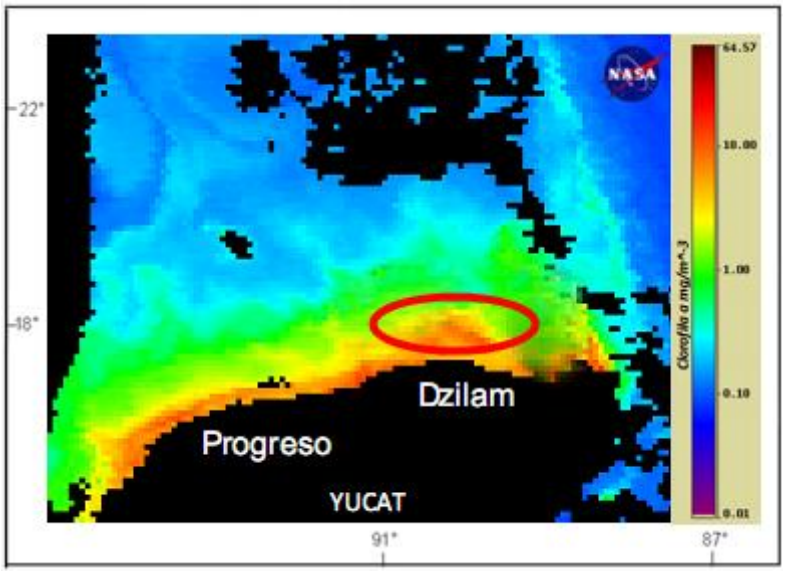
Figura V.14).- Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero en la zona de descarga.



La importancia de esta zona oriental del anillo de cenotes radica en que las Bocas de Dzilám se presenta como una zona de origen de marea roja, a partir de mayo hasta septiembre, que coincide con la temporada de lluvias, debido al aumento de nutrientes en la costa por surgencia de aguas dulces continentales, con florecimientos de microalgas del tipo diatomeas. En las costas de Yucatán se han registrado eventos de FAN´s en 2001, 2003, 2005, 2008, 2009 y 2011 con efectos negativos en el ecosistema, las pesquerías, la actividad turística, la salud humana y, por ende, en la economía de los municipios

costeros, por lo que es necesario profundizar en su conocimiento científico. Si bien estos eventos tienen un origen natural, se sabe que el aumento de los nutrimentos en el agua (eutrofización) y el cambio climático son los factores que favorecen que estos fenómenos ocurran con mayor frecuencia y duración. Otro punto de origen es en Cabo Catoche debido a la surgencia de agua rica en nutrientes del canal de Yucatán, con presencia de microalgas del tipo dinoflagelados. En ambos casos las corrientes y el viento transportan a las mareas rojas al oeste, ya sea por la playa o bien alejada de la costa y el período en que con mayor frecuencia ocurren abarca de Mayo a Septiembre.

Figura V.15).- Florecimientos algales nocivos en el área de las Bocas de Dzilám



Es así como, la zona de alimentación del acuífero, ampliamente distribuida en el área, genera un flujo que parte de la porción sureste del Estado, se dispersa hacia el norte y deriva hacia el noroeste, en dirección a Celestún. El anillo de cenotes peninsulares que acompañan a la falla de la Sierrita de Ticul conforma una red cavernosa muy compleja que desemboca al norte de Celestún y hacia Dzilám de Bravo y San Felipe por el oriente. Otro anillo interior de cenotes se aprecia también desde el área de Chuburná - Sisal, bordeando la Ciudad de Mérida y sale por el área de Telchac Puerto – San Crisanto.

En estos puntos el agua subterránea aflora a manera de manantiales y fluye hacia estas lagunas. Al centro los escurrimientos subterráneos son principalmente por infiltraciones en manto poroso, por lo que su descarga es más estable con aperturas temporales al mar. En la localidad se les conoce con el nombre de ciénagas como en Progreso.

Lo anterior es producto de la disolución del material calizo depositado durante todo el Terciario y en contacto a profundidad con la capa de evaporitas cretácicas en su porción suroccidental. Sobresale como característica distintiva la presencia de depósitos del Oligoceno solo en la parte interna de la cuenca. Se establece entonces 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 intersecta la costa, aunado a la caída de nivel del agua subterránea hacia el anillo.

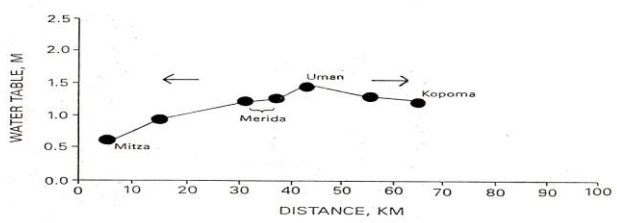
De esta manera, el anillo de cenotes afecta el tiempo de residencia de las masas de agua subterránea, tiende a aislar hidrogeologicamente a la Cuenca de Chicxulub del resto de la Península de Yucatán y afecta la habilidad de aquella porción del acuífero dentro de la

cuenca para responder a las perturbaciones (incluyendo la contaminación). Pope et al., 1991 y Perry et al., 1992, coinciden en esta sugerencia; no obstante, la pregunta de cómo los rasgos geomorfológicos del Terciario pueden reflejar un evento acontecido en el límite C/T, está aún abierta. Este alineamiento de cenotes fué observado independientemente por Villasuso, Pope y Duller y también fué publicado por el INEGI (1983).

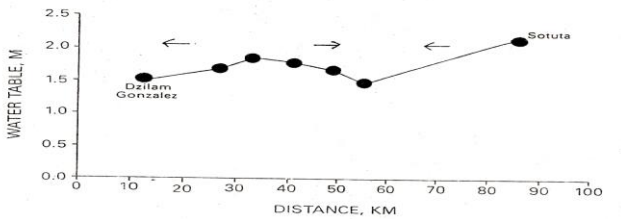
Esta estructura forma parte de las propuestas de impacto que causó una extinción masiva a fines del Cretácico. El cráter está enterrado por un kilómetro de sedimentos del Terciario y la expresión superficial más prominente, es el anillo de cenotes que demarca una frontera entre calizas fracturadas fuera y dentro de la estructura. Forma una barrera de migración lateral de agua subterránea, dando como resultado incrementos de flujo, disolución y colapsos, factores que intervienen en la formación de cenotes. La geología superficial indica que el fracturamiento que creó el Anillo de Cenotes, está relacionado con hundimientos en el borde de la frontera del Cráter, espesores diferenciales en las rocas que lo cubren o colapsos por disolución dentro de los poros de los depósitos de impacto (Kevin O. Pope, Adriana C. Ocampo y Charles E. Duller, 1993). El anillo representa un vertedero conductor de grandes masas de agua (afectada por la agricultura y el desarrollo urbano) hacia las localidades costeras. En la figura siguiente se observa como los niveles de agua del manto freático disminuyen en las zonas del anillo y la dirección de los flujos dominantes son hacia este vertedero (Marín, 1990), implicando un aumento de la conductividad hidráulica en estos tramos (Marín, 1988).

En la porción suroriental del anillo (cerca de Abalá, Telchaquillo y Tecoh) se observa una zona de baja densidad de cenotes, con una baja permeabilidad comparada con el resto del anillo y se caracteriza por presentar altas cabezas hidráulicas. Steinich y Marín (1997) definen esta zona como de alta variabilidad, un subsistema independiente de fracturas intercomunicadas, canales y cavernas, en donde el flujo por fracturas predomina incrementando la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

Figura V.16).- Cambios en los niveles de agua relacionados con el anillo de cenotes.



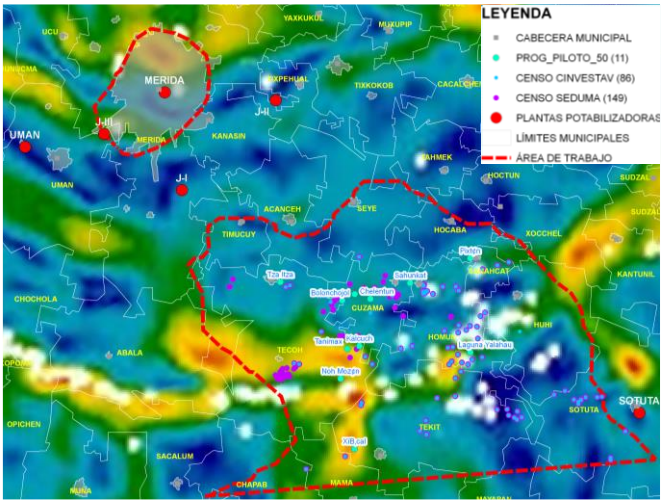
San Ignacio-Kopoma transects. Data for upper figure are from July, 1987. The semi-circle of cenotes is located approximately at Kopoma. Arrows indicate ground-water flow directions.



Dzilam de Bravo-Sotuta transects. Data for upper figure is from July, 1987. Ring of cenotes is located 50-60 km from the sea. Arrows indicate ground-water flow directons.

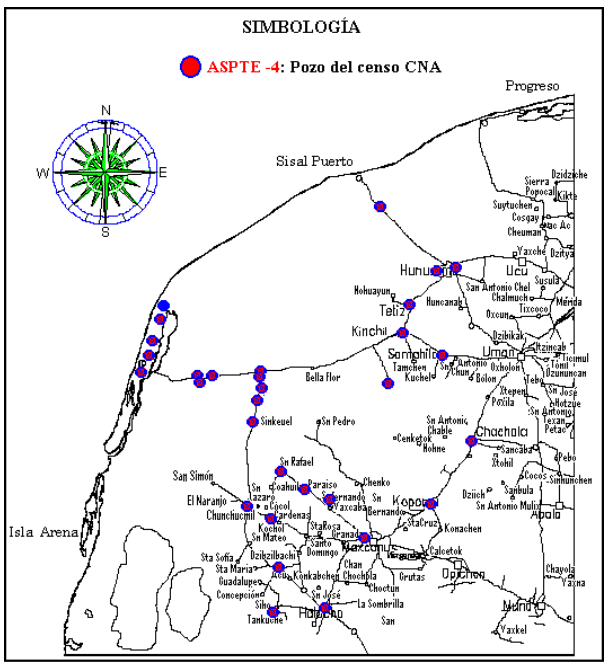
Aquí se presentan cambios importantes de corto plazo de los flujos preferenciales, con inversiones en la magnitud y dirección del flujo, probablemente como resultado de los flujos por fracturas. Los autores mencionan que estas inversiones del flujo pueden llevar los contaminantes que produce Mérida hacia el sureste.

Figura V.17).- Las líneas punteadas de la porción inferior de la figura representan el área definida como Zona de Alta Variabilidad Hidráulica señalada por Steinich y Marín (1997)



Hacia el occidente de la zona geohidrológica del anillo de cenotes, en el año del 2002, posterior al paso del huracán Isidoro, la CNA (2002), llevó a cabo un censo de aprovechamientos hidráulicos subterráneos en la porción mas noroccidental del anillo, donde reporta 30 norias existentes (muchas de ellas fuera del anillo de cenotes).

Figura V.18).- Ubicación de los aprovechamientos hidrológicos censados en la zona de ordenamiento y área de influencia



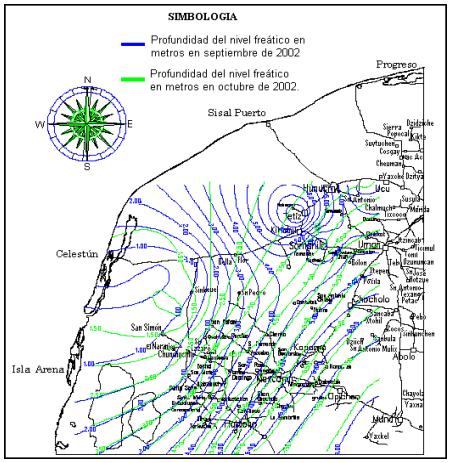
Fuente. CNA. 2002

Realizaron recorridos en el mes de septiembre, octubre y noviembre del 2002 y midieron la profundidad del manto freático de los diferentes aprovechamientos, mas 5 pozos que realizaron para el estudio de monitoreo, además se midieron la temperatura, salinidad, potencial de hidrógeno y la conductividad eléctrica del agua, así como el oxígeno disuelto y el potencial redox. En la Figura V.18 se presenta la ubicación de los aprovechamientos en la zona de ordenamiento y área de influencia. Con los datos de 2 censos se generaron configuraciones de la profundidad del nivel freático, temperatura, conductividad eléctrica, del potencial hidrógeno y de la salinidad **(**Figura V.19 a, b, c, d y e). De los resultados obtenidos se observa en la configuración de salinidad y de la conductividad eléctrica un incremento hacia la costa, por la presencia de mezcla del agua dulce con la del mar.

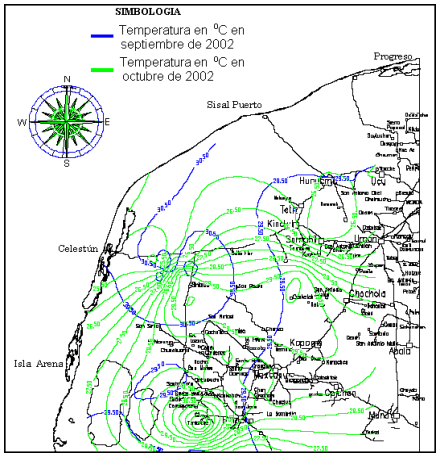
Con respecto a la evolución no se tiene una respuesta significativa, puesto que el periodo de tiempo de este estudio fué muy corto entre las mediciones. Los parámetros fisicoquímicos presentaron una evolución discreta a causa del fenómeno metereológico a finales de septiembre del 2002 y generó una recarga instantánea al acuífero, modificando los patrones de concentración medidos anteriormente, como fué el caso de la temperatura y el pH.

Figura V.19).- a) mapas de isolíneas de profundidad de la región en dos meses b) mapas de isolíneas de temperatura de la región c) mapas de isolíneas de conductividad de la región d) mapas de isolíneas de potencial de hidrógeno de la región e) mapas de isolíneas de salinidad de la región

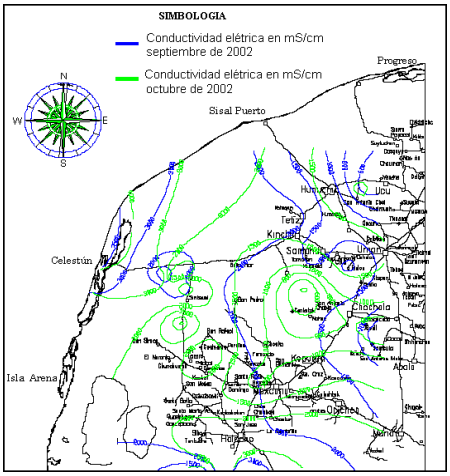
a)



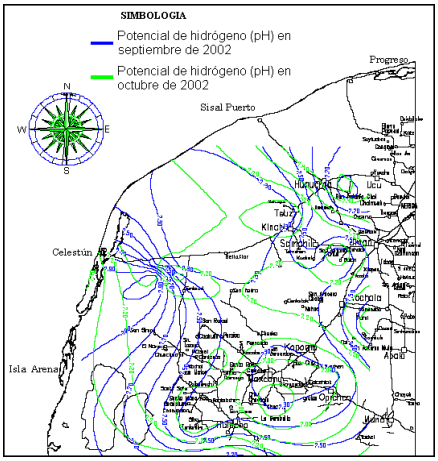
b)



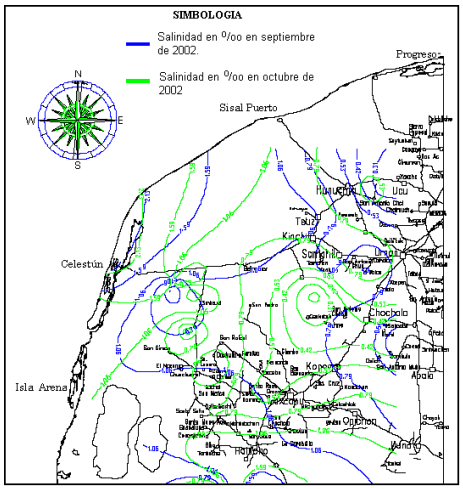
c)



d)



e)



Fuente. CNA. 2002

Con la finalidad de determinar la variación vertical de la conductividad en el acuífero, se perforaron 5 pozos (mencionados anteriormente) de estudio hasta la profundidad de 30 m. Los perfiles de conductividad se realizaron con el pozo en reposo y se realizaron lecturas cada medio metro. Con la información obtenida se elaboraron los gráficos de la profundidad de la medición por debajo del nivel freático, temperatura, conductividad eléctrica, pH, sólidos totales y oxígeno disuelto.

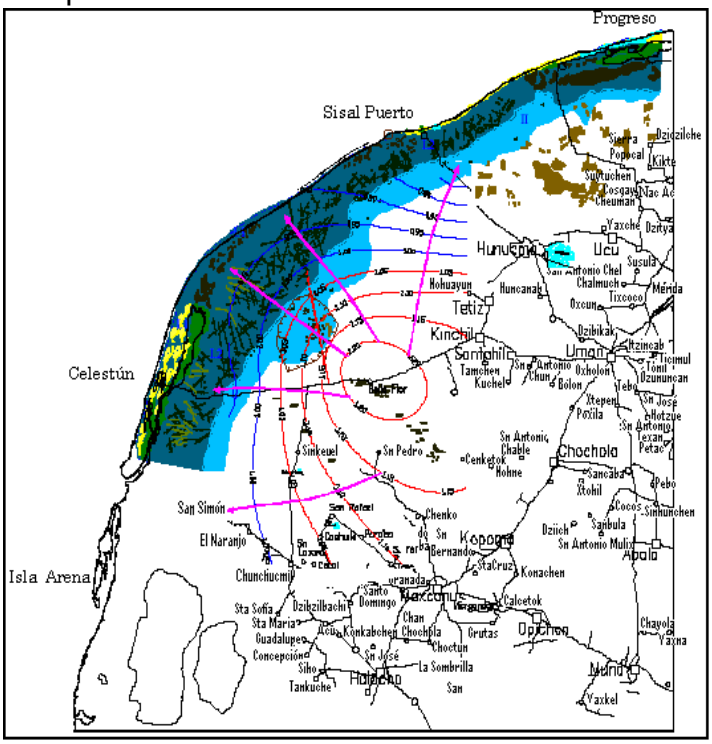
Tabla V.1).- Datos de profundidad del nivel freático en los pozos de monitoreo.

Nombre	Coordenadas		Profundidad N. F. (m)		
	X	Y	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE
P-1	90.25813	20.87685	0.4840	0.3330	0.4950
P-2	90.18862	20.69998	1.7700	1.8270	1.8720
P-3	90.11295	20.90257	2.2790	2.1430	2.2300
P-4	89.99597	20.97406	2.7320	2.8700	2.8750
P-5	90.00391	21.09765	0.1720	0.1920	0.2550

En la zona de estudio se presenta una situación interesante con relación a la descarga de los flujos de agua subterránea en la zona cercana al Anillo de Cenotes. Se observa que en los perfiles de conductividad eléctrica del Pozo No 3, ubicado en la Granja Amaris II, no se presento la interfase salina y poca agua salobre. En este sitio se manifiesta también una elevación importante del nivel estático de ese pozo. Esta situación se podría referir a la hipótesis planteada sobre flujos rápidos que descargan utilizando el anillo de cenotes como un vertedor.

La acumulación de los flujos adyacentes con dirección al cauce podrían ser una justificación a priori para afirmar que la elevación del nivel freático en esa zona podría deberse a la abundancia del volumen de agua subterránea y a la escasa o poca capacidad de contención de los espacios porosos del material rocoso. Aún cuando no deja de ser una especulación lo anteriormente planteado, se sugiere continuar con el monitoreo para confirmar la hipótesis sobre flujos abundantes en poco espacio poroso (ver modelo conceptual del funcionamiento del acuífero.

Figura V.20).- Modelo conceptual del funcionamiento del acuífero



Fuente. CNA. 2002

En condiciones extremas, como el paso del huracán Isidoro, que tuvo una precipitación extrema, se modificó significativamente la dinámica del acuífero al incrementar el nivel freático alrededor de 1.8 metros con respecto a la recarga media anual. Las elevaciones producidas en la zona de influencia costera sufrieron incrementos adicionales provocando la inundación de ciénagas y sabanas e incrementando la velocidad de descarga de los flujos de agua subterránea.

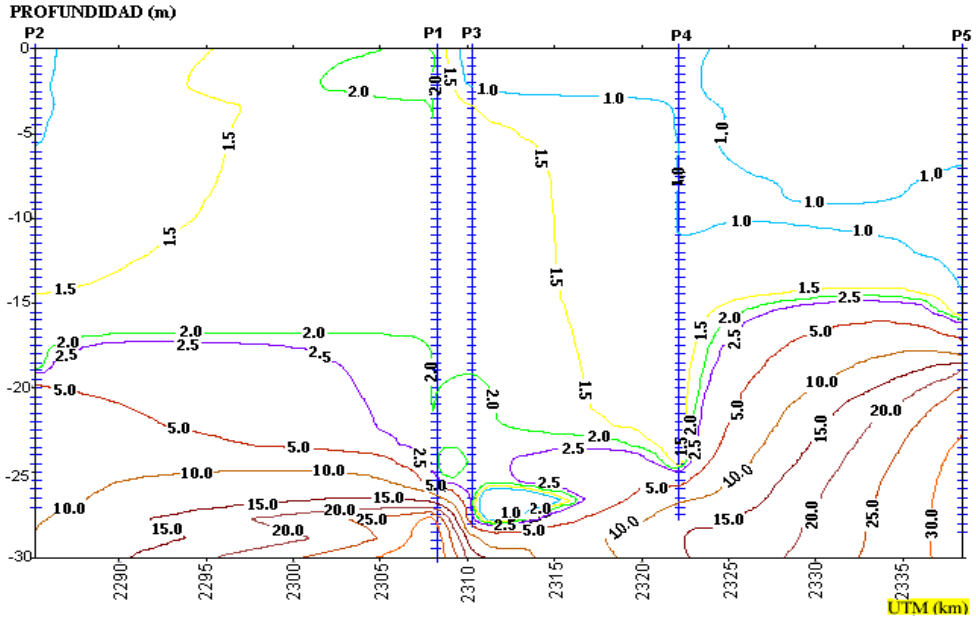
En los pozos de monitoreo se encontró que los potenciales del nivel freático con respecto al nivel medio del mar y su relación con la profundidad a la interfase salina no mantuvieron la relación de Ghyben – Herzberg, posiblemente por la recarga extraordinaria que provocó flujos de descarga rápidos y el lavado de las sales. Se presentan en las Figura V.22, a y b los espesores del lente de agua dulce representada por isolineas de concentración de sólidos totales disueltos de 1.5 g/l.

En ambos cortes hidrogeológicos se observa que la profundidad de la línea de la interfase salina representada por la isolínea de 5.0 g/l, tiene una variación importante y no se encuentra a la misma profundidad. Asimismo, en la región cercana al pozo de monitoreo No. 3 de la Granja Amaris II no se tiene agua salada en el fondo del pozo de 30 metros, lo cual es importante señalar, ya que el nivel freático en ese sitio es ligeramente mayor que los medidos en los otros 4 pozos.

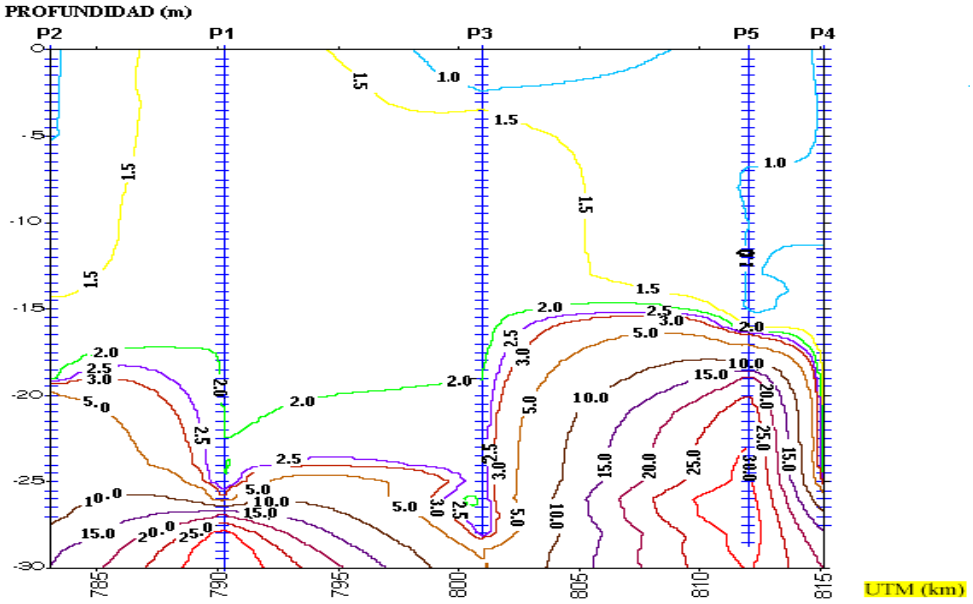
Con esta determinación de las condiciones geohidrológicas se indica el sitio recomendable para la explotación del acuífero (Figura V.23**),** con un espesor óptimo de explotación de 15 metros. Esta zona debe ser considerada como un área de reserva hidráulica, y tomar las medidas necesarias en las actividades que se realizan dentro de ella, esto se ha puesto de manifiesto en el programa de manejo de la Reserva Estatal del Palmar al ser clasificada como zona crítica.

Figura V.22).- A) Corte Sur-Norte y B) Corte Oeste – Este, de la calidad del agua subterránea en los pozos de monitoreo con base a la concentración de sólidos totales disueltos en gramos/litros

A)

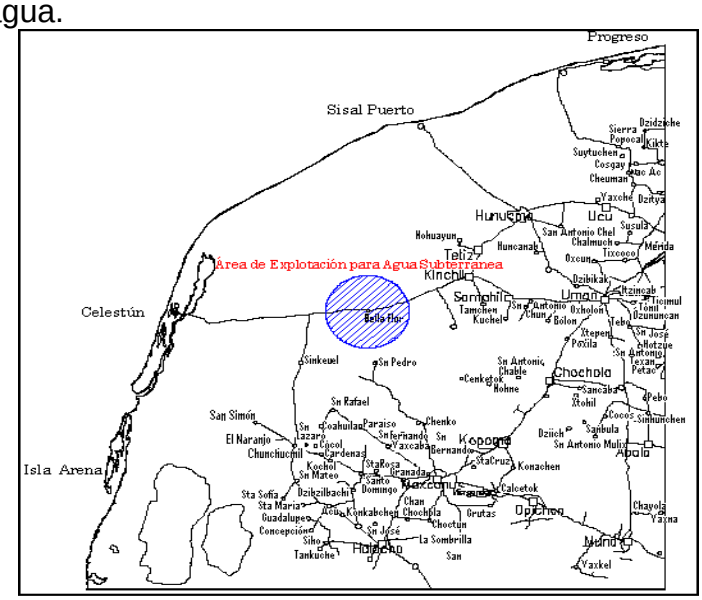


B)



Fuente. CNA. 2002

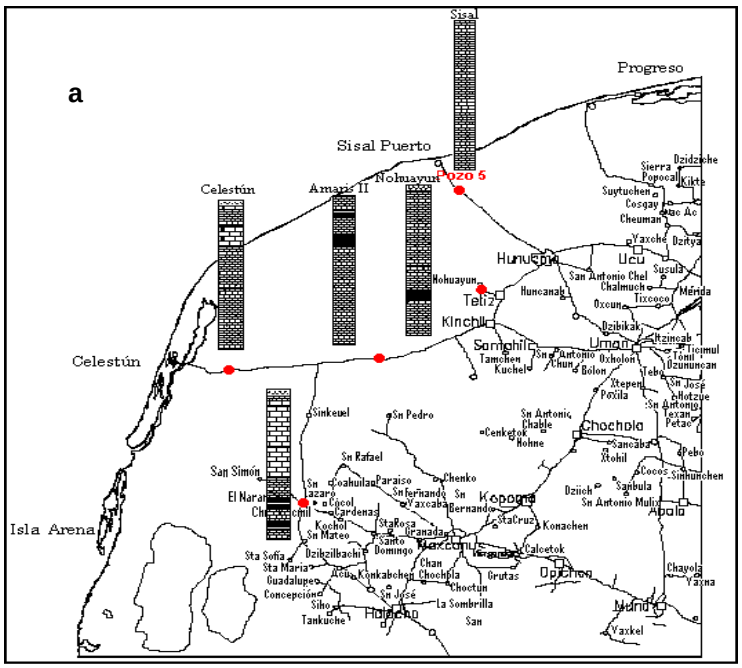
Figura V.23).- Localización del área de extracción de agua subterránea para uso como abastecimiento de agua.

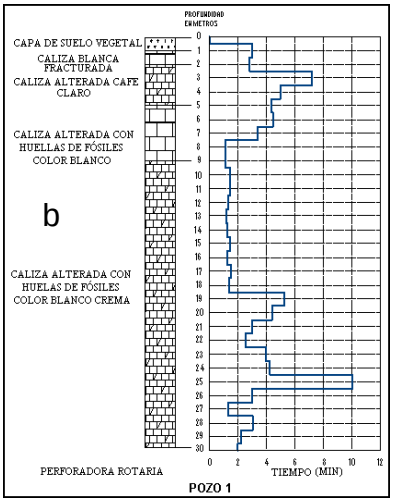


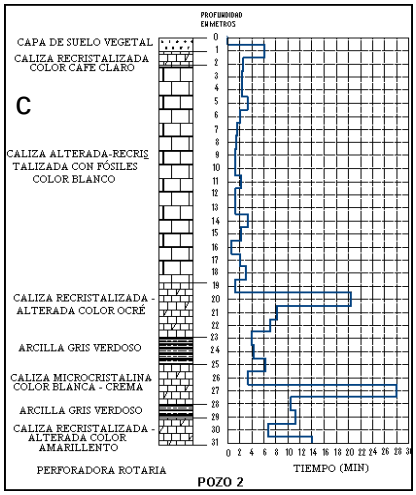
Fuente. CNA. 2002

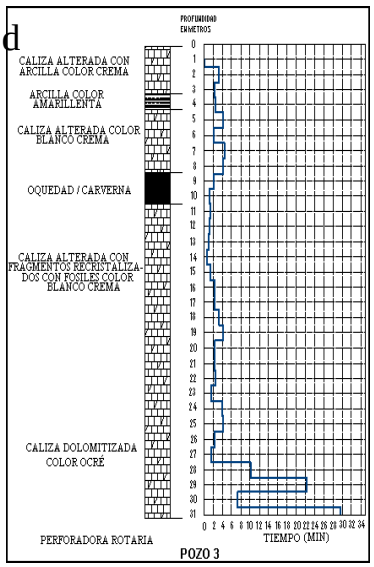
En el año del 2002, la CNA, a través de IAS, SCP, determinó la columna litológica de 5 pozos en la zona antes mencionada, hasta una profundidad de 30 metros. Se dibujó el corte litológico a partir de la clasificación de las muestras obtenidas relacionado con el tiempo de penetración de la barrena con el tipo de material encontrado y clasificado. En la (Figura V.24, a, b, c, d, e, f y g **)** se presentan los cortes litológicos correspondientes. De esta información, se observa que en la región occidental predomina la caliza fracturada con variaciones en el color entre blanca, crema y café claro; sin embargo se presentó una discordancia de facie entre el pozo ubicado en la Hacienda de Chunchucmil (pozo 2), al encontrarse una capa de arcilla entre los 23 y 25 metros de profundidad. En los otros 4 pozos no se presentó este tipo de material a esa profundidad, sino únicamente caliza alterada en sus variaciones cristalina fracturada y cretosa o arcillosa.

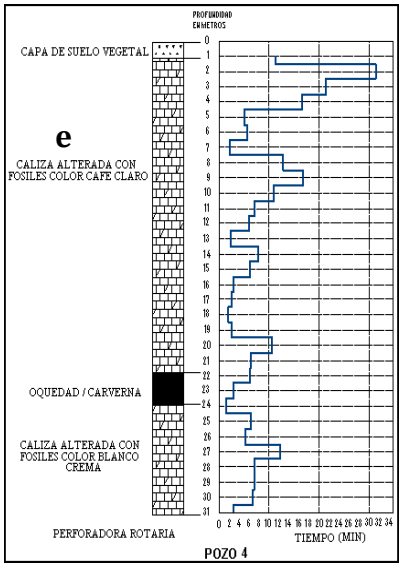
Figura V.24).- a. Localización de los pozos y cortes litológicos b, c, d, e,y f, cortes litológicos de cada pozo

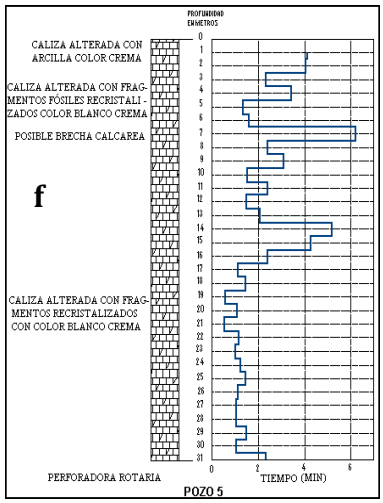










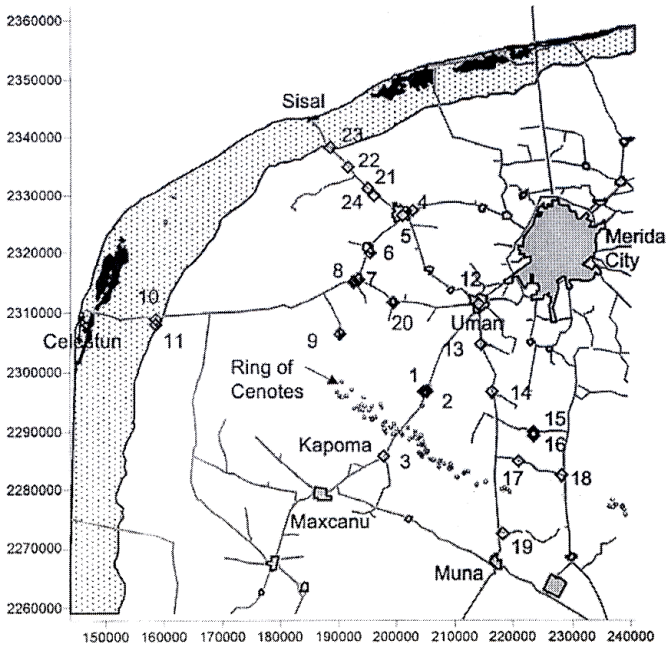


Fuente. CNA. 2002

Por su parte, Escolero et al (2005), realiza un estudio hidrogeoquímico en la porción noroccidental del anillo de cenotes, mediante un censo en el año 2000 de 24 pozos, cenotes o norias, en temporada de secas, y distribuidos en su mayor proporción, en este caso, al interior del anillo de cenotes, complementando información sobre el área de Sisal,

Hunucmá Kinchil y Umán (ver figura siguiente de ubicación). Encontraron que los procesos de disolución de rocas carbonatadas de gran pureza, la mezcla con agua salada y el intercambio iónico en calizas arcillosas están presentes en la zona.

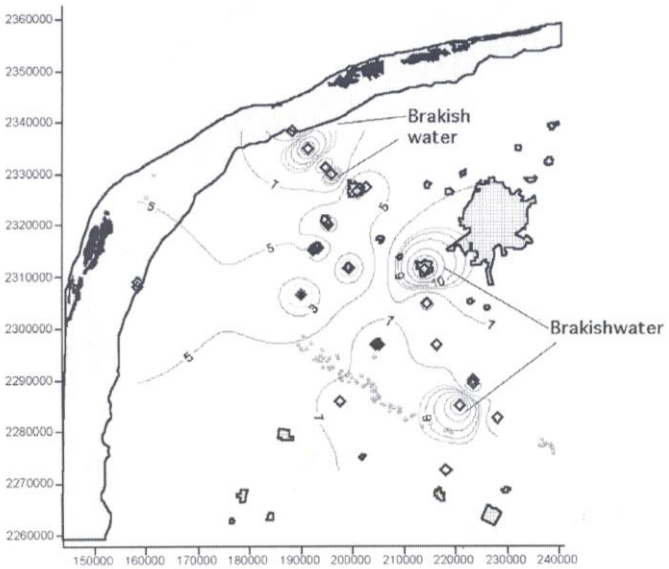
Figura V.25).- Localización de los sitios de muestreo de aguas subterráneas.



Fuente: Escolero et al (2005)

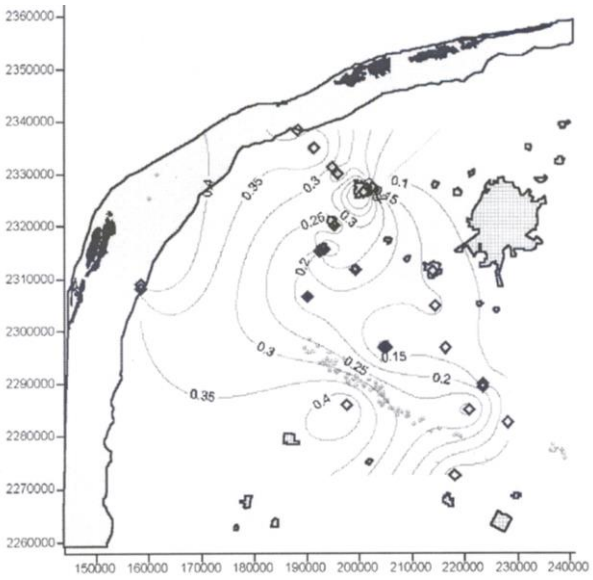
Entre sus resultados menciona que las concentraciones de cloro (meq/l) presentan un desarrollo inesperado, ya que las concentraciones se incrementan, de menos de 1 meq/l en la parte central de la zona de estudio, a mas de 17 meq/l tierra adentro hacia el oriente (40 y 80 km de distancia de la costa), y a 3 meq/l en la zona costera (ver figura siguiente).

Figura V.26).- Distribución espacial de las concetraciones de cloro. Los valores por arriba de 8.5 meq/l, pueden considerarse como aguas salobres.



De igual forma, Escolero et al (2005) nos muestra la configuración de la relación SO4/Cl, la cual indica la mezcla de agua dulce con salada, agrupándose en dos tipos: aguas con una relación sulfato – cloro similar a la del mar y aguas con una relación que corresponde a la influencia de contactos y disolución de evaporitas. Así vemos en la siguiente figura que las muestras correspondientes al primer grupo se ubican al oriente de la zona de estudio, a varios kilómetros tierra adentro, mientras que los valores correspondientes al segundo grupo están ubicados al occidente y al sur de la zona de estudio (ver figura)

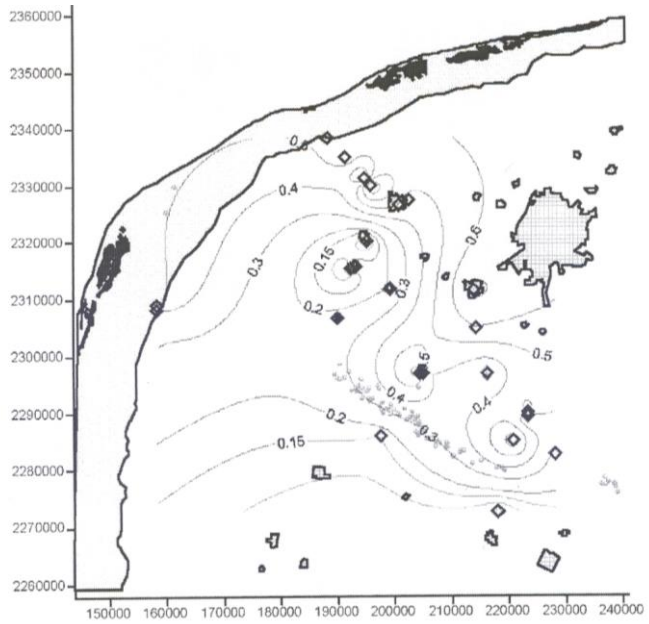
Figura V.27).- Distribución espacial de la relación SO4/Cl.



Por último, en la siguiente figura el autor presenta la distribución del Índice de Saturación de Calcita, y observa que los valores mas bajos se encuentran localizados en la parte central y sur de la zona de estudio, y los valores mas altos se localizan al oriente y norte de la zona de estudio. Destaca como interesante el hecho de que bajos índices de saturación se localicen fuera de la parte interna del anillo de cenotes, excepto al occidente de la zona de estudio, como en el caso de la relación SO4 / Cl. Esto puede deberse al anillo de cenotes, que como menciona Marín (1990), aísla a la porción oriental de la zona de estudio.

Así, combinando estos mapas, el autor define al área central de la zona de estudio como de baja concentración de iones en el agua y lo propone como una reserva hidráulica, ya que en la porción central el agua fluye radialmente, debido al drenaje del anillo de cenotes, el bombeo que se realiza al occidente y a la influencia de la línea de costa noroccidental, el cual corresponde también con el resultado del estudio de caso presentado anteriormente. Concluye entonces que los principales procesos se refieren a la disolución de carbonatos de calcio muy puro, mezcla con agua de mar, intercambio iónico con materiales calcáreos del Eoceno (por la presencia de azufre), así como intrusión salina a grandes distancias de la costa por la sobreexplotación que se hace del acuífero para los usos agropecuarios, así como el uso de fertilizantes y otros agroquímicos.

Figura V.28).- Distribución espacial del Indice de Saturación a la calcita.



Escolero et al (2000) resalta el hecho de la presencia de un área con cabezas hidráulicas elevadas y que forma una divisoria de las aguas subterráneas con un flujo tipo radial. Este desarrollo es causado tanto por el anillo mismo y el flujo subterráneo con dirección norte, hacia el mar y hacia el oeste a través de los campos de pozos que surten a la región metropolitana de Mérida y agrohortícola de Sierra Papacal. Las diferencias de las cabezas hidráulicas entre el centro de este patrón radial y Mérida y Kopomá es del orden de los 23 y 25 cm, respectivamente y se encuentra ubicada entre 35 y 45 km de la costa, en la localidad de Uman, formando una sección transversal entre la costa y Kopomá.

De esta manera, la contaminación que produce la ciudad de Mérida no llega a esta área, por lo que se ha propuesto como una reserva hidráulica (Escolero et al, 2002; Escolero et al, 2005). El área propuesta como reserva hidráulica se extiende por 900 km2 y limita al suroeste con el anillo de cenotes, al sureste con la carretera Uman - Kopomá, al oeste con la carretera Kinchil – Celestún y al noreste con la carretera Hunucmá –Uman.

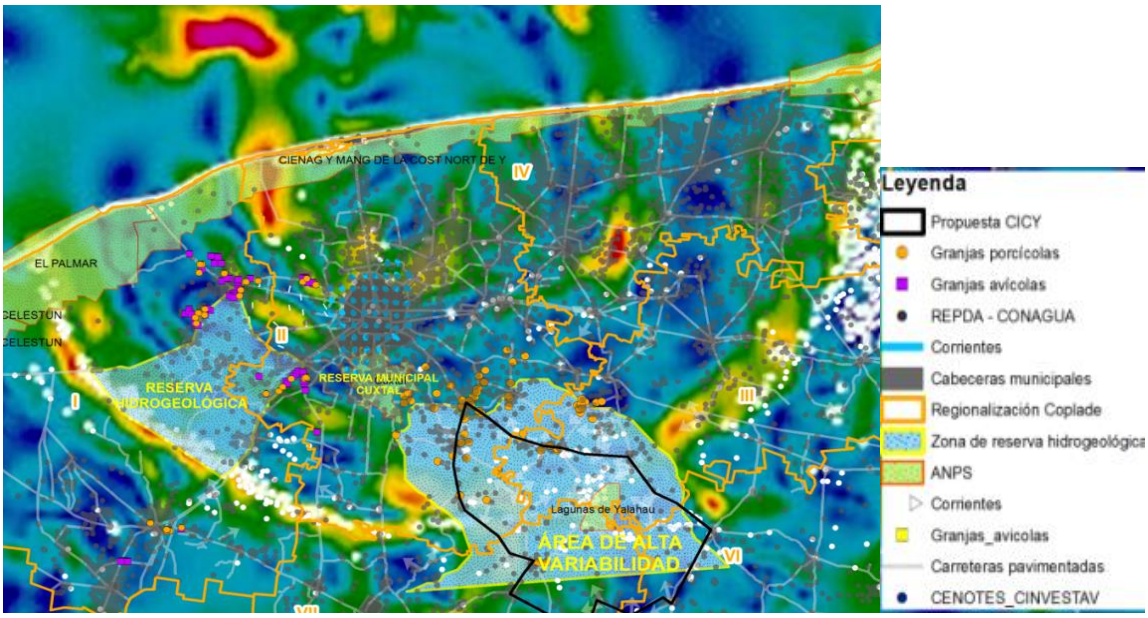
De igual forma, Escolero et al., 2000 y 2005 realizaron mediciones de nivel estático, calidad del agua e hidrogeoquímica; en estos trabajos se muestra que el agua subterránea fluye desde el centro del estado hacia las costas (ver figura siguiente); por lo que se puede decir que la zona de recarga del acuífero se encuentra hacia el Sur del estado y se descarga hacia las costas.

Particularmente, la primera figura sugiere que en la zona cercana a Kopomá y Abalá ocurre una recarga que fluye, según las líneas equipotenciales, hacia Mérida y finalmente hacia las Costas, e indica que existe un flujo subterráneo desde Quintana Roo en donde ocurre la recarga del acuífero, atraviesa la zona del anillo de cenotes que deforma ligeramente el flujo subterráneo; ingresa el agua subterránea a la planicie interior y continua su viaje hacia las costas; particularmente Mérida muestra tener una influencia local en el flujo subterráneo que descarga hacia el Norte (hacia Progreso).

Figura V.29).- Flujo Regional del estado de Yucatán. Fuente: Escolero et al., 2000.

Por su parte, Hernandez, L., (2011), menciona que a partir de un estudio multidisciplinario que cubre aspectos geofísicos, hidroquímicos, hidrológicos, y el uso de bioindicadores y biomarcadores, se propone la creación de una zona de reserva hidrogeológica al sur de la ciudad de Mérida. El área propuesta para la reserva abarcaría los municipios de Cuzamá, Hocabá, Seyé, Acanceh, Xocchel, Huhí, Tekit, Tahmek, Hoctún, Kantunil y Muxupip. El análisis de los datos colectados durante las tres épocas climáticas características de la región, muestran la existencia de una lente de agua dulce de 55 m y un volumen de agua de 108,200,000.00 m3 (Figura V.30)

Figura V.30).- Se muestran las zonas propuestas como reservas hidrológicas definidas por Escolero (2000) Y Hernández, L. (2011).



El acuífero de la zona se caracteriza por tener una calidad de agua de buena a muy buena según los índices biológicos basados en fitoplancton y concentración de clorofila. En general, las concentraciones de nutrientes, y de parámetros físicoquímicos como sulfatos se encuentran dentro de los límites permisibles por la normatividad mexicana, y a los de la Organización Mundial de la Salud.

Las densidades en coliformes fecales, medidos como *Escherichia coli* fueron inferiores a los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad, así como a los criterios ecológicos de calidad de agua, para aguas de uso recreativo con contacto primario (<200 NMP/100 ml). La presencia de compuestos orgánicos es insignificante en comparación con otras zonas del estado y no representan un riesgo a la salud. El acuífero es muy estable y las variaciones en sus parámetros hidrológicos sólo representan la variabilidad estacional.

Menciona también que la zona tiene un potencial de alto desarrollo turístico por el atractivo de varios cenotes, lo que puede representar un riesgo potencial en el corto y mediano plazo. Por tal razón se recomienda comenzar la gestión para decretar la reserva en base a las consideraciones técnicas vertidas en este documento.

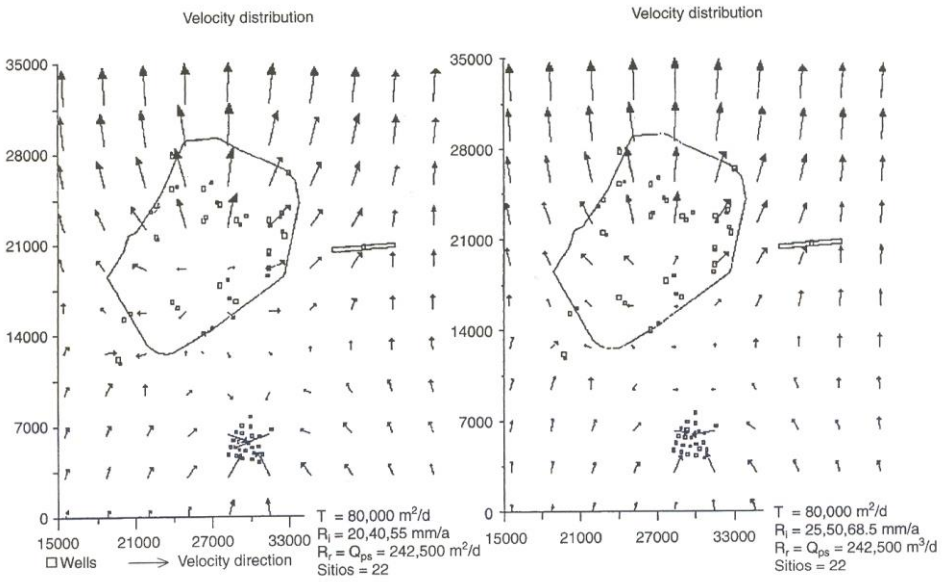
Adicionalmente considera necesario ampliar el estudio a la zona de cenotes comprendida entre Izamal-Tunkas-Cenotillo, ya que el análisis preliminar realizado en la zona (en temporada de secas y lluvias), muestra una calidad de agua de “buena” a “muy buena”, y el estudio hidrográfico mostró una capa de agua dulce de por lo menos 50 m.

Graniel et al (1999) presenta un escrito sobre los efectos de la urbanización en el agua subterránea de la Ciudad de Mérida. Los valores de porosidad primaria varían de 8 a 55 % y las conductividades hidráulicas de la matriz varían también en varios órdenes de magnitud, desde 0.003 m/día hasta más de 30 m/día, según cálculos de diversos autores (Granel et al 1999; Villasuso y Méndez, 2000). La extensa disolución de carbonatos a formado una porosidad secundaria amplia, existen varias cavernas al interior de la ciudad que llegan hasta la tabla de agua.

Sin embargo, estas cavernas no están puestas en un mapa y su ubicación resultaría interesante dada su posible relación con el segundo anillo de cenotes (en este caso el anillo interior que al parecer pasa al occidente de Chuburná Puerto, cruza la zona urbana de la Ciudad de Mérida y sale hacia el oriente de Telchac Puerto).

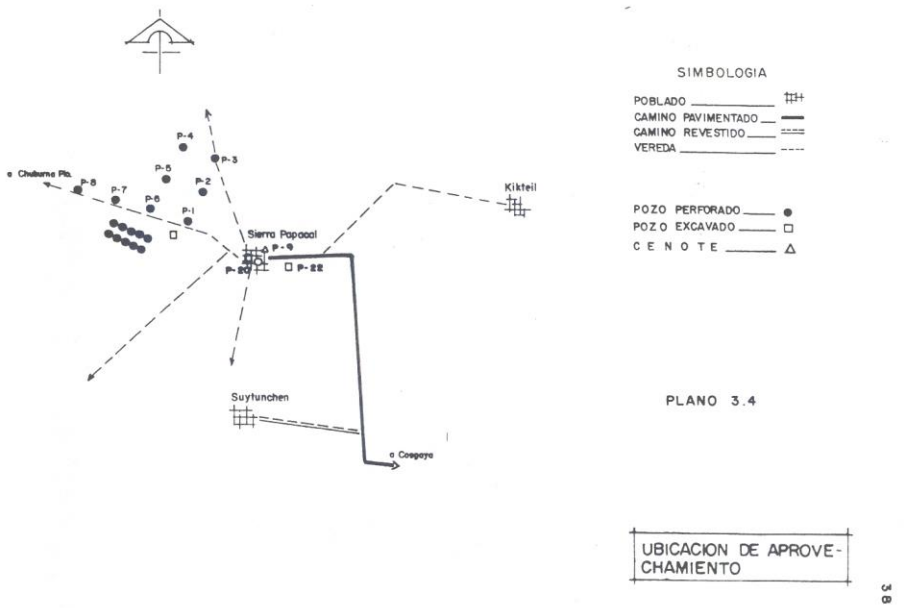
La permeabilidad secundaria desarrollada en esta zona de Mérida es extremadamente alta, se han encontrado valores de conductividad hidráulica por arriba de los 700 m/día (Granel et al 1999). Estos valores tan altos impiden abatimientos de la tabla de agua, aún con los niveles de extracción por bombeo actual, el cual equivale a 370 mm/año, y que es importada a la Ciudad de Mérida de los pozos existentes y que al mismo tiempo representan una recarga adicional para la zona urbana que ha sido impermeabilizada por asfalto e infraestructura.

Figura V.31).- Dirección de flujo subterráneo en la ciudad de Mérida, sin embargo se puede observar que bajo ciertas condiciones es posible reversiones de flujo en la zona de pozos de extracción en la estación de bombeo de Merida I.



Lugo (1994) desarrolla un modelo matemático del comportamiento hidrodinámico del acuífero de Sierra Papacal, cubriendo una superficie de 35 km2. En la porción noroccidental de esta zona se encuentra ubicado el sistema de agua potable que suministra el recurso a las poblaciones de Chuburná y Chelém, que requieren más de 100 litros por segundo para satisfacer sus demandas en temporadas veraniegas. Fuera de esta temporada el abastecimiento es de poco más de 10 lps para el suministro de 160 tomas domiciliarias. En la porción suroccidental de Sierra Papacal se encuentra una unidad agrícola y otras dos hortícolas (que consumen mas de 5000 lps), además de otras captaciones dispersas en el área (ver figura). Se considera que en esta zona de estudio la interfase salina se encuentra a 32 m en el sur y a 19 m en la parte norte.

Figura V.32).- Ubicación de los pozos en el área de Sierra papacal.



En la zona de Sierra Papacal, la extracción de agua para las actividades humanas no fue de consideración hasta antes del año de 1990, a partir de esta fecha y hasta el año 1993 mediante un programa de bombeo, se instalaron infraestructura para fomentar la actividad agrícola, mencionada anteriormente. En las siguientes figuras se muestran los cambios en los valores equipotenciales de las cargas hidráulicas para 1990 a 1993.

Figura V.33).- Cambios en los valores equipotenciales de las cargas hidráulicas.

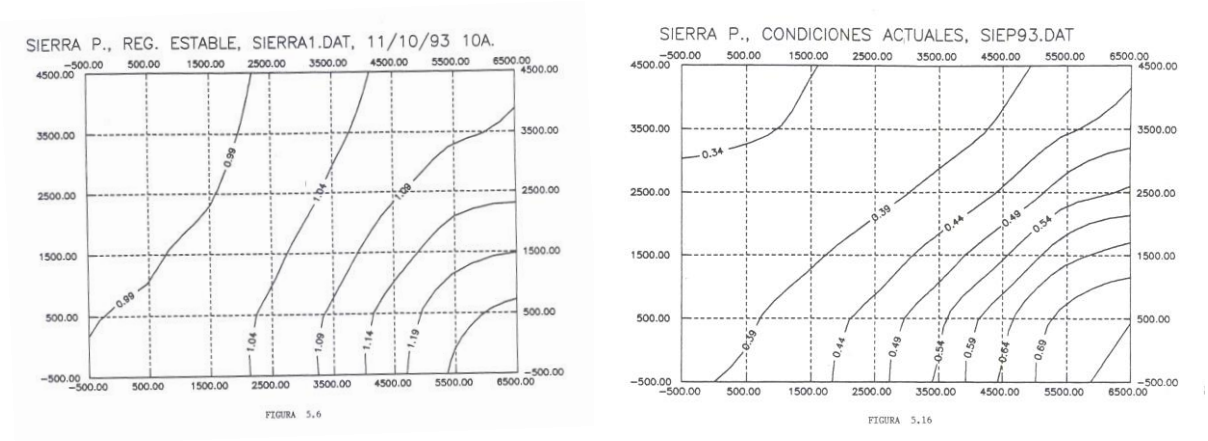


FIGURA 5.6

FIGURA 5.16

Se observa que la extracción abusiva del agua subterránea esta promoviendo abatimientos en los niveles freáticos, incrementando la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación salina. El autor modela predicciones para el año 2001 contemplando incrementos adicionales a la demanda debido al crecimiento agropecuario de la zona. Sus resultados muestran cambios en los equipotenciales muy importantes de las cargas hidráulicas, hasta llegar a abatimientos locales en la parte norte del área de estudio, sobre todo en la temporada de estiaje, ya que trabajan todos los pozos a su máxima capacidad, con resultados negativos en la zona (ver figura V.34). Con lo anterior se concluye que la disponibilidad del acuífero en esa zona es muy limitada, ya que se presenta un espesor de agua dulce muy delgado con un gradiente hidráulico cercano a 0.06 m/km, y los volúmenes extraídos son reemplazados por agua marina.

Figura V.34).- Predicción de los valores equipotenciales ante incrementos en la demanda de agua.

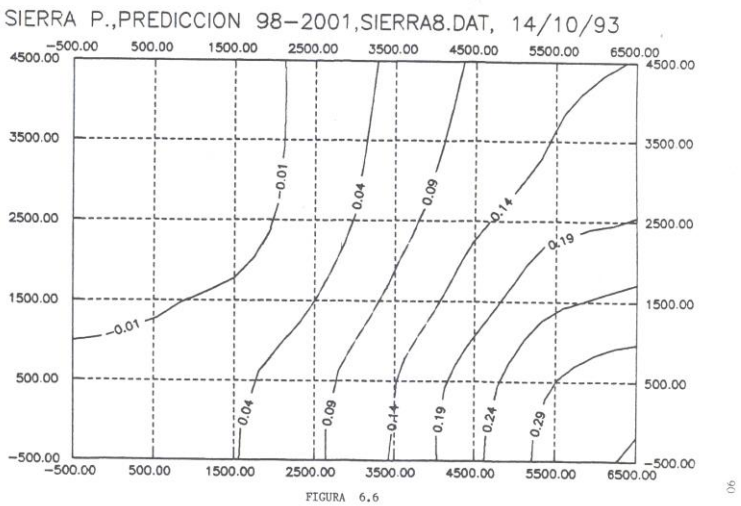
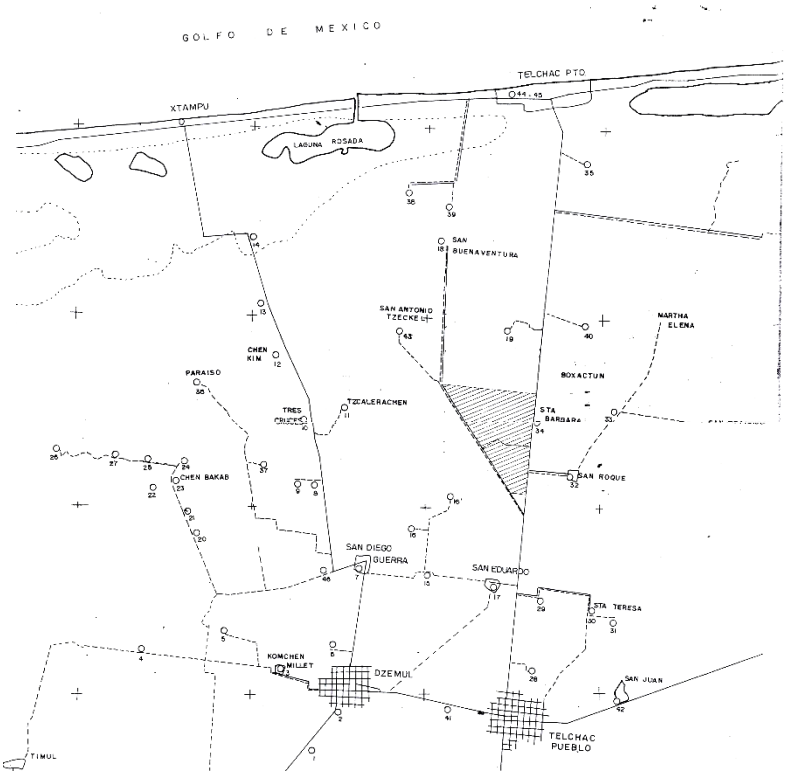


FIGURA 6.6

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (Anónimo, 1988), realizó estudios durante noviembre de 1988, posterior al paso del huracán Gilberto, a marzo de 1989, con el objetivo de determinar el lugar mas adecuado para la perforación de pozos de abastecimiento de agua de buena calidad, para su uso como agua potable, en el área de Telchac Pueblo, Dzemul y Telchac Puerto. Realizó un censo y nivelación de 47 pozos y cenotes entre Xtamphu y la población de Telchac Puerto y entre Telchac Pueblo y Dzemúl, midiendo la conductividad eléctrica del agua así como otros datos hidrogeoquimicos.

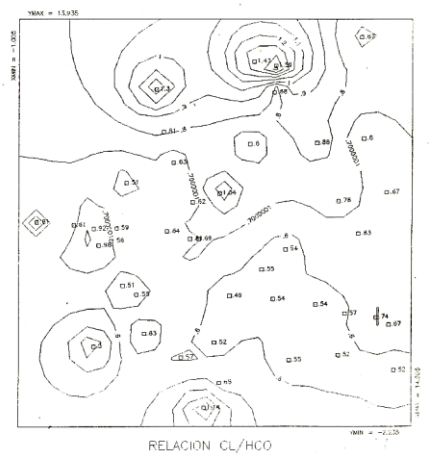
Figura V.35).- Censo y nivelación de pozos y cenotes en el área de Dzemul, Telchac Pueblo y Telchac Puerto.



Este estudio menciona que existe un predominio de la familia cálcica carbonatada de las aguas subterráneas (68 % de las muestras analizadas), lo que indica que el principal mecanismo que controla la química del agua en la zona es la disolución de las rocas calizas que conforman el subsuelo. Por otro lado, las aguas de la familia clorurada – cálcica son las segundas en importancia (con el 18 %) seguida por las clorurada – sódica (7 %).

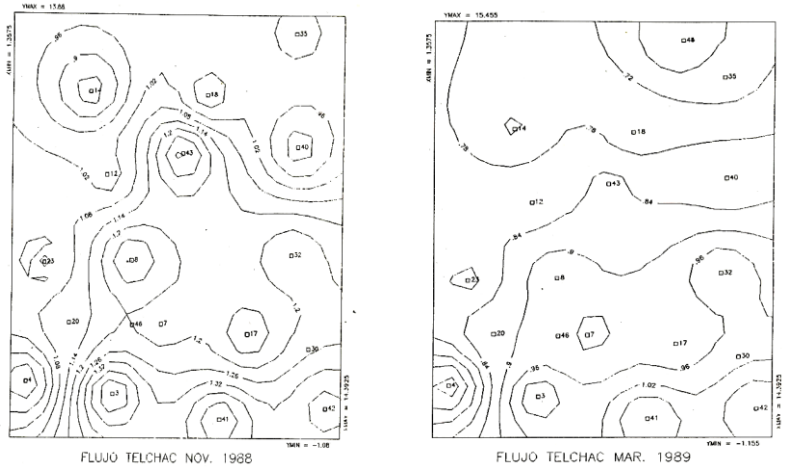
La configuración mostrada en la siguiente figura de la relación Cl / HCO3 muestra un rango de variación que sugiere un origen continental de las aguas analizadas (se marcan también los sitios de muestreo), se puede observar una tendencia creciente en dirección sur – norte, que se interpreta como un avance en el proceso de concentración de sales debido al sentido del flujo subterráneo y/o al efecto de contaminación de sales de origen marino. También reporta altas concentraciones de nitratos (por encima de la norma) en la porción central sur del área de estudio.

Figura V.36).- Relación Cl / HCO3 de las aguas subterráneas en el área de Dzemul, Telchac Puerto y Telchac Pueblo.



En el mismo estudio, se realizaron observaciones de los niveles estáticos de 21 pozos para conocer la evolución del acuífero posterior al huracán Gilberto (noviembre – marzo). Para el mes de noviembre presentó flujos rápidos hacia la costa (Figura siguiente), con potenciales que varían de 0.84 msnm al noroeste a 1.44 msnm al sur, con dirección franca al norte. Para el mes de diciembre la dirección de flujo cambió hacia el noroeste, con una disminución del nivel estático de entre 6 y 12 cm en toda el área. En el mes de marzo, en plena época de estiaje, la reducción de los niveles fue de 30 cm aproximadamente en la porción sur de la zona de estudio aún cuando al norte se nota la influencia de las descargas al mantenerse los niveles con abatimientos de 17 cm en promedio (Figura siguiente).

Figura V.37).- Niveles estáticos de 21 pozos para conocer la evolución del acuífero posterior al huracán Gilberto (noviembre – marzo).



En esta figura la configuración del flujo es mas extendida, lo que recalca el gradiente muy bajo que se tiene en este acuífero cárstico.

El estudio también incluyó 15 sondeos eléctricos verticales (SEV) siguiendo los caminos de Dzemúl – Xtampu y Telchac Puerto – Telchac Pueblo, se establecieron tres transectos paralelos a la costa, mediante el método de resistividades para determinar la interfase salina y por ende el espesor del agua dulce del acuífero.

Se muestran planos de las Secciones Geoeléctricas para Dzemul-Xtampú (Figura siguiente) y resalta el hecho de la caliza saturada de agua salobre se presente a casi 5 km de distancia de la costa al interior, promoviendo un gran blanquizal con fuertes cristalizaciones de sal y manglar con fuertes problemas fisiológicos.

Cabe decir que en la ciénaga de Xtamphu, se tienen registros de 2 manantiales que vierten agua con salinidades un poco menores de los 15 o/oo, el cual es un valor alto para venir del acuífero, sin embargo, recordemos que los estudios goehidrológicos presentados anteriormente para el área mostraban una fuerte disminución del espesor de agua dulce a 5 km de la costa en el área de Xtamphu, por lo que el agua que vierte es fundamentalmente salina.

Una fuente importante para alimentar las charcas salineras. Para el caso de la Sección Geoeléctrica de Telchac Pueblo – Telchac Puerto, este tipo de caliza con agua salobre no se presenta cercano a la costa, por lo que la presencia de una capa de agua dulce de 5 metros de espesor se extiende hacia SanCrisanto, donde abundan los bosques de manglar con gran presencia de surgencias. A 7.5 km de distancia, la lente de agua dulce se incrementa de casi 10 metros en Dzemúl a mas de 30 en Telchac y Sinanché. Lo anterior deja ver la posibilidad de la presencia de flujos preferenciales en el área.

Figura V.38).- Secciones Geoeléctricas para Dzemul-Xtampú. Línea C – C´, que muestra la penetración de cuña marina al norte de la zona de muestreo, promoviendo un gran blanquizal con fuertes cristalizaciones de sal y manglar con fuertes problemas fisiológicos.

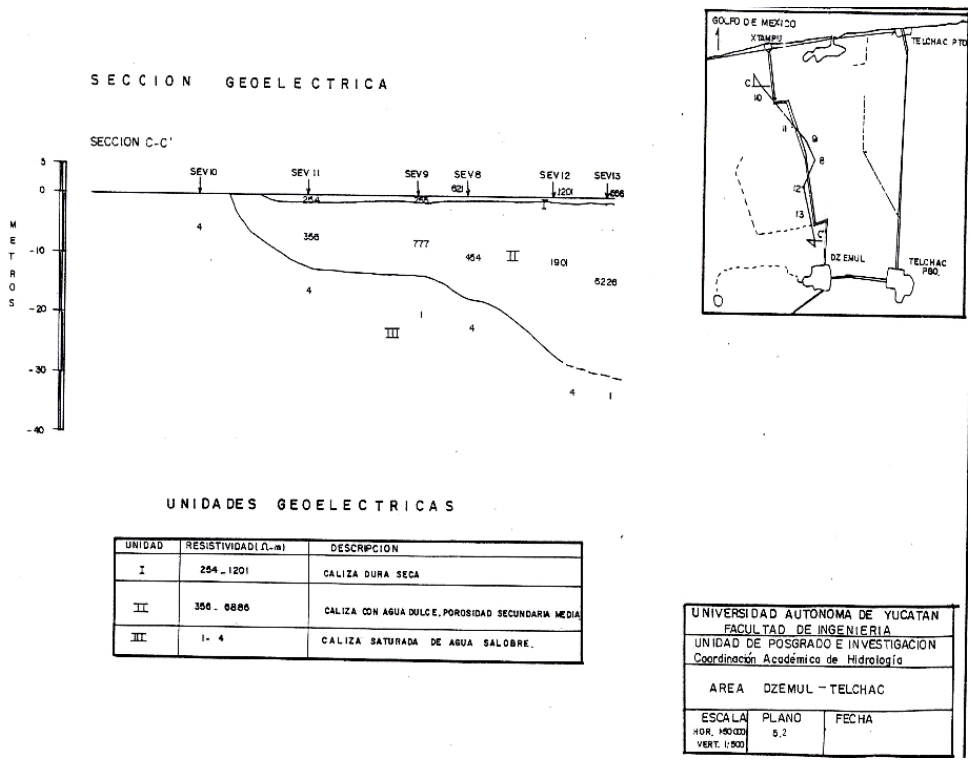
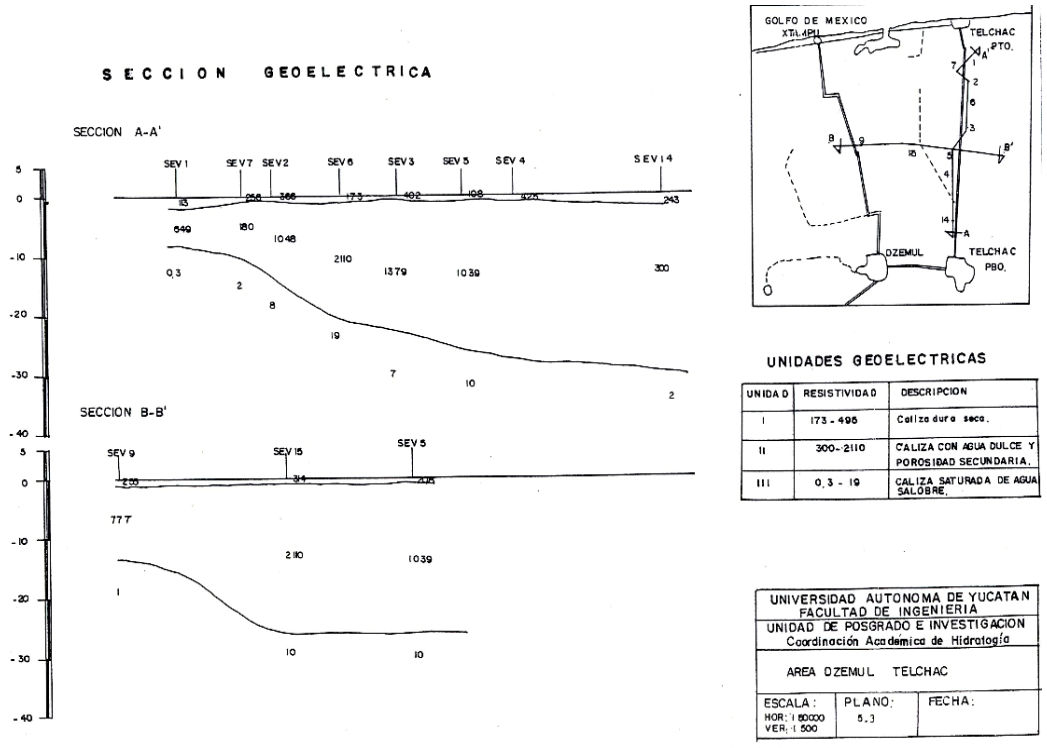


Figura V.39).- Sección Geoeléctrica de Telchac Pueblo – Telchac Puerto. Línea A – A´ muestra un espesor importante de agua dulce cercano a la costa donde abundan los bosques de manglar con gran presencia de surgencias. La línea B – B´Muestra la variación del espesor de agua dulce de oriente a poniente.



De los resultados del estudio geofísico y de la testificación eléctrica en los sondeos mecánicos, fue posible configurar la profundidad a la Interfase Salina en el área (Figura siguiente).

Es interesante mencionar que al occidente (registro 1) se presenta de manera intercalada roca caliza dura y delgada (de un metro de espesor) entre los 7 y 15 m, mientras que en el oriente (registro 2) , las curvas de resistividad revelan la presencia de una capa conductora de 6 m de espesor, desde los 7 hasta los 13 m de profundidad, la cual está asociada a la estratificación de los sólidos totales disueltos en el agua y a la existencia de roca con porosidad secundaria.

La presencia de dos capas de roca dura y fracturada es evidenciada a las profundidades de 14 y 17 m. En la porción central, a partir de los 10 m de profundidad el barreno exploratorio atravesó una secuencia de tres capas de roca caliza dura y delgada, interestratificada con capas conductoras delgadas, localizándose a las profundidades de 11, 13 y 15 m.

Figura V.40=.- Registro eléctrico 1

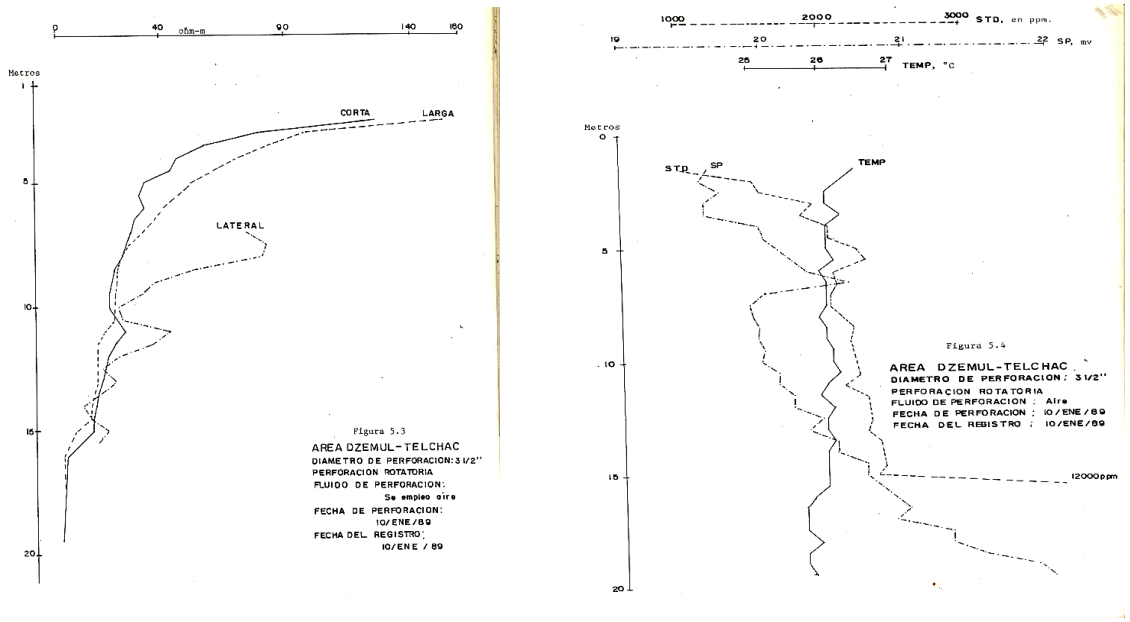
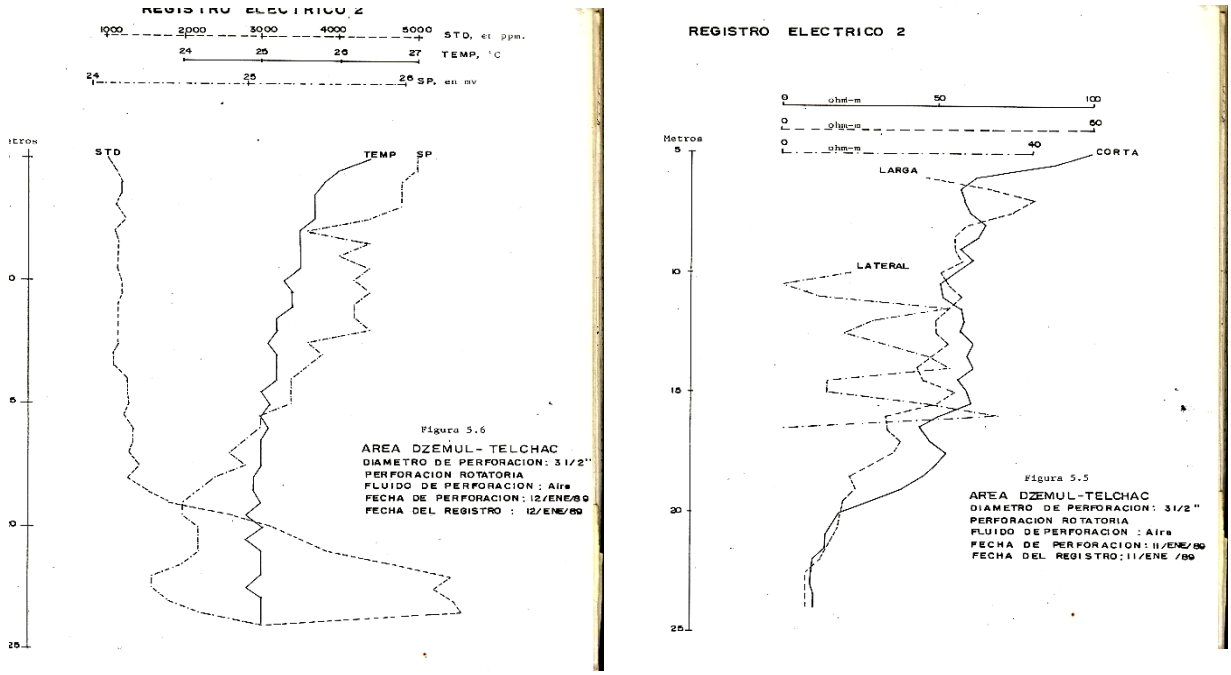
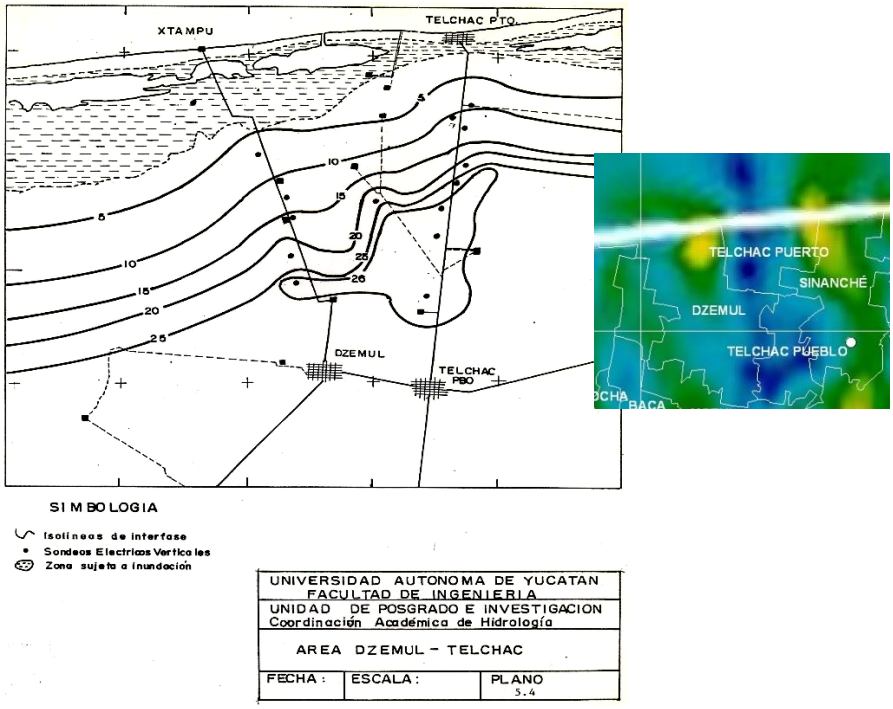


Figura V.41).- Registro eléctrico 2



De esta manera, el autor presenta el modelo conceptual de las profundidades a la interfase salina y, es notorio el gran espesor de agua dulce que se presenta en la porción centro oriental del área, constituyéndose como una reserva hidráulica para la población de Telchac Puerto, Telchac Pueblo y Dzemul.

Figura V.42).- Modelo conceptual de las profundidades a la interfase salina y comparativo con anomalías de Bougier.



Obsevando la figura anterior, es interesante hacer notar la relación probable que existe entre los valores altos de las anomalías de Bougier y los valores de salinidad promedio encontrados en la zona costera. En el área oriental de SanCrisanto se observa condiciones hipersalinas, al igual que en la zona de San Bruno, en Dzemul, mientras que en la zona oriental de Telchac Puerto y SanCrisanto poniente las condicionaes son más salobres.

Gónzalez Hita, L, et al (2003), realiza un estudio cuyo objetivo principal es caracterizar el comportamiento hidráulico de la interfase salina y actualizar la información de la calidad de la lente de agua dulce en las regiones norte-centro (al interior de la zona geohidrológica del anillo de cenotes) y oriente de la zona costera del Estado de Yucatán.

El total de sitios integrantes de la red es de 52 aprovechamientos, divididos en 19 pozos someros a cielo abierto (norias), 19 pozos con ademe y brocal, 12 pozos profundos de observación de la interfase salina, 1 cenote y 1 manantial.

En cada uno de los sitios de explotación seleccionados, se determinaron los parámetros de campo: Temperatura del agua, temperatura ambiente, pH, conductividad eléctrica, salinidad, oxígeno disuelto y profundidad al nivel estático. Los parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio, en las muestras de agua recolectadas en los aprovechamientos integrantes de la red de monitoreo, fueron: Alcalinidad Total, Dureza Total, Sólidos Disueltos Totales (SDT), sodio (Na+), calcio (Ca2+), magnesio (Mg2+), potasio (K+), amonia (NH4 +), nitrato (NO3-), cloruro (Cl-), sulfato (SO42-), bicarbonato (HCO3-) y fosfato (PO4-).

En cuanto a la tempreatura se observa que las zonas cercanas a la costa presentan los mayores valores, debido a que el agua se encuentra a menor profundidad y está expuesta al calentamiento por energía solar. Principalmente la zona ubicada en el centro del área estudiada, que corresponde a la franja comprendida entre Telchac Puerto-Motul y Dzilam de Bravo-Temax. Los mayores valores de pH se presentan en las zonas cercanas a la costa, principalmente al centro del área de estudio.

Figura V.43).- Localización de los aprovechamientos integrantes de la red de monitoreo, utilizada para actualizar la información de la calidad de agua subterránea en la zona costera. En este caso se presenta la zona norte centro.

En la zona centro, también se observa el incremento de los valores a medida que la distancia a la costa se hace más pequeña, debido a la intrusión de la cuña salina en la zona continental. Los mayores valores de amonio se encuentran en la porción central del área del estudio, donde existe mayor actividad agrícola, el agua se encuentra a menor profundidad. En esta zona, el acuífero presenta mayor vulnerabilidad al arrastre de toda materia o sustancia que se encuentre en la superficie.

Cabe mencionar que toda el área presenta valores altos cercanos a los límites permitidos por las normas. El calcio, magnesio, sodio, bicarbonatos, sulfatos y sólidos totales disueltos presentan la misma tendencia en sus configuraciones, los valores más altos se presentan en la porción noreste del área, hacia río Lagartos, indicando así que existen dos zonas de diferentes características químicas.

Figura V.44).- Configuración de la concentración de cloruros en la zona piloto del acuífero costero de la Península de Yucatán.

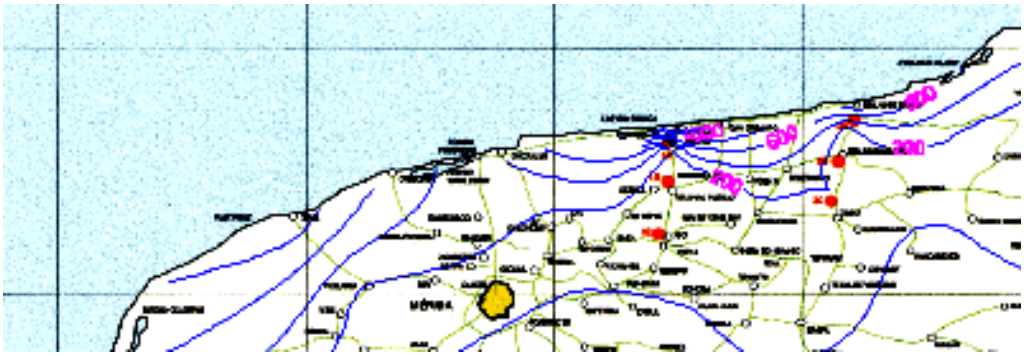


Figura V.45).- Configuración de la concentración de potasio en la zona piloto del acuífero costero de la Península de Yucatán.

Figura V.46).- Configuración de la concentración de sodio en la zona piloto del acuífero costero de la Península de Yucatán.

Figura V.47).- Configuración de la concentración de amonio en la zona piloto del acuífero costero de la Península de Yucatán.

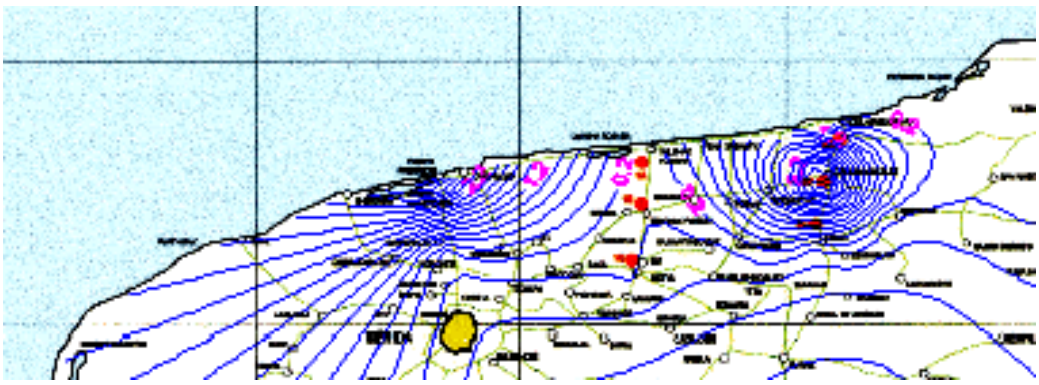


Figura V.48).- Configuración de la concentración de nitrato en la zona piloto del acuífero costero de la Península de Yucatán.

Figura V.49).- Configuración de la concentración de fosfatos en la zona piloto del acuífero costero de la Península de Yucatán.

Figura V.50).- Configuración de la concentración de sulfatos en la zona piloto del acuífero costero de la Península de Yucatán.

Como una conclusión general, se tiene que existen dos zonas de características químicas diferentes, la zona ubicada del centro al oeste y la zona del centro al este. La primera zona recibe su recarga de agua de un sistema intermedio (vinculada al anillo de cenotes), y la segunda zona, de un sistema de característica regional oriental.

Para el año del 2003, y posterior al paso del huracán Isidoro, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (González et al, 2003), realiza un estudio en la zona costera que abarca de Telchac Puerto hasta el Cuyo, en las zonas conocidas como hortícola y Dzonot Carretero. En el se caracteriza la dinámica de la interfase salina y el espesor del agua dulce del acuífero costero de Yucatán.

En la porción hortícola (área de influencia del anillo de cenotes) se perforaron 6 pozos de observación a profundidades de 24 a 50 m. Se establecieron dos transectos perpendiculares a la costa en Telchac Puerto y Dzilám de Bravo, a una distancia de 5, 10 y 15 km de la costa hacia tierra adentro.

Con base a los datos de carga hidráulica obtenidos durante los meses de noviembre y diciembre del 2002 a febrero del 2003, en el transecto de Telchac Puerto paso de un gradiente de 0.135 m/km en noviembre a 0.116 m/km en diciembre, con una disminución de 19 cm en la porción sur (de 2.85 m a 2.66 m) y centro, mientras que en la porción norte se observo un incremento de 9 cm (de 0.82 m a 0.91 m).

Por otro lado, la profundidad a la interfase salina no mostró variaciones importantes en las tres fechas, ubicándose la curva de inflexión a partir de los 15 m hasta encontrar agua marina a 29 m de profundidad en la porción norte del transecto, mientras que en la porción centro, si bien la curva de inflexión se inicia a los 10 m de profundidad, no se registra valores superiores a los 10,000 mS de conductividad eléctrica. A los 15 km de distancia la interfase salina se hace imperceptible aún a los 35 m de profundidad. Cabe mencionar que el Rancho San Eduardo, que en este estudio representa el pozo 1B, es el mismo pozo que fue observado en el estudio de Telcha Pueblo, Dzemul y Telchac Puerto, al sur de donde se encuentra la máxima profundidad de la interfase salina.

Figura V.51).- Dinámica de la interfase salina y el espesor del agua dulce del acuífero costero de Telchac Puerto – Telchac Pueblo.

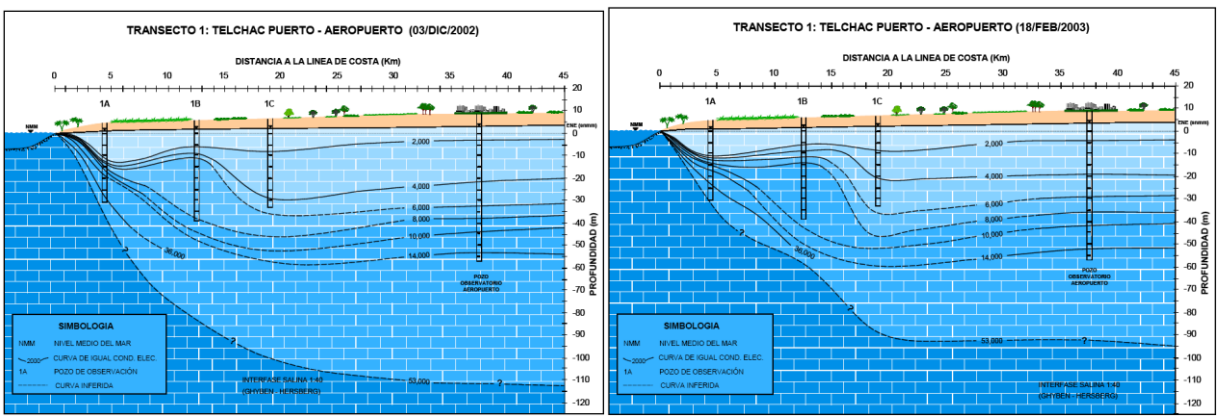
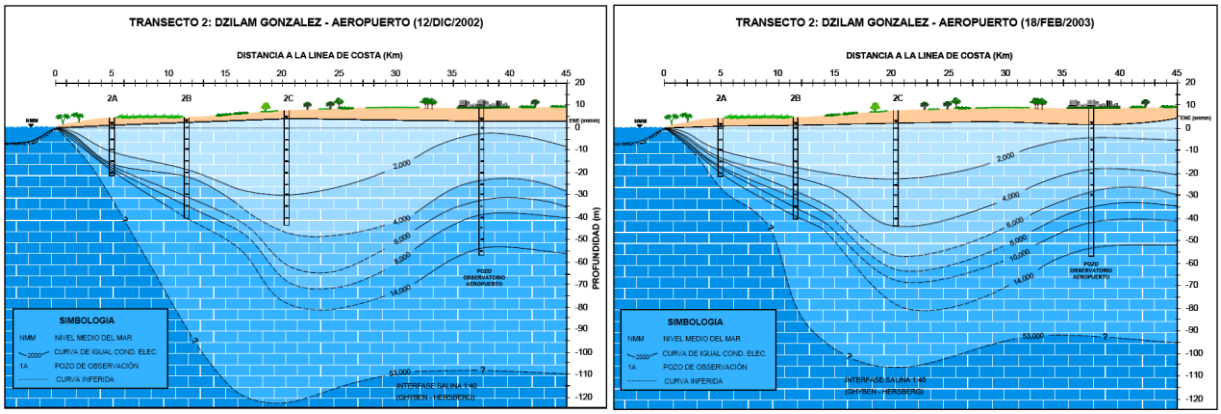


Figura V.52).- Dinámica de la interfase salina y el espesor del agua dulce del acuífero costero de Dzilám de Bravo – Dzilam González.



Como conclusión general, los autores expresan que el acuífero tiene un comportamiento temporal y espacial cuyo régimen hidráulico está sujeto a las condiciones hidrogeológicas y climatológicas que existan en la zona. Por tanto, es fundamental analizar el comportamiento del acuífero en diferentes épocas del año, particularmente en la temporada de secas; ya que, debido al paso del Huracán Isidoro por Yucatán el espesor de agua dulce se incrementó de manera extraordinaria, desplazando la interfase salina o zona de mezcla a mayor profundidad; provocando que el comportamiento hidrogeológico y los valores obtenidos en este estudio correspondan a condiciones no estables o transitorias.

Se recomienda que, para extraer el agua dulce, las obras de captación se distribuyan en un número mayor de pozos con caudales reducidos y profundidades que no rebasen el espesor de agua dulce. La separación entre los pozos debe tener una distancia mínima de 500 metros para no afectar los radios de influencia entre ellos y así evitar la contaminación por intrusión de la cuña de agua salina.

Se recomienda que la extracción de agua en la franja comprendida entre 0 y 10 km de la costa sea de 1 a 2 lps, entre los 10 y 15 km de la línea de costa, de 3 y 5 lps y entre 15 y 20 km de 6 a 15 lps, procurando que los abatimientos que se presenten en los niveles de los pozos sea menor de 0.20 m; ya que, debido a la relación de Ghyben-Herzberg, por cada metro de variación del nivel de agua dulce, se tendría una variación de agua salada de 40 m, entonces resultaría para el caso de Yucatán un ascenso del agua salada de aproximadamente 8 m que incidiría en el espesor y la calidad del agua dulce.

Uno de los problemas que vulneran la calidad del agua subterránea en la zona costera de la península de Yucatán, es la intrusión de agua salina; la cual puede incrementarse debido a la extracción inadecuada del agua dulce que flota en forma de lente, sobre un cuerpo regional de agua salobre de composición similar al agua de mar. Por tanto, es fundamental definir reglas de operación del acuífero costero, que permitan el óptimo aprovechamiento y protección oportuna de los recursos de agua dulce existentes.

El movimiento de ascenso o descenso de agua salada se presenta de acuerdo con el régimen hidráulico y los volúmenes de extracción a que está sometido el acuífero de tipo cárstico. Por ello, resulta importante caracterizar las condiciones hidrogeológicas y climatológicas que prevalecen en la zona litoral, así como, simular el comportamiento del

sistema acuífero bajo diferentes condiciones hidráulicas y escenarios de explotación. Con ello, se podrán definir las variables que gobiernan la intrusión salina y las condiciones óptimas de operación del acuífero costero, sin producir la contaminación por agua salada.

La Zona Hortícola corresponde al área entre Telchac Puerto-Motul y Dzilam de Bravo-Temax, la cual, está compuesta de rocas calizas arenosas con gran cantidad de fragmentos de moluscos y pequeños lentes de arcilla, con carga hidráulica que varía entre uno y dos metros y gradiente hidráulico del orden de 0.11 m/km. Esta zona resulta muy permeable, y tiene la presencia de agua con contenido de sales moderado correspondiendo al tipo de agua cálcica-sódica bicarbonatada, resultante de la mezcla de agua dulce y agua salobre; indicando con ello que hay la influencia de la interfase salina en el acuífero.

La dirección del flujo subterráneo sigue un patrón perpendicular a la línea de costa, resultando así que el movimiento del agua subterránea es de sur a norte, descargando toda el agua del continente hacia el mar.

Los pozos ubicados cerca de la línea de costa están expuestos a la contaminación por materia orgánica y agua salada, debido a la poca profundidad entre la superficie del terreno y el nivel de agua subterránea**,** principalmente en la zona noreste donde existen zonas de inundación sujetas a evaporación intensa que contienen aguas con altos contenidos de sólidos disueltos que se infiltran al acuífero.

En relación a las características hidrogeodinámicas particulares de las llanuras biogénica y litoral de la región noroccidental, por debajo de la isolinea de altitud topográfica de 5 msnm, se observó que, en términos generales, la mayor elevación del nivel freático se registró en pozos y cenotes a 30 Km. de distancia de la costa de Celestún, con un nivel promedio de 1.11 y 1.03 msnm respectivamente. Esta elevación disminuye gradualmente hacia la costa, de tal manera que las menores elevaciones promedio registradas fuéron de 0.41 y 0.45 msnm en pozos y manantiales a una distancia promedio de 2,300 m, con una pendiente general de 0.028 m/km (en la zona de petenes de la RE El Palmar). Temporalmente, las máximas elevaciones del nivel de agua ocurrieron durante septiembre y octubre, con aguas más salobres y de baja temperatura. En contraparte, las mínimas elevaciones se registraron desde el final de la época de nortes y durante la de secas principalmente, con aguas más dulces y las máximas temperaturas entrando a las lluvias. La concentración de sal aumenta conforme disminuye la distancia al mar**.**

En la porción centro – norte del anillo de cenotes, el nivel hidrostático para el mes de abril de 1993 en la región de Sinanché a SanCrisanto va desde los 1.78 msnm (en Sinanché a 14 km de distancia de la costa) hasta 1.11 msnm (a 3.3 km de la costa, extremo norte) existiendo una pendiente aproximada y generalizada de 0.061 m/Km. Para el mes de enero de 1993 el nivel en Sinanché era de 2.60 msnm, siendo muy similar a la temporada anterior a 3.3 km de la costa, por lo que la pendiente para temporada de inundación es de 0.15 m/km.

En el caso de Telchac (Anónimo, 1988), a una distancia de 11 km de la costa y en el mes de noviembre de 1988, el nivel se encontraba a 0.84 al noroeste y de 1.44 msnm al sur lo que da un gradiente de 0.050 m/Km. Para el mes de marzo de 1989 los valores varían de 1.08 msnm a 0.72 msnm, lo que da un gradiente de 0.027 m/km.

En estudios realizados por Marín (1988) en el área de Dzilám Bravo – Dzilám González, se observó que las oscilaciones promedio del nivel hidrostático entre épocas de estiaje y lluvias es del orden de los 0.50 m. Para el mes de abril de 1988 los niveles en Dzilám González fueron de 1.02 msnm y cercanos a la costa fueron de 0.34 msnm, con un gradiente de 0.045 m/km. En el mes de julio de 1988, temporada de lluvias los niveles se encontraban a 1.69 msnm en Dzilám González y de 0.39 msnm, con un gradiente de 0.086 m/km. En el caso extraordinario del huracán Gilberto, los datos de septiembre de 1988 arrojaron valores de 1.83 msnm a 0.99 msnm cercano a la costa con un gradiente de 0.056 m/km. De esta manera el espesor de la lámina de agua dulce subterránea oscila desde los 10 a 15 m en la costa, hasta los 30 - 45 m en los alrededores de las cabeceras municipales, según relación Ghyben-Hersberg, con flujos horizontales preferenciales entre los 10 y 14 metros de profundidad.

En condiciones extremas, como en el caso del huracán "Gilberto", se generaron marejadas con una amplitud mayor de 7 metros, las cuales invadieron aproximadamente 5 kilómetros tierra adentro. Este fenómeno modificó significativamente la dinámica del acuífero a 25 kilómetros de distancia de la línea de costa, principalmente en la región noroeste de la Península, donde un día después del huracán, los niveles freáticos se incrementaron entre 0.64 y 1.1 metros. Las elevaciones producidas en la zona de influencia costera sufrieron incrementos adicionales de 0.50 metros en comparación a otros sitios localizados más al sur de la franja de 25 kilómetros antes mencionada, promoviendo ciertas inversiones de flujos. En condiciones normales de recarga, el nivel de agua en los extremos se incrementa de manera muy similar con diferencias de algunos centímetros, manteniendo el flujo natural hacia el mar (Villasuso y Cols., 1989).

En el año 2008, la empresa Consultores en Agua Potable, Alcantarillado, Geohidrología & Hidráulica Costera, I.C., realizaron un estudio geohidrologico para definir el contacto de la capa de caliche semiconfinante en el área del sur del Puerto de Progreso, Yucatán, temas que ya fueron comentados en la sección sobre Geología en capítulos anteriores. Mencionan que los métodos hidrológicos comprenden varias actividades enfocadas a medir, entre otras características, la conductividad hidráulica del acuífero, la dirección preferencial del agua subterránea, su gradiente hidráulico, la calidad del agua y su interacción con los fenómenos geoquímicos, la potencia y volumen del agua subterránea. Para la conformación de la red de monitoreo piezométrico y de calidad del agua subterránea se seleccionaron puntos de control como barrenos, sondeos y lagunas, bajo el criterio de que la distribución de estos formara un sistema geométrico que permitiera representar las cargas hidráulicas del acuífero. Para el presente estudio se censaron en total 34 puntos de los cuales 15 corresponden a barrenos exploratorios, 10 sondeos cortos, 2 puntos en las lagunas de Mitza, 2 manantiales (La ría y el corchito) y 5 piezómetros a diferentes profundidades instalados en un barreno. Los mapas se presentaron en el Capítulo de Geología. En la siguiente tabla se presentan cada uno de los puntos censados con sus principales características.

La conductividad eléctrica en el área de estudio presenta valores a nivel freático entre 1000 y 7000 µS/cm registrando los valores más altos en los barrenos B-7 y B-8 localizados en el predio de Mitza, mientras que los valores mínimos se encuentran en los barrenos B-6 y PM-037 en la zona de Chicxulub Pueblo. A profundidad el parámetro se mantiene con ligeras variaciones hasta la cota - 6 m en donde el B-1 y B-3 (predio de Mitza) empiezan a incrementarse gradualmente hasta llegar a 8000 µS/cm y 40000 µS/cm a los -11 m y -17 m respectivamente.

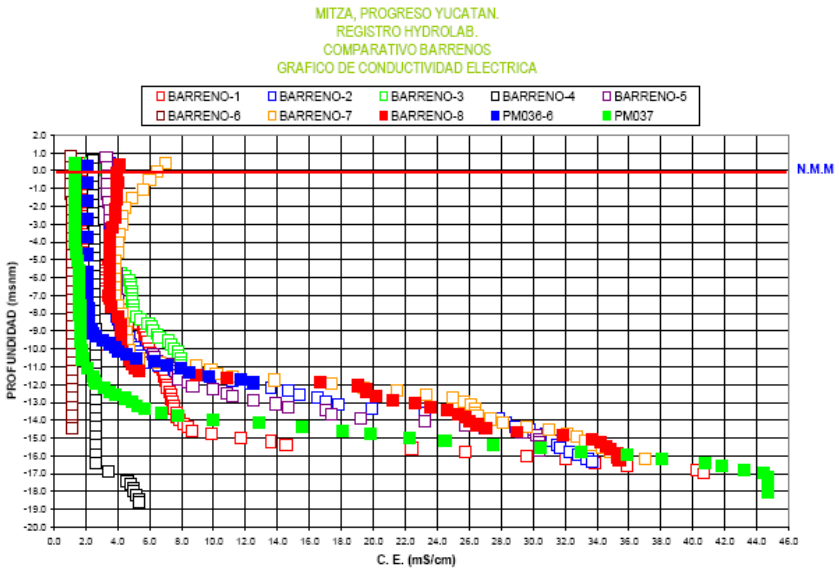
Tabla V.2).- Censo de aprovechamientos hidráulicos en el área del Puerto de Progreso.

MITZA, PROGRESO YUCATAN
TABLA DE DATOS
PIEZOMETRIA 24 DE NOVIEMBRE DE 2008

NOMBRE	COORDENADAS		COTA	NIVEL FREATICO	POTENCIAL HIDRAULICO	PROFUNDIDAD	DIAMETRO	HORA	DISTANCIA A LA COSTA	FECHA
	X	Y	(m)	(m)	(MSNM)	(m)	Pulg		(m)	
EL CORCHITO	225,626.00	2,355,052.00	0.887	0.586	0.301	---	4"	11:50	1065	24-nov-08
LA RIA	222,121.00	2,354,502.00	0.829	0.722	0.107	---	4"	12:25	1065	24-nov-08
PIEZO-1	227,095.30	2,354,737.22	1.11	0.688	0.422	3.00	2"	11:26	1700	24-nov-08
PIEZO-2	227,095.30	2,354,737.22	1.148	0.720	0.428	10.57	2"	11:30	1700	24-nov-08
PIEZO-3	227,095.30	2,354,737.22	1.116	0.980	0.136	20.45	2"	11:28	1700	24-nov-08
PIEZO-4	227,095.30	2,354,737.22	1.128	0.966	0.162	16.53	2"	11:27	1700	24-nov-08
PIEZO-5	227,095.30	2,354,737.22	1.157	0.730	0.427	5.67	2"	11:25	1700	24-nov-08
PM-036-1	228,161.290	2,353,249.150	0.644	0.220	0.424	6.69	6"	11:00	3250	24-nov-08
PM-036-2	228,161.290	2,353,249.150	0.554	0.115	0.439	7.14	6"	11:10	3250	24-nov-08
PM-036-3	228,161.290	2,353,249.150	0.817	0.385	0.432	7.32	6"	11:02	3250	24-nov-08
PM-036-4	228,161.290	2,353,249.150	0.634	0.194	0.440	6.50	6"	11:06	3250	24-nov-08
PM0-36-5	228,161.290	2,353,249.150	0.718	0.280	0.438	6.00	6"	11:05	3250	24-nov-08
PM0-36-6	228,161.290	2,353,249.150	0.869	0.194	0.675	13.00	6"	11:01	3250	24-nov-08
SONDEO-1	223,900.770	2,351,525.239	0.740	0.316	0.424	4.50	6"	13:05	4410	24-nov-08
SONDEO-2	223,993.152	2,351,204.000	0.544	0.101	0.443	4.00	6"	13:10	4700	24-nov-08
SONDEO-3	223,981.694	2,351,008.730	1.180	0.725	0.455	3.77	6"	13:15	4850	24-nov-08
BARRENO 3	223,173.36	2,350,764.21	1.266	0.839	0.427	12.88	6"	13:55	4900	24-nov-08
BARRENO 7	223,543.85	2,350,751.40	0.91	0.475	0.432	17.89	6"	13:58	5300	24-nov-08
BARRENO 8	223,663.66	2,350,726.54	0.81	0.474	0.332	17.26	6"	14:00	5300	24-nov-08
SONDEO-4	224,004.16	2,350,785.64	2.32	1.891	0.431	4.30	6"	13:16	5407	24-nov-08
LAGUNA 1	223,127.52	2,350,473.45	0.790	0.376	0.414	---		13:50	5556	24-nov-08
PM-037	229,479.085	2,351,660.926	2.036	1.568	0.468	21.28	6"	10:45	5920	24-nov-08
BARRENO 2	222,792.26	2,349,632.86	1.709	1.274	0.435	18.05	6"	13:45	6000	24-nov-08
SONDEO-5	223,900.88	2,350,319.49	1.02	0.613	0.411	3.80	6"	13:21	6000	24-nov-08
SONDEO-6	222,697.93	2,349,186.85	1.05	0.607	0.441	4.50	6"	13:40	6694	24-nov-08
LAGUNA 2	223193.468	2349225.309	0.807	0.384	0.423	---		13:35	6700	24-nov-08
BARRENO 1	223,163.23	2,349,079.12	1.860	1.444	0.416	17.3	6"	13:28	6840	24-nov-08
SONDEO-7	224,054.16	2,348,240.99	1.64	1.153	0.483	3.00	6"	14:10	8000	24-nov-08
BARRENO 4	220,980.463	2,347,186.993	1.573	1.041	0.532	20.00	6"	14:55	8100	24-nov-08
SONDEO-8	224,288.61	2,347,550.92	2.35	1.868	0.477	4.90	6"	14:16	8624	24-nov-08
SONDEO-8A	224,301.77	2,347,423.63	2.78	2.287	0.493	4.70	6"	14:20	8773	24-nov-08
SONDEO-9	224,339.94	2,346,692.99	2.71	2.172	0.533	4.60	6"	14:29	9452	24-nov-08
BARRENO 5	219,192.941	2,341,681.215	4.371	3.705	0.666	20.00	6"	15:30	13150	24-nov-08
BARRENO 6	235,793.16	2,343,274.84	4.27	3.504	0.763	18.60	6"	10:15	16409	24-nov-08

Los puntos de monitoreo PM-036-6, PM-037, B-2, B-7 y B-8 inician su incremento entre las cotas -9 m y -11 m hasta alcanzar valores máximos entre 34000 µS/cm y 45000 µS/cm a profundidades entre -16 m y -19 m. Los barrenos B-4 y B-6 no llegaron a la interfase salina del acuífero a pesar de que las mediciones se realizaron hasta -19 m y -15 m. respectivamente (ver figura siguiente). La posición de la interfase salina fue detectada entre los -12 y -16 m, bajo el nivel del mar.

Figura V.53).- Perfiles comparativos de conductividad eléctrica.



Se programó un recorrido piezométrico consistente en la medición del nivel freático en cada unos de los barrenos y sondeos construidos; así como de los puntos de monitoreo ya existentes en el área de estudio; para posteriormente, calcular la elevación del nivel de agua con respecto al nivel medio del mar. La carga o potencial hidráulico del acuífero se

define como la elevación del nivel del agua con respecto al nivel medio del mar. Se calcula restándole a la cota del pozo obtenida en la nivelación (en msnm) la profundidad al nivel del agua (nivel estático). Estos datos se presentan en las columnas 5 y 6 de la tabla anterior. Se midió el potencial hidráulico del acuífero y se observa que los valores fluctuaron entre 40 y 76 centímetros de altura con respecto al nivel medio del mar. Las cargas hidráulicas de mayor magnitud (cercanas a los 0.763 msnm) se registraron en los puntos más alejados de la costa (barreno 5 y 6), mientras los puntos cercanos al mar (sondeo 1 al 7) muestran cargas hidráulicas entre 0.424 y 0.483 msnm (ver figuras siguientes).

Figura V.54).- Red de flujo correspondiente a noviembre de 2008

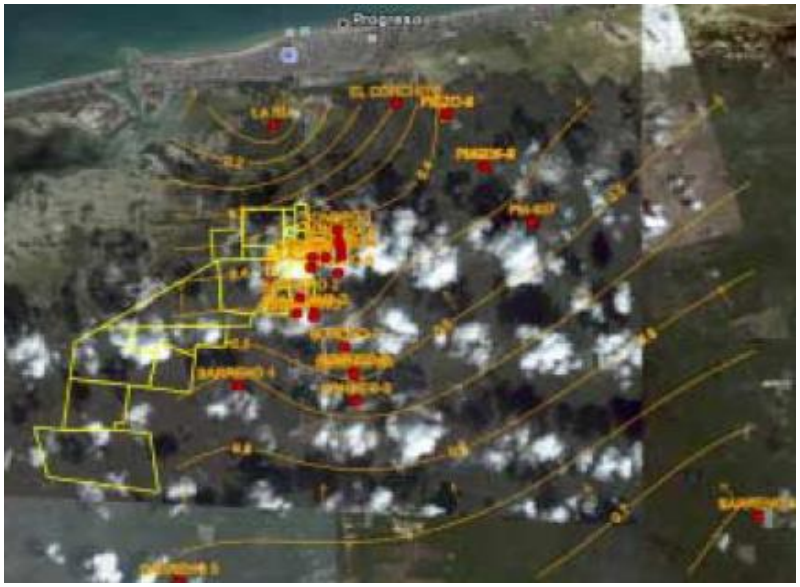
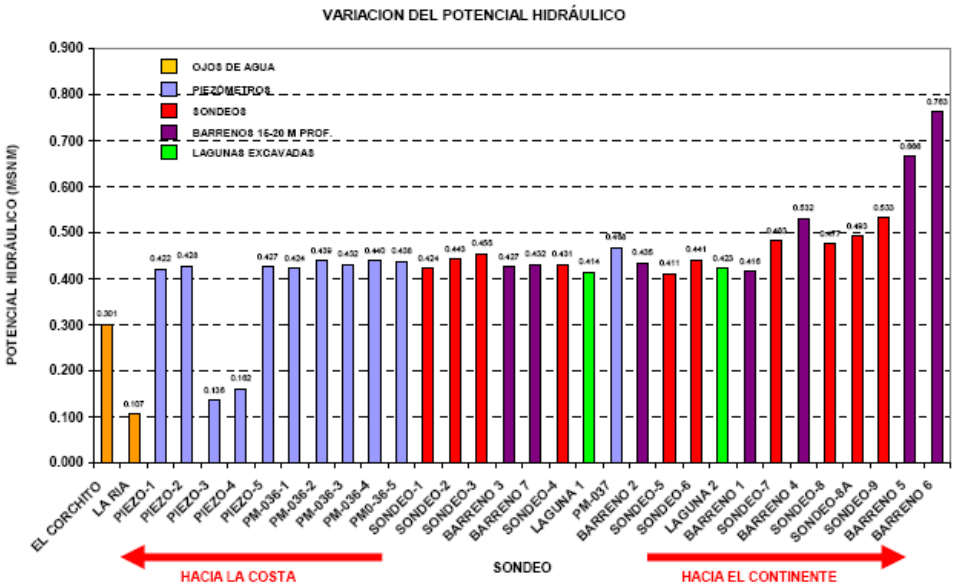


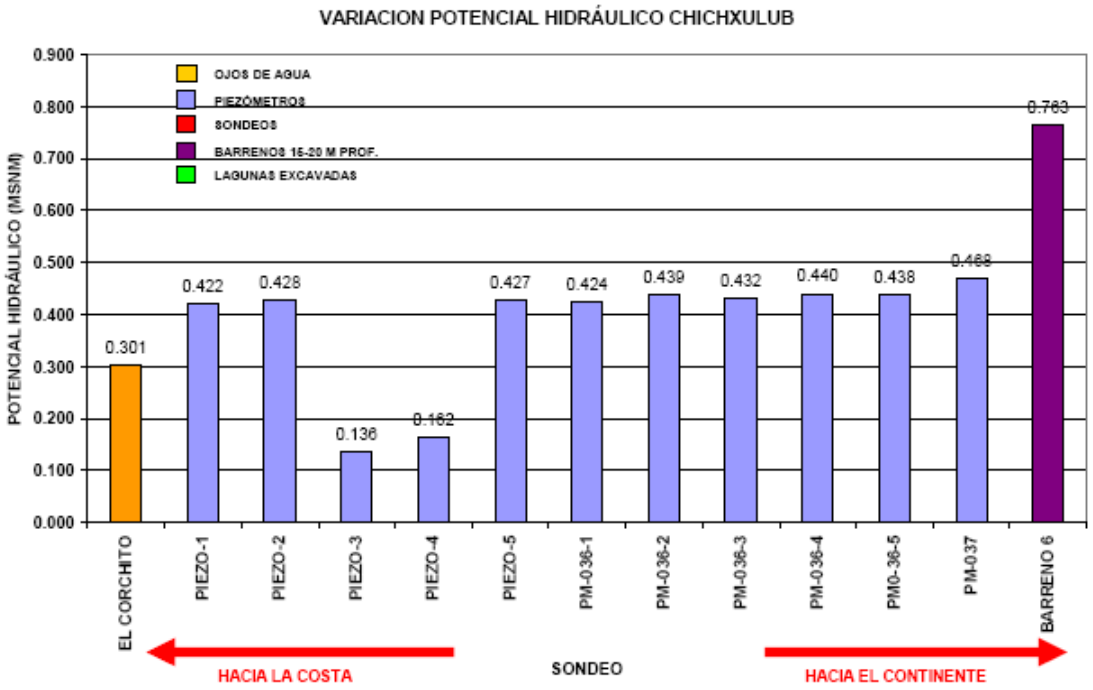
Figura V.55).- Potenciales hidráulicos 24 de Noviembre de 2008.



Tomando como referencia la ubicación de los puntos de la red de monitoreo se construyeron 2 perfiles: el primero que va del predio Mitza hasta Dzizilché y el segundo que va del exbasurero de Progreso hasta Chicxulub Pueblo (ver figuras siguientes). En

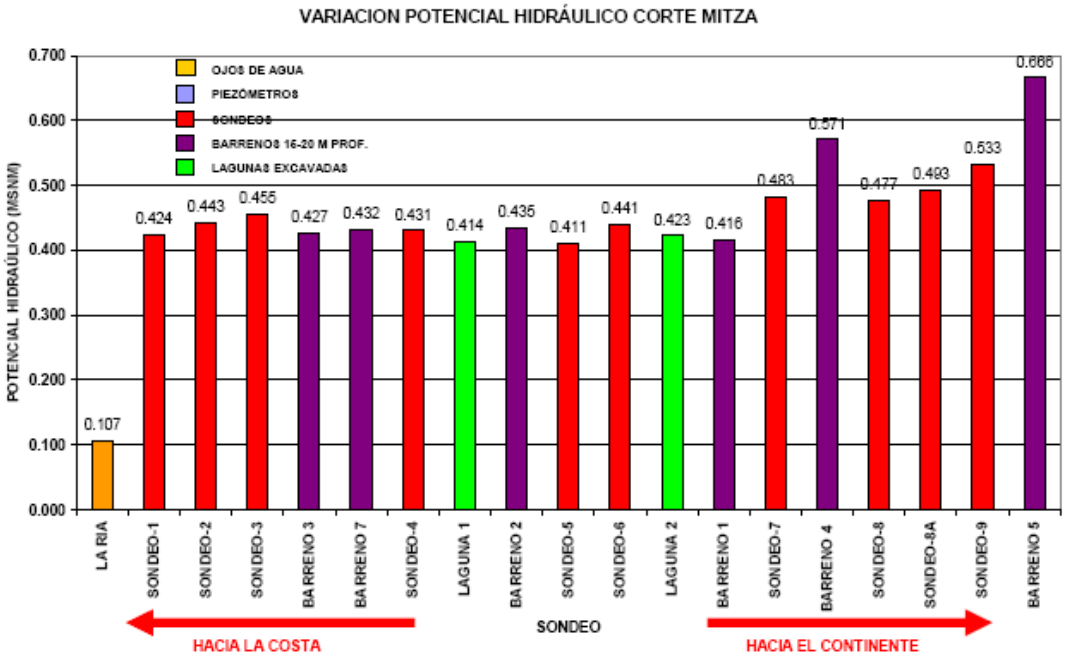
estos dos perfiles se ordenaron los puntos de monitoreo de acuerdo a su distancia a la línea de costa.

Figura V.56).- Perfil de potencial hidráulico Progreso-Chichxulub Pueblo, 24 de Noviembre de 2008.



En el perfil Progreso-Chichxulub los puntos Piezo 1, Piezo 2, Piezo 3, Piezo 4 y piezo 5 corresponden a un multipiezómetro instalado en un pozo de 12 “ de diámetro a 3.00, 10.57, 20.45, 16.53 y 5.67 m de profundidad respectivamente. En el caso de Piezo 1, Piezo 2 y Piezo 5 se encuentran en agua con calidad similar, mientras que Piezo 3 y Piezo 4 se encuentran ubicados en agua salada.

Figura V.57).- Perfil de potencial hidráulico Mitza - Dzizilché, 24 de Noviembre de 2008.



En el perfil Mitza-Progreso se puede observar el barreno 4, tiene un comportamiento atípico con respecto a los demás, sin embargo, este punto está ubicado 3 Km. hacia el oeste de la línea sobre la que se hicieron los sondeos exploratorios para identificar el confinamiento. Esto apoya la hipótesis de que el acuitardo confinante se hace más extenso en relación con la línea de costa hacia la zona oeste del área de estudio.

Las evidencias físicas de las perforaciones y sondeos de la zona, así como el modelo geológico del área de estudio muestran que la frontera entre el acuífero confinado y el acuífero libre se encuentran a 1 Km. del barreno MP-038 con dirección al continente (para el perfil sobre el camino del exbasurero de Progreso) y entre el sondeo 8 y 8-A (para el perfil que va de Mitza a Dzizilché). Al graficar cada perfil tomando como referencia el potencial hidráulico y su distancia a la costa se puede observar que existe un cambio en la pendiente o gradiente hidráulico al cambiar el acuífero de condición libre a confinado; es decir, el gradiente hidráulico es mayor en los puntos monitoreados en el acuífero libre en relación con el acuífero confinado (ver figuras siguientes).

Figura V.58).- Gradiente hidráulico Mitza-Dzizilché, 24 de Noviembre de 2008.

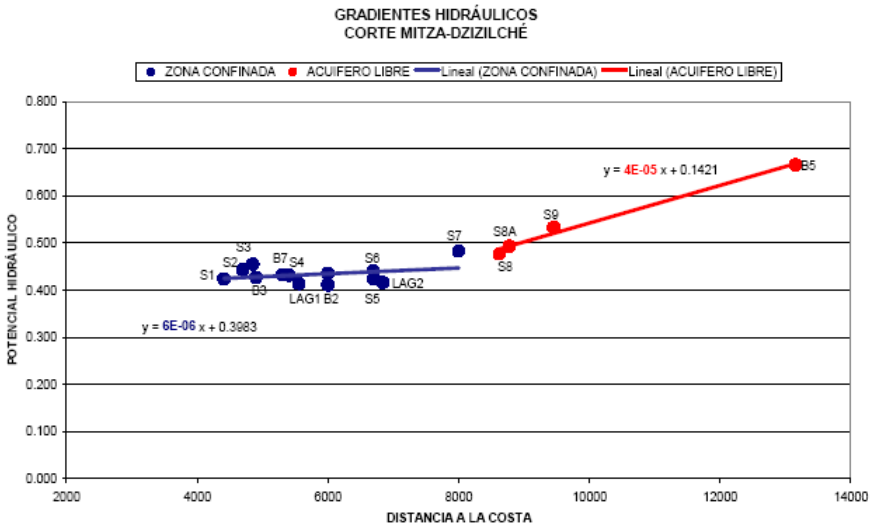
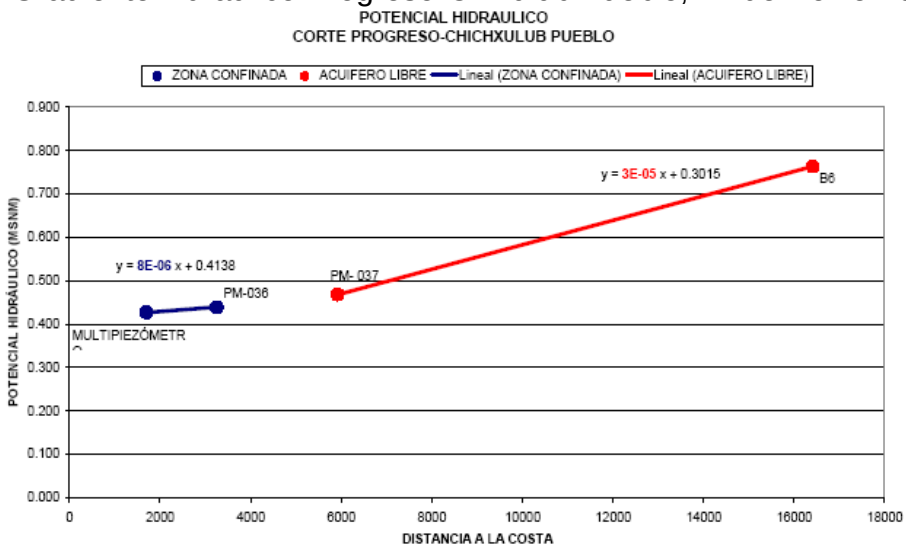


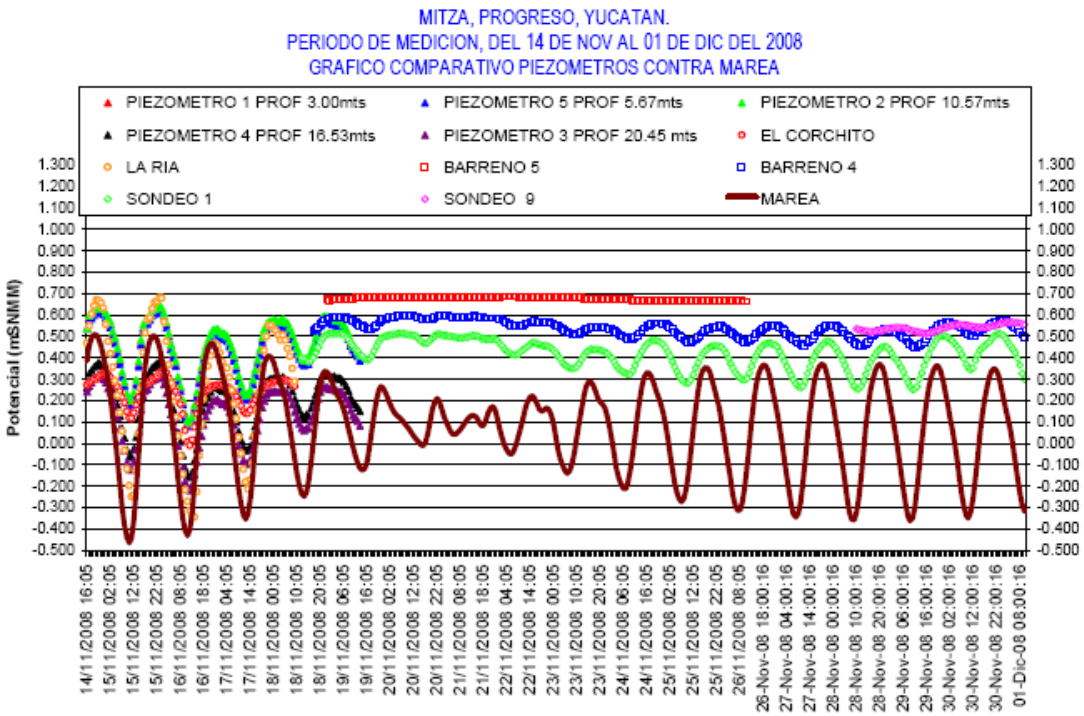
Figura V.59).- Gradiente hidráulico Progreso-Chixulub Pueblo, 24 de Noviembre de 2008.



Se instalaron registradores electrónicos de presión hidrostática en los sondeos 1 y 9, en el multipiezómetro PM-038 y en los barrenos 4 y 5, y en ojos de agua ubicados en el estero

(la ría y el corchito); sitios de medición con los cuales se obtuvieron registros de la variación del nivel del agua subterránea. Estos registros reflejan la influencia que ejerce la marea sobre el nivel piezométrico, y permiten observar los períodos de recarga y descarga del acuífero. El sensor se programó para medir el nivel del agua a intervalos de 10 minutos. En la siguiente figura se observa que el comportamiento del nivel freático de los puntos ubicados en el estero (la ría y el corchito) presentan un comportamiento diferente, ya que en la amplitud de la marea observada en la ría es correspondiente a la marea de Progreso Yucatán con amplitudes de hasta 70 cm, mientras que el corchito registró una amplitud de solamente 35 cm. Los puntos de monitoreo que están a escasos 4 Km. de la costa tienen un comportamiento del potencial hidráulico similar, se observan amplitudes en la variación de hasta 40 cm (multipiezómetro); mientras que conforme se aleja la costa (barreno 4, sondeo 1) la amplitud disminuye gradualmente, hasta desaparecer totalmente (el caso del barreno 5); la variación del nivel freático se midió en los días 19 al 24 de Noviembre de 2008.

Figura V.60).- Variación del potencial hidráulico en puntos de monitoreo del14 de Noviembre a 01 de Diciembre de 2008 con relación a la marea



Se puede observar el diferencial de potencial que tienen los barrenos 5, 4 y sondeo 1 de 10 cm entre cada uno, respectivamente. El barreno 5 muestra una ausencia de influencia de la marea, el barreno 4 muestra una amplitud de 10 cm y se encuentra ubicado a 8 Km. de la costa; por otro lado, el sondeo 1 muestra una amplitud de 20 cm y se encuentra ubicado a 4 Km. de la línea de costa.

Por otro lado, se puede observar la relación que existe entre el oleaje en la zona de estudio y la variación periódica del potencial hidráulico en los barrenos estudiados. Para eso se determino el pronóstico de mareas de Puerto Progreso Yucatán, México utilizando el uso horario -6 del programa MAR V 8.0 del CICESE en el período de medición de los barrenos (ver figura siguiente). Se puede observar que los días del 20 al 22 de Noviembre de 2008 corresponden a mareas muertas y poca actividad que está directamente

relacionada con la poca variación del nivel freático; los siguientes días se observan mareas vivas.

La conductividad hidráulica (m/d) es un parámetro de gran utilidad en la cuantificación del flujo del agua subterránea. Con este valor se estiman los volúmenes de tránsito del agua subterránea en una sección volumétrica dada por la red del flujo del agua subterránea. La técnica aplicada se basa en la simulación del efecto de la marea en el retraso que puede sufrir una onda marina dentro del subsuelo continental la cual al propagarse en el agua subterránea que se encuentra en los poros o espacios vacíos de la roca, debe de ser mas tardado el efecto de la marea al presentar la roca un obstáculo para la misma. La estimación de la conductividad hidráulica se basa en la simulación del efecto de la marea con la curva obtenida en cada sitio y alimentar los valores de la función sinusoidal y aplicar el método Ferris.

Con la información de los registros electrónicos del nivel del agua en los puntos S-1, B-4 y S-9 localizados dentro del predio y también en los multipiezómetros ubicados en el exbasurero de Progreso y el Corchito así, con el registro de la marea, se obtuvo el valor de la conductividad hidráulica del estrato de roca caliza entre 15 y 20 metros de profundidad en el acuífero.

Como consideración importante para el cálculo de la conductividad hidráulica se puede mencionar que al observar los registros electrónicos de nivel de los puntos S-1, B-4 y S-9 se observa una diferencia de amplitud de variación periódica de 20, 10 y 5 cm respectivamente, mientras que en la zona del exbasurero de Progreso se alcanza hasta 30 y 40 cm de amplitud.

Otras consideraciones importantes son el hecho de que hacia la línea de costa la capa el acuífero adquiere características hidráulicas de un acuífero confinado; esto se demuestra debido a que durante las perforaciones se observó que el agua subterránea se encuentra a cierta profundidad, y luego presentaba un ascenso periódico; también se puede mencionar que la base del acuitardo se encuentra por debajo del potencial hidráulico del agua subterránea (aplicable al sondeo 1, barreno 4, multipiezómetro y el corchito). En el caso del sondeo 9 se observó ningún ascenso del agua subterránea y el espesor de caliche es menor y muy por encima del potencial hidráulico; esto sugiere un acuífero libre.

Para alimentar el modelo de Ferris se escogió un período de estudio de 62 horas, lo que equivale al período de 20:00 horas del 28 de Noviembre de 2008 a las 10:00 horas del 01 de Diciembre de 2008. También se determinó la variación de la marea en dicho período utilizando el programa del CICESE MAR V 8.0 (ver figura siguiente). Por otro lado en el caso del corchito y el multipiezómetro se utilizaron datos del 15 al 19 de Noviembre de 2008, también relacionados con la variación de la marea (ver figura siguiente).

Según el cálculo mostrado en la tabla siguiente y las consideraciones anteriormente mencionadas**,** la conductividad hidráulica del acuífero en los puntos S-1, B-4, S-9, mutipiezómetro y el corchito varían entre 21,500 y 1,700 m/d. En el caso de los puntos S-1 y B-4, el almacenamiento es definido por el espesor acuífero analizado (hasta la interfase salina) y valores de almacenamientos específicos (Ss) entre 0.0005 a 0.005 (Freeze y Cherry, 1979) y como resultado conductividades entre 6,700 y 5,400 m/d; esto debido a que se cuenta con evidencia de que el acuífero está confinado o semiconfinado; por otro lado, el corchito y el multipiezómetro se observaron conductividades hidráulicas de 1,700 y 6,200 m/d, respectivamente; mismos que son menores en magnitud con

respecto al Oeste de la zona de estudio, a pesar de haber utilizado los mismos valores de almacenamiento y asumir confinamiento.

El punto S-9 muestra evidencias físicas de estar en un acuífero libre, por lo tanto el almacenamiento está directamente relacionado con la porosidad efectiva del medio analizado, para calizas cársticas y calizas arenosas (Sascab) se muestran valores entre 0.20 y 0.30 que dieron como resultado una K de 21,500 m/d.

Figura V.61).- Período de estudio para el cálculo de la conductividad hidráulica, Mitza-Dzizilché.

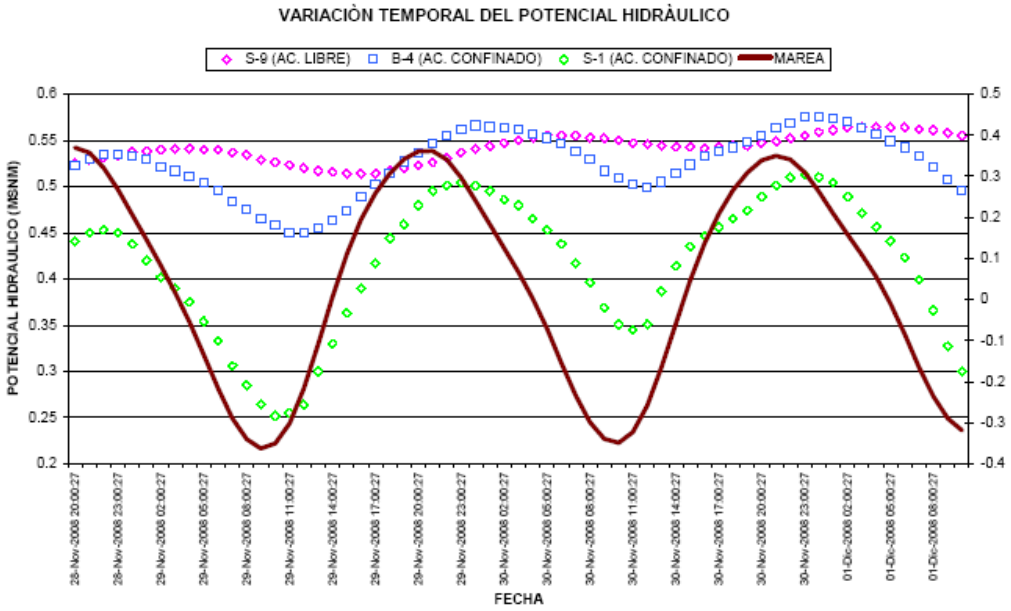
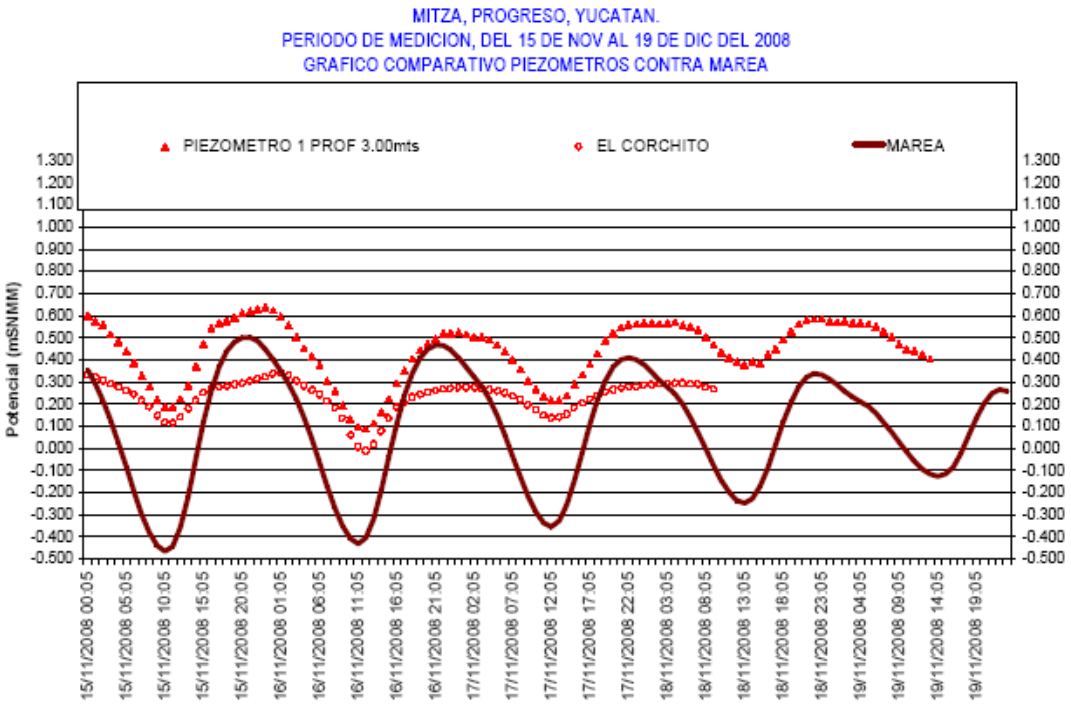


Figura V.61).- Período de estudio para el cálculo de la conductividad hidráulica, Progreso-Chichxulub Pueblo.



El cálculo del volumen de flujo del agua subterránea se llevó a cabo mediante la aplicación de una técnica de cuantificación que utiliza la configuración de la red de flujo y el valor de la conductividad hidráulica medidos. La estimación del flujo subterráneo fue realizada para la porción acuífera de agua dulce-salobre por debajo del predio en estudio. Para el cálculo del volumen de agua subterránea que circula en el acuífero se empleó la técnica de redes de flujo, la cual tiene sus fundamentos en la ley de D'arcy, que establece que el caudal que fluye por una sección transversal de acuífero es directamente proporcional al gradiente de pérdidas de carga, en la que la constante de proporcionalidad se refiere a la conductividad hidráulica del sistema.

.

Ecuación de D'arcy:

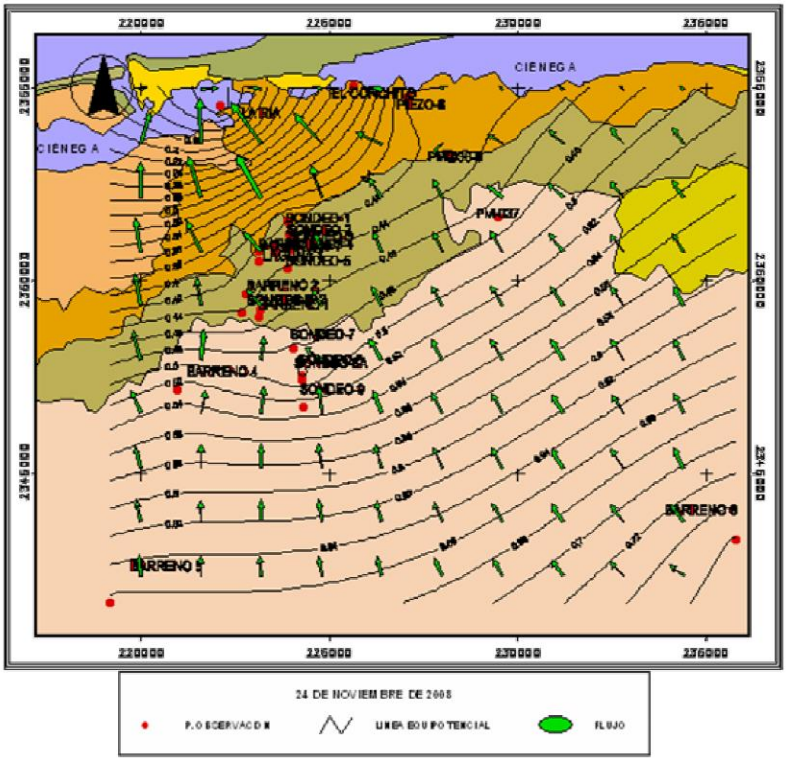
Q = AKdH/dl;

donde:

Q = es el volumen de agua subterránea que atraviesa una sección transversal de acuífero, en m3/día
A = sección transversal del acuífero equivalente al espesor del acuífero por unidad de ancho, en m2
K = conductividad hidráulica, en m/d
dH/dl = gradiente hidráulico

Una red de flujo está constituida por dos conjuntos de curvas o planos; una de ellas representa a las curvas de igual carga hidráulica y la otra, la trayectoria del flujo subterráneo o líneas de corriente. Según las ecuaciones de Gauchi-Riemman, estas curvas se cortan ortogonalmente.

Figura V.62).- Red de flujo del día 24 de Noviembre de 2008.



Para la zona de estudio se utilizó el recorrido piezométrico del día 24 de Noviembre de 2008; la red de flujo muestra que el flujo del agua subterránea es perpendicular con la línea de costa, con dirección S-N con una ligera inclinación hacia el Oeste (ver figura siguiente).

Tabla V.3).- Valores representativos de conductividad hidráulica, Eficiencias y almacenamientos de los puntos S-1, B-4, S-9, Multipiezómetro y El Corchito.

Sitio	x (m)	Eficiencia (%)	NOM	S	K (m/d)	Kprom (m/d)
S-9	9452	2	K1	0.2	16,000	16,000
				0.3	27,000	27,000
				0.4	32,000	32,000
				0.5	40,000	
				0.6	48,000	
				0.7	56,000	
				0.8	64,000	
				0.9	72,000	
				1	80,000	
B-4	8100	6.2	K2	0.0005	670	670.00
				0.005	6,700	6,700.00
				0.05	67,000	67,000
				0.2	214,400	214,400
				0.3	321,600	321,600
				0.4	428,800	
				0.5	536,000	
				0.6	643,200	
				0.7	750,400	
				0.8	857,600	
				0.9	964,800	
				1	1,072,000	
S-1	4410	15	K3	0.0005	540	540.00
				0.005	5,400	5,400.00
				0.05	54,000	54,000
				0.2	108,000	108,000
				0.3	162,000	162,000
				0.4	216,000	
				0.5	270,000	
				0.6	324,000	
				0.7	378,000	
				0.8	432,000	
				0.9	486,000	
				1	540,000	
MULTIPIEZOMETRO	1700	20	K4	0.0005	170	170.00
				0.005	1,700	1,700.00
				0.05	17,000	17,000
				0.2	22,667	22,667
				0.3	34,000	34,000
				0.4	45,333	
				0.5	56,667	
				0.6	68,000	
				0.7	79,333	
				0.8	90,667	
				0.9	102,000	
				1	113,333	
EL CORCHITO	1605	18	K5	0.0005	62	62.00
				0.005	620	620.00
				0.05	6,200	6,200
				0.2	8,133	8,133
				0.3	12,200	12,200
				0.4	16,267	
				0.5	20,333	
				0.6	24,400	
				0.7	28,467	
				0.8	32,533	
				0.9	36,600	
				1	40,667	

Se cuenta con evidencia física e hidráulica de que el Sondeo 9 es un acuífero libre compuesto por calizas arenosa (Sascab). Para estos casos en específico se sugieren almacenamientos S relacionados con la porosidad efectiva del material, aproximadamente entre 0.2 y 0.3.

D = 1,600,000 m2/día
K1 21,500.00 M/D

D = 26,800,000 m2/día
K2 6,700.00 M/D

Los sondeos barreno 4, MULTIPIEZÓMETRO y sondeo 1 se encuentran en un acuífero confinado por un espesor de caliza compacta; por lo tanto, se utilizaran valores de almacenamiento S de 0.005 y 0.05.

D = 16,200,000 m2/día
K3 5,400.00 M/D

D = 3,400,000 m2/día
K4 1,700.00 M/D

D = 1,220,000 m2/día
K5 6,200.00 M/D

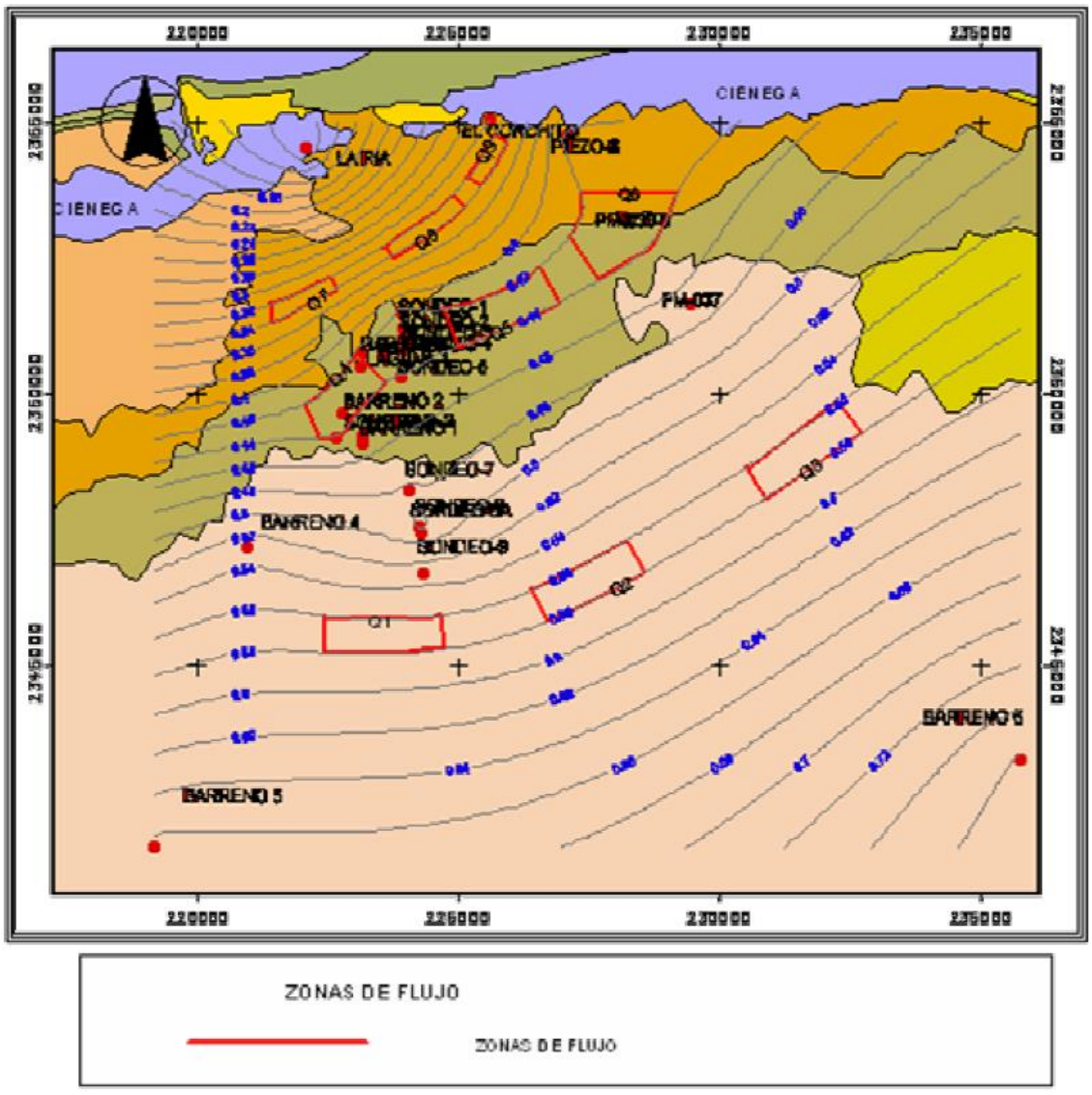
Para el cálculo del flujo en el acuífero se definieron 9 celdas de flujo en el área de estudio. A cada zona se le asignó una conductividad hidráulica calculada en el apartado anterior y un gradiente hidráulico definido por la distancia a la que se encuentra cada línea equipotencial (ver figura siguiente).

También se asumió que el espesor del acuífero de agua dulce-salobre es variable entre a 10, 15 y 20 m (un promedio del techo de la interfase salina observados en los barrenos

cercanos a la línea de costa). Se observa que en promedio fluyen 0.08 lps por cada metro lineal de acuífero o el equivalente a 7 m3 por día en cada metro lineal de acuífero.

En la zona en la que el acuífero es libre el gasto es de 0.15 lps por metro lineal; sin embargo, hacia la zona Norte-Noreste (hacia la costa y en especifico hacia el Corchito y el ex basurero de Progreso), debido a la disminución en la conductividad hidráulica se registra un decremento importante en la cantidad de agua subterránea que fluye hacia esa zona, en comparación con las observadas en la zona Oeste (ver tabla siguiente).

Figura V.63).- Celdas de flujo definidas para el área de estudio.



La sección litológica que se presenta en la figura siguiente fue elaborada correlacionando la litología descrita, mediante el análisis del detritus de corte, en cada uno de los 7 barrenos de 10 m de profundidad que fueron perforados en la zona de Paraíso, en Progreso. De igual forma se presentan los perfiles de cada uno de los barrenos construidos en la zona de estudio. La sección litológica encontrada en la zona de estudio de Progreso, cercana al relleno sanitario de Paraiso, se caracteriza por la presencia de una roca caliza compacta denominada Caliche con un espesor entre 0.50 y 0.70 m. Esta

roca aflora en toda la superficie del predio, y se encuentra parcialmente cubierta por una delgada capa de suelo.

Tabla V.4).- Calculo del volumen que fluye en las celdas de flujo del área de estudio.

CALCULO DEL CAUDAL QUE FLUYE BAJO EL PREDIO
APLICANDO LA TÉCNICA DE REDES DE FLUJO

Ley de Darcy — Delta H 0.02 m

Q = K A i

Configuración de flujo para el .

ZONA DE FLUJO	K (m/d)		Area sección transversal		DELTA L		GASTO EN CADA CELDA		GASTO UNITARIO	
	ID	VALOR	b (m)	L (m)	(m)	i (adimensional)	Q (m3/d)	Q (l/s)	Q (m3/d/m)	Q (l/s/m)
Q1	K1	21,500	20	2250	670	0.00003	28,881	334	13	0.15
Q2	K1	21,500	20	2050	650	0.00003	27,123	314	13	0.15
Q3	K1	21,500	20	2150	700	0.00003	26,414	306	12	0.14
Q4	K2	6,700	20	1410	740	0.00003	5,106	59	4	0.04
Q5	K2	6,700	20	2020	730	0.00003	7,416	86	4	0.04
Q6	K4	6,200	20	1130	950	0.00002	2,950	34	3	0.03
Q7	K3	5,400	15	1320	330	0.00006	6,480	75	5	0.06
Q8	K3	5,400	15	1560	280	0.00007	9,026	104	6	0.07
Q9	K5	1,700	10	950	300	0.00007	1,077	12	1	0.01
						PROMEDIO	12,719	147	7	0.08

Pruebas de permeabilidad en laboratorio, realizado en estudios de investigación a esta roca, revelan que es prácticamente impermeable (*Ing. Jorge Pacheco FIUADY, comunicación personal*). Subyaciendo a esta delgada capa de Caliche, existe una Caliza Arcillo- Limosa con un espesor aproximado de 3 m.

En el plano de estratificación que separa al Caliche de la Caliza Arcillo-Limosa se encontraron algunas evidencias de un delgado horizonte cárstico, con presencia de cavidades de disolución con espesores de 0.30 a 0.40 m. Este horizonte no es continuo en el sitio, ya que solamente se encontró en los barrenos exploratorios RS-1, RS-2 y RS-4.

Figura V.64).- Sección litológica. Secuencia de diferentes tipos de rocas calizas. Presencia de horizontes carstificados a diferentes profundidades; 0.70 m, entre 4 y 6 m y entre 8 y 10 m.

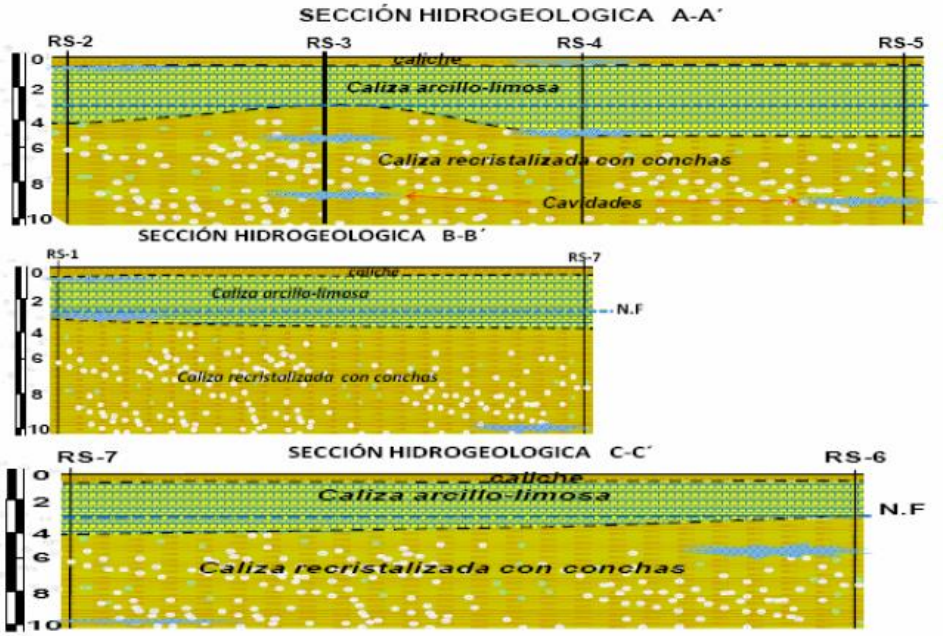
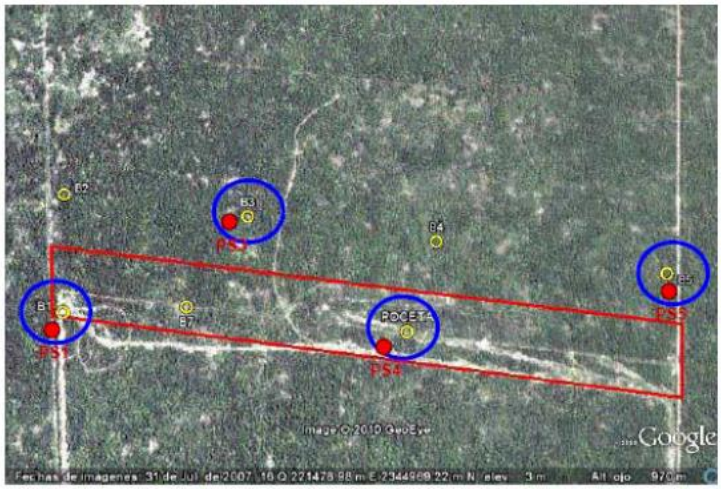


Figura V.65).- Localización de los barrenos exploratorios y los sondeos perforados para el estudio (barrenos en círculos amarillos y sondeos, en rojo), para evaluar la conductividad hidráulica de la zona saturada y de la zona vadosa, respectivamente. Los Barrenos alcanzaron una profundidad de 10 metros y los sondeos menores a 3 m.



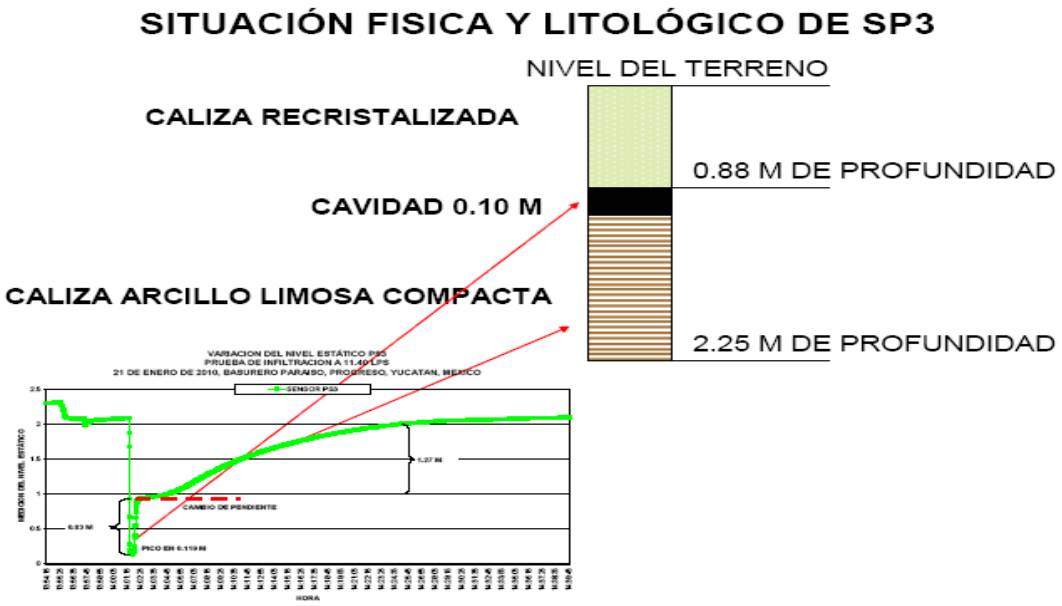
Los horizontes cársticos o cavidades de disolución fueron detectados durante la perforación de los barrenos y sondeos. Su existencia fue corroborada a través de los registros de video ejecutados en cada perforación (ver figura siguiente). Dos horizontes más fueron localizados entre las profundidades de 4 a 6 m y de 8 a 10 m. Estos horizontes al igual que el identificado a 0.70 m son discontinuos, pues no en todos los barrenos fueron localizados a las mismas profundidades y su origen está asociado a los planos de estratificación, así como también a las diferentes posiciones del nivel freático durante el Pleistoceno.

Figura V.66).- Esquema hidrogeológico de los sondeos donde se realizó la prueba de infiltración para evaluar la permeabilidad del Caliche y de la Caliza Arcillo-Limosa

Por otra parte, se debe mencionar que al analizar las videofilmaciones y los perfiles litológicos de los barrenos se muestra que la capa de caliza arcillo limosa es continua y prácticamente no tiene presencia de disolución (material bien compacto y en las videofilmaciones se observan unas paredes bien definidas); oquedades de disolución fueron detectadas en la caliza recristalizada y con conchas que subyace a la caliza arcillo-limosa (principalmente entre 8 y 10 m, y en el plano de estratificación que separa a ambas rocas).

Con el propósito de evaluar la permeabilidad del horizonte cárstico y de la Caliza Arcillo-Limosa, en la zona vadosa (por encima del nivel estático del agua subterránea), se construyeron sondeos PS1, PS2, PS3 y PS4, de una profundidad menores a 3 m, y en ellos se ejecutaron pruebas de infiltración del tipo de Slug Test (ver figuras siguientes). Así mismo, los barrenos fueron empleados en la ejecución de pruebas de bombeo para evaluar la conductividad hidráulica de la zona saturada (acuífero). En la figura siguiente, muestra los resultados de la prueba de infiltración practicada en el sondeo PS3. Un sensor de presión fue instalado para medir el ascenso del nivel del agua cuando ésta fue inyectada al sondeo, y posteriormente el instrumento registro la tasa (velocidad) de infiltración. Cuando el sensor se instaló en el agujero del sondeo, éste no contenía agua. El volumen total de agua fue inyectado en un tiempo de aproximadamente 9 segundos. En la figura, el cero del eje de las ordenadas corresponde a la superficie del terreno. Nótese de que antes de que el sondeo se llenara, éste se interrumpió para evitar el rebose del agua en la superficie del suelo. Casi inmediatamente el sensor comenzó a registrar el proceso de infiltración.

Figura V.67).- Resultado de la prueba de inyección de agua en forma súbita .Slug Test., ejecutada en elsondeo PS3, en el cual se detectó una cavidad de disolución de 0.10 m de espesor en el contacto litológico entre el Caliche y la Caliza Arenosa-Limosa.



El gráfico ilustra el proceso de inyección del agua y la infiltración de esta por efecto de la inyección. Para la interpretación del gráfico, considere lo siguiente: el sensor comienza a medir la inyección del agua al sondeo a partir de 2.1 m, obsérvese que el llenado del sondeo es súbito y ocurre en pocos segundos, pues el nivel del agua alcanza inmediatamente casi la superficie del terreno (nivel 0.01 m). A partir de entonces se

suspende la inyección y el gráfico reporta la curva de recuperación del nivel del agua. Nótese que, debido a la inyección, la curva de recuperación presenta dos cambios de pendiente con diferencias notables; uno abrupto y el otro más suave. Este cambio de pendientes, del abrupto al suave, ocurre cuando el nivel del agua desciende por debajo de la presencia del horizonte cárstico. En otras palabras, el descenso abrupto del nivel del agua se debe a la influencia de la cavidad de disolución, y el descenso más suave del nivel del agua corresponde a la respuesta de la Caliza Arcillo-Limosa la cual es menos permeable.

Es importante señalar, que este tipo de comportamiento no está supeditado a la existencia de cavidades de disolución en el contacto entre el Caliche y la caliza Arcillo-Limosa, ya que también los sondeos donde no se localizaron cavidades tienen un comportamiento similar a PS3. En consecuencia, se cree que el plano de estratificación o contacto geológico entre estas dos formaciones juega un papel importante en el desarrollo de flujos laterales. Es importante, establecer una diferencia entre los flujos que pueden desarrollarse a través de estos planos y ante la presencia de fracturas.

Los flujos de agua que puedan desarrollarse en estos planos de estratificación son horizontales, ya que éstos, mantienen su posición original como cuando ocurrieron los depósitos de sedimentos calcáreos de origen marino que originaron este paquete de roca. Lo anterior, en virtud de que la plataforma calcárea de la Península de Yucatán se considera tectónicamente estable.

Por otro lado, la roca caliche que aflora posee una conductividad primaria, tan baja que suele considerársele como un acuitardo. Sin embargo, el intemperismo que ha actuado sobre ella la ha agrietado creándole diaclasas que le confieren una elevada permeabilidad secundaria; permitiendo que el agua pueda escurrir verticalmente hacia abajo hasta alcanzar los planos de estratificación, a partir de donde pueden desarrollarse flujos horizontales. La existencia de la caliza Arcillo- Limosa que subyace a este plano de estratificación evitará que el agua continúe descendiendo y alcance al acuífero libre, debido a que es poco permeable.

Tabla V.5).- Resultados de la conductividad hidráulica de la zona vadosa y del acuífero.

CALCULO DE K EN SONDEOS				
	FRACTURA		CALIZA ARCILLO LIMOSA	
PRUEBA	K (M/S)	K (M/D)	K (M/S)	K (M/D)
	HVORSLEV		HVORSLEV	
PS1	5.35E-04	46	1.60E-06	0.14
PS3	2.29E-03	198	6.83E-06	0.59
PS4	NA	NA	1.35E-05	1.17
PS5	1.10E-02	950	2.34E-06	0.20
PROMEDIO	4.61E-03	398	6.07E-06	0.52

CALCULO DE K EN POZOS AFORADOS				
PRUEBA	K (M/S)		K (M/D)	
	COOPER-JACOB	THEIS RECOVERY	COOPER-JACOB	THEIS RECOVERY
POCETA	5.14E-03	4.51E-03	444	390
RS3	2.42E-03	1.50E-02	209	1296
RS5	2.12E-03	1.94E-03	183	168
PROMEDIO	3.23E-03	7.15E-03	279	618

En las tablas de arriba se reportan los valores de la conductividad hidráulica (K) estimados mediante las pruebas de infiltración y las de bombeo. El término de fractura en la tabla, correspondiente al resultado del cálculo de la K en los sondeos, se refiere más bien a los planos de estratificación o cavidades de disolución que se encuentran por debajo del caliche.

Nótese que la K de la caliza Arcillo-limosa es, en general, menor de 1 m/d, por lo cual puede tipificarse como una roca de baja permeabilidad. En contraste, los valores de la K correspondiente al horizonte cárstico y al acuífero (los obtenidos en los barrenos mediante pruebas de bombeo) varían entre 279 y 618 m/d, es decir en 3 órdenes de magnitud a la caliza arcillo-limosa.

Tabla V.6).- Valores de la Conductividad Hidráulica, según varios autores

K (m/d)	Clasificación
$K \leq 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy Alta

Las tablas siguientes presentan la relación que existe entre la conductividad hidráulica y la infiltración de la precipitación. Para la caliza arcillo-limosa, se reportaron valores de entre 0.14 y 1.17 m/d que equivalen a 0.58 y 4.87 cm/hr, respectivamente.

La primera tabla indica que la permeabilidad de la caliza arcillo limosa puede considerarse de **lenta a moderada**; mientras que la segunda tabla indica que para esa permeabilidad se podrían infiltrar en el suelo entre en **4 y el 12 %** del volumen de la precipitación (o volumen de drenaje).

Tabla V.7).- Clasificación de la permeabilidad en láminas de infiltración.

Permeabilidad	Valores (cm/hora)
Muy lenta	< 0.15
Lenta	0.15 – 0.50
Lenta a moderada	0.50 - 2.00
Moderada	2.00 – 5.00
Moderada a rápida	5.00 - 10.00
Rápida	5.00 - 15.00
Muy rápida	15.00 – 25.00
Extremadamente rápida	> 25.00

Fuente: Modificada de Schosinsky y Losilla, 2000.

Tabla V.8).- Porcentaje de volumen drenable o infiltración con respecto a la conductividad hidráulica.

Permeabilidad / Porosidad Eficaz	Tipo de suelo	Valores (cm/hora)	Volumen (%)
Muy lenta		< 0.15	< 2.00
Lenta		0.15 - 0.50	2.00 - 4.00
Lenta a moderada	Solochack, Cambisol	0.50 - 2.00	4.00 - 8.50
Moderada	Feozem	2.00 - 5.00	8.50 - 12.00
Moderada a rápida	Regosol, Andosol	5.00 - 10.00	12.00 - 17.60
Rápida		5.00 -15.00	17.60 -18.30
Muy rápida		15.00 - 25.00	18.30 - 22.00
Extremadamente rápida		> 25.00	> 22.00

Fuente: Modificada de Schosinsky y Losilla, 2000.

Los sistemas de flujo han sido definidos por varios autores (Custodio y Llamas, 1983; Domenico y Schwartz, 1990; Freeze and Cherry, 1979) y en general se describe que la existencia de una zona de recarga depende directamente de la climatología, geología y geomorfología.

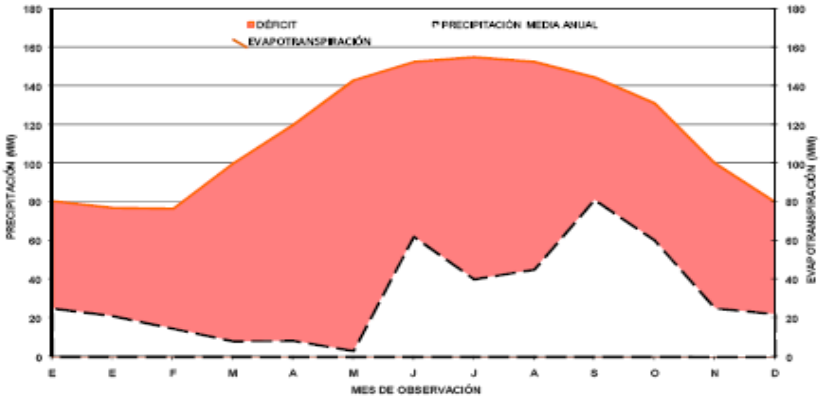
Las zonas de recarga, por lo general, se encuentran en las zonas donde ocurren eventos hidrometeorológicos (precipitaciones) importantes; los niveles estáticos son los más profundos del sistema de flujo, ya que se encuentran a mayores altitudes respecto al nivel medio del mar y coinciden con las zonas con mayor potencial hidráulico desde donde el agua subterránea fluye hacia las zonas con menor potencial hidráulico (descarga subterránea). Químicamente, las zonas de recarga se caracterizan por tener menos contenido de minerales disueltos en su composición y es en su viaje hacia las zonas de descarga del agua subterránea en donde va obteniendo minerales (disolución de los componentes de las formaciones acuíferas.

Se debe hacer énfasis en el hecho de que los sistemas de flujo en la realidad suelen ser más complicados por lo que se definen acuíferos locales y regionales. Los acuíferos regionales se recargan en una zona específica, el agua subterránea viaja varios kilómetros hacia su descarga subterránea; mientras que los acuíferos locales suelen ser pequeñas zonas de recarga que almacenan agua que puede o no tener relación con el acuífero regional; es decir, el agua que llueve localmente (un área específica que forma parte de un sistema regional) puede atrapar la precipitación en una capa semipermeable y formar un acuífero colgado local; y esta agua atrapada puede nunca llegar al flujo de agua subterránea regional, dependiendo de las condiciones geológicas e hidráulicas de las capas litológicas.

Con base a lo anterior, es claro que la zona costera no corresponde a una zona de recarga, en virtud de lo siguiente: Climatológicamente existe un déficit de precipitación pluvial que inhibe la recarga pluvial en la zona costera. El balance hídrico reportado en las cartas del INEGI establece que la recarga en esta zona es nula; no obstante, que la precipitación media anual en la zona de Progreso de Castro varía entre 500 y 600 mm (ver figura siguiente) y es el menor índice registrado en el estado con respecto a otras zonas en donde se alcanzan precipitaciones medias anuales de hasta 1200 mm. (se debe recordar que las zonas de recarga se caracterizan por tener un alto índice de

precipitación). Existe un déficit de agua en virtud de la elevada evapotranspiración y la poca precipitación que impera en la zona costera.

Figura V.68).- Precipitación media anual, evapotranspiración y déficit de agua según datos de la Estación Climatológica de la ciudad de Progreso, Yucatán, para el período de 1921 a 1975. INEGI



Por otro lado, si bien el agua puede infiltrarse en los primeros metros del subsuelo debido a la porosidad secundaria del caliche, lo cierto es que la presencia de una caliza arcillo-limosa de baja permeabilidad impide que ésta recargue al acuífero libre. Si observamos los resultados de la conductividad hidráulica obtenidos en las pruebas de infiltración de la zona vadosa y la clasificación que se le ha dado a esta capa litológica, se tiene que la precipitación tendrá contacto con una capa de caliza arcillo limosa de **baja a media** conductividad hidráulica; esto sugiere que la permeabilidad del estrato litológico es **lenta a moderada** y finalmente se determinó que se puede infiltrar en dicho estrato entre el **4 y el 12 %** del volumen precipitado (sin considerar que existe vegetación que también puede aprovechar el agua infiltrada); por lo que se puede considerar una recarga nula.

Con respecto a la continuidad y funcionamiento de la capa de caliza arcillo limosa encontrada en la zona de estudio; se puede mencionar el trabajo de CONAGUA llamado ***"Implementación de red piezométrica en la zona poniente del estado de Yucatán"***, este estudio hecho en 2009 muestra la secuencia estratigráfica de las capas litológicas de la siguiente forma: a) en superficie una costra de caliche, b) por debajo una capa de caliza areno arcillosa de baja permeabilidad, c) después una capa de caliza arenosa o calcarenita y finalmente d) un espesor de caliza arrecifal o coquinas, esta descripción se muestra en la figura siguiente. El basurero de Progreso se encuentra ubicado a 11 Km. de la línea de costa y es correspondiente con el Pozo 3 de PREDECO de dicha figura y se puede relacionar la capa de caliza arcillo limosa con la capa de caliza areno arcillosa definida en el estudio de CONAGUA. Los espesores muestran variaciones, pero su profundidad es correlativa con la observada en el basurero de Progreso. Lo anterior confirma la continuidad de esta capa arcillosa-limosa (sascab).

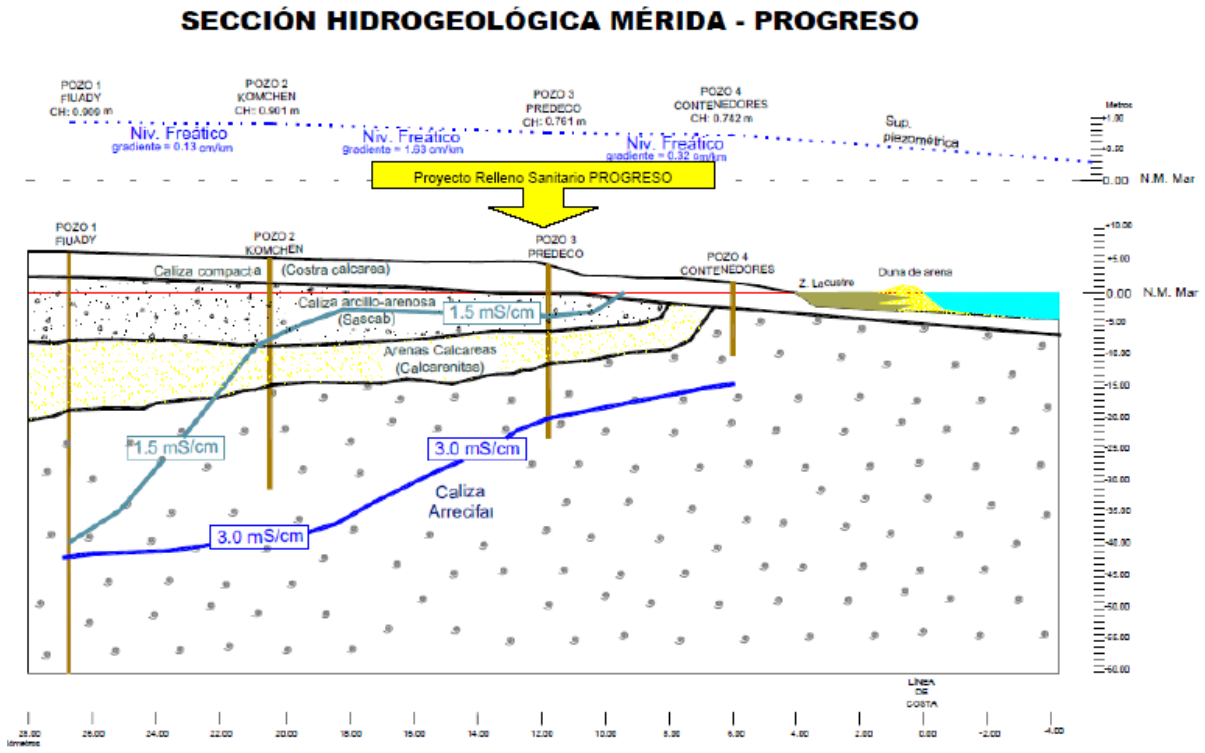
Por otra parte, en el mismo estudio de CONAGUA, se menciona que el gradiente hidráulico indica que el flujo subterráneo es de Mérida a Progreso y que es prácticamente horizontal hasta llegar a la zona de costa (descarga subterránea); y que los niveles estáticos más profundos se registraron en la zona de Mérida y Komchen (hacia el continente) y los más someros se registraron en el pozo 3 PREDECO y el pozo 4 Contenedores.

En conclusión, se ha definido que el área costera (particularmente para el municipio de Progreso Yuc), no corresponde a una zona de recarga del acuífero por lo siguiente:

En la zona existen bajas precipitaciones pluviales y altas tasas de evaporación y evapotranspiración. Se identifico entre 0.70 m y 3 m de profundidad una capa de caliza arcillo limosa continua en la región que tiene propiedades de muy baja permeabilidad. La zona que ocupa el predio del relleno sanitario presenta los niveles estáticos más someros en relación con los observados dentro de la región septentrional de la península de Yucatán y el flujo del agua subterránea ocurre desde Mérida hacia la costa, pasando por la zona de estudio.

Durante el recorrido geológico hecho y en la descripción de la geología del sitio se menciona que superficialmente se observa una capa de caliche con huellas de disolución, que se encuentran únicamente en esta capa superficial expuesta a la intemperie; sin embargo, no se detectó alineamiento de fracturas, ni tampoco cenotes.

Figura V.69).- Sección Geohidrológica Mérida-Progreso; fuente: CONAGUA, 2009.



Casáres-Salazar, R. (2006), realizó estudios sobre la hidrogeología de la zona de descarga del acuífero de Yucatán y sus implicaciones ambientales, en el cual realizó estimaciones del rendimiento o porosidad específicos mediante el método de la fluctuación del nivel freático (MFNF).

Menciona que para aplicar el MFNF es importante comprender primeramente los mecanismos de recarga y descarga del agua subterránea por efecto de la precipitación, retención por la cobertura vegetal, absorción en la zona vadosa, infiltración, evaporación y evapotranspiración. En este sentido, se considera que una fracción del volumen de agua que precipita es retenida por la cobertura vegetal durante el evento para ser posteriormente evapotranspirada, otra parte infiltra en la zona edáfica para satisfacer el

déficit de humedad del suelo (DHS), y el volumen restante recarga temporalmente al acuífero por la vía de las fracturas, dolinas y oquedades, lo cual se favorece por la reducida pendiente topográfica y la cercanía al nivel freático (entre 5 y 9 m para la ciudad de Mérida).

Ahora bien, el agua contenida en el acuífero es requerida durante todo el año por la vegetación, para ser evapotranspirada en consecuencia. Otro mecanismo por el cual salen volúmenes importantes de agua del acuífero lo representa la evaporación en los cenotes expuestos a la atmósfera, donde las tasas son elevadas por efecto de la radiación solar y del viento, principalmente.

Se ha estimado la recarga media anual en el acuífero cárstico de Yucatán en 150 mm/año (Lesser y Weidie, 1988), 205 mm/año (SARH, 1988) y de 100 a 275 mm/año (Rodriguez, 1984), lo cual representa alrededor del 15 al 25 % de la precipitación (Graniel *et al*, 1999). Estos resultados son congruentes con los estimados por la British Geological Survey (1995) en la ciudad de Mérida y sus alrededores, donde se estimó que la recarga natural neta anual al acuífero (es decir, antes de urbanizar y descontando las pérdidas por evaporación y evapotranspiración durante todo el año) es en promedio menor que 100 mm/año, con base en el método del Balance de Masas de Cloruros (BMC). Considerando que en Mérida la lámina de precipitación media anual es de alrededor de los 1000 mm/año, se obtiene un factor de recarga neta anual f (R = fP, donde por despeje f = R / P) al acuífero de aproximadamente 0.1.

Es muy importante recalcar que este valor para el factor f corresponde a una media anual neta o efectiva, por lo que no representa un valor aceptable, ni siquiera aproximado, para determinar la recarga al acuífero asociada a un evento de precipitación, exclusivamente, tal como se requiere para aplicar el MFNF.

Sin embargo, para un evento de precipitación, exclusivamente, se observa que la recarga ocurre en un breve período de tiempo, iniciando casi inmediatamente al iniciar la lluvia (ver gráficas del lisímetro en las figuras siguientes).

Figura V.70).- Monitoreo del nivel del agua en el lisímetro FIUADY y precipitación, del 14 al 23 de junio de 2005.

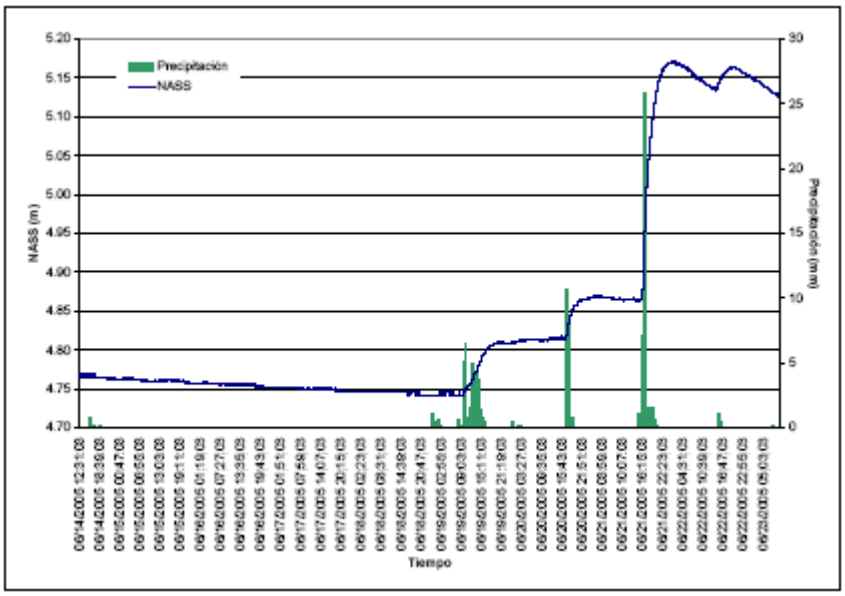


Figura V.71).- Monitoreo del nivel del agua en el lisímetro FIUADY y precipitación, del 23 de junio al 5 de julio de 2005.

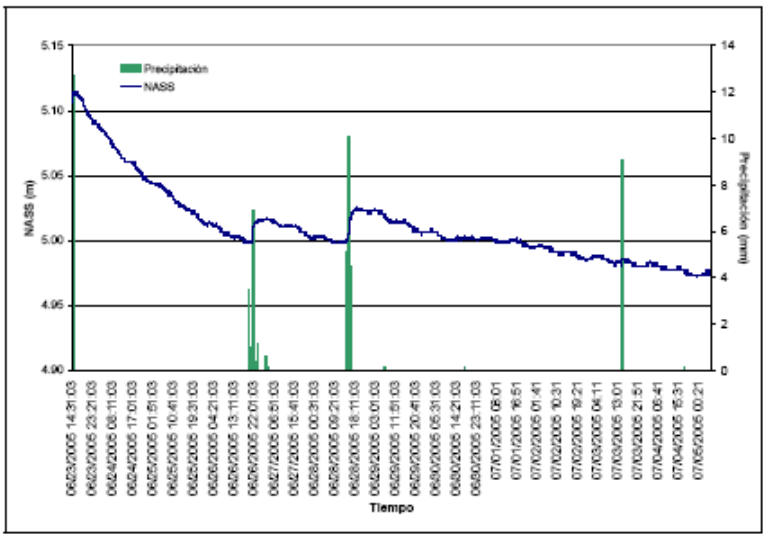


Figura V.72).- Monitoreo del nivel del agua en el lisímetro FIUADY y precipitación, del 1 al 25 de agosto de 2005.

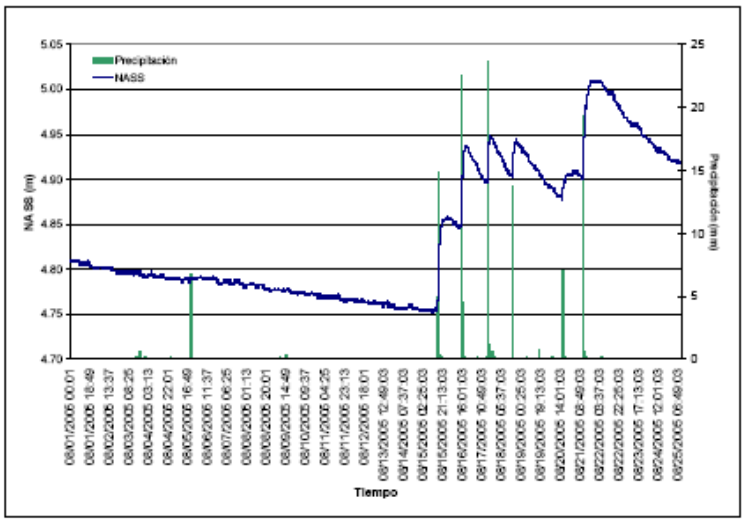


Figura V.73).- Monitoreo del nivel del agua en el lisímetro FIUADY y precipitación, del 12 de septiembre al 19 de octubre de 2005.

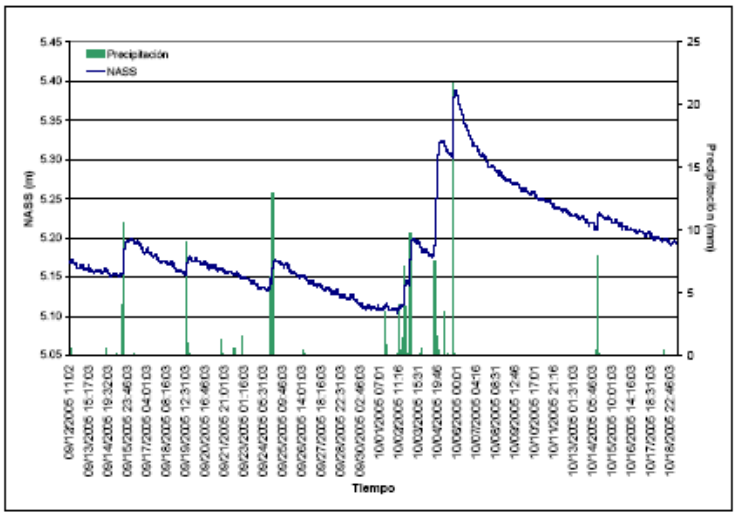
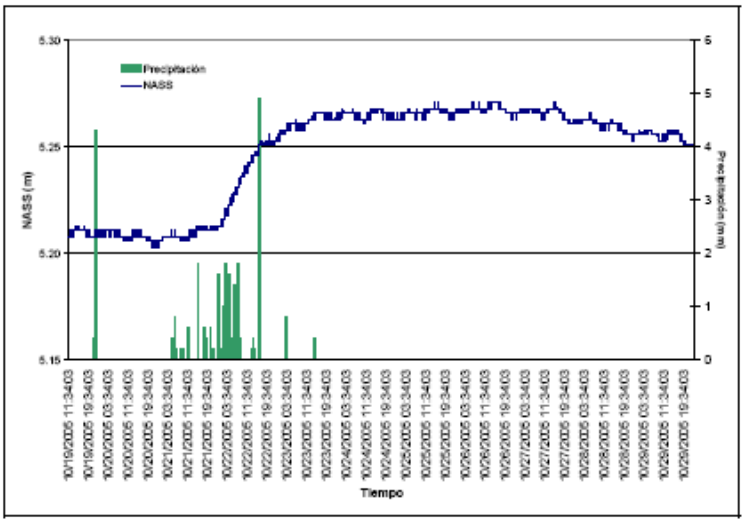


Figura V.74).- Monitoreo del nivel del agua en el lisímetro FIUADY y precipitación, del 19 al 29 de octubre de 2005.



Esto es típico de los acuíferos cársticos de tipo libre e indica que la infiltración es rápida (de hecho, el nivel estático en la zona donde se aplicó el MFNF es de alrededor de 5 m, muy próximo a la superficie del terreno) y que, en consecuencia, la evaporación del agua superficial retenida sobre el terreno sea poca, implicando que el factor f de recarga al acuífero sea alto, favorecido por las grietas del terreno cárstico.

Pero también se observa en las figuras antes mencionadas que no todas las lluvias incrementan el nivel freático en la misma proporción, lo cual se puede atribuir a diferencias en el déficit de humedad del suelo (DHS) en la zona edáfica, ya que primero se satisface esta situación y luego se recarga el acuífero.

Así, para aplicar correctamente el MFNF es preciso distinguir entre los conceptos de “recarga media anual neta o efectiva del acuífero”, la cual considera la evaporación y evapotranspiración a lo largo del año y “recarga por evento”, misma que en el caso de estudio ocurre durante un breve período de tiempo después de la precipitación, es decir, de manera prácticamente inmediata.

En este estudio se considera que los parámetros R y f corresponden a la recarga y al factor de recarga al acuífero por evento de precipitación, respectivamente, para lo cual no se considera la evaporación y evapotranspiración posteriores, valga la redundancia.

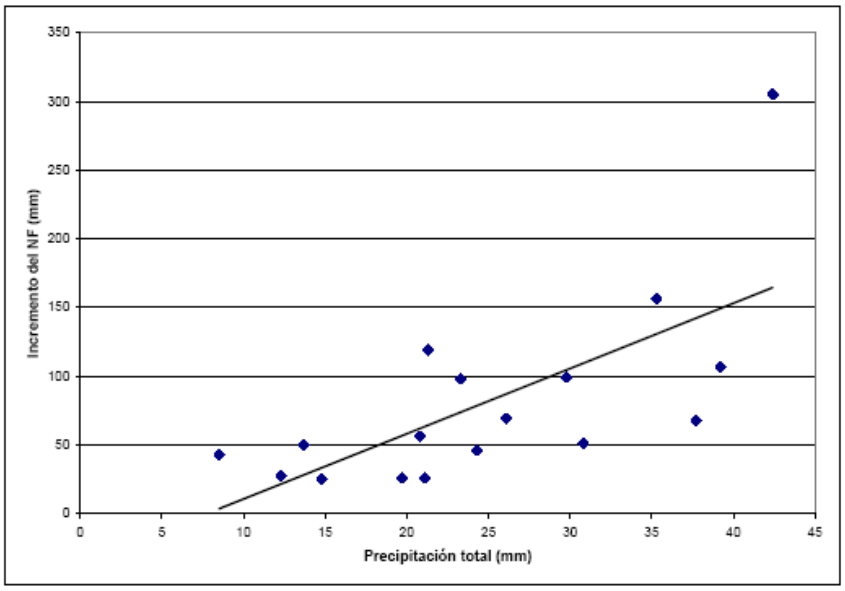
En la tabla y figura siguientes se presentan las observaciones de varios eventos de precipitación (P) y la respuesta del nivel freático (incremento del nivel de agua en el acuífero, ΔH). También se agrega la columna I, que representa la intensidad de la lluvia.

La alta dispersión de los datos (coeficiente de correlación R=0.68) se debe tanto a las diferencias en el DHS en la zona edáfica explicado anteriormente, como a las heterogeneidades del sistema cárstico (litología, variaciones en la porosidad en la dirección vertical).

Tabla V.9).- Registros de los eventos de precipitación en el lisímetro FIUADY.

Fecha del evento	Duración lluvia (hrs)	P total (mm)	ΔH (mm)	I promedio (mm/hr)
19-Jun-05	6.97	37.70	68	5.41
15-Ago-05	3.97	39.20	107	9.88
20-Jun-05	2.47	20.80	56	8.43
20-Ago-05	2.97	8.50	43	2.87
16-Ago-05	4.47	29.80	99	6.67
18-Ago-05	0.47	13.70	50	29.36
21-Ago-05	2.97	21.30	119	7.18
21-Jun-05	6.47	42.40	305	6.56
26-Jun-05	4.47	21.10	26	4.72
28-Jun-05	1.97	19.70	26	10.02
24-Sep-05	4.92	24.30	46	4.94
19-Sep-05	1.92	12.30	27	6.42
15-Sep-05	2.40	30.80	51	12.83
14-Oct-05	1.92	14.80	25	7.72
21-Oct-05	58.00	26.10	69	0.45
04-Oct-05	5.92	35.30	156	5.97
05-Oct-05	1.92	23.30	98	12.16

Figura V.75).- Relación entre precipitación e incremento del nivel freático.



Para el caso de los acuíferos libres, el rendimiento específico (Sy) equivale a la porosidad efectiva, ne = Sy (Custodio y Llamas, 1976 a). El parámetro Sy se estima con las ecuaciones basadas en el MFNF, las cuales se reescriben a continuación:

$Sy = R / \Delta H$

$R = f P$

Puesto que se desconoce el valor de f, se plantearon escenarios de este parámetro para estimar una Sy promedio en la zona de fluctuación del nivel freático. Así, variando el valor

de f y promediando los valores de Sy obtenidos en cada evento de precipitación se obtiene la tabla siguiente.

Tabla V.10).- Valores de Sy promedio obtenidos para los diferentes escenarios de f

f	Sy (%)
0.05	2.05
0.10	4.10
0.15	6.15
0.20	8.20
0.25	10.26
0.30	12.31
0.35	14.36
0.40	16.41
0.45	18.46
0.50	**20.51**
0.55	22.56
0.60	24.61
0.65	26.67
0.70	28.72
0.75	30.77
0.80	32.82
0.85	34.87
0.90	36.92
0.95	38.97
1.00	41.02

De la tabla anterior se puede concluir que la porosidad efectiva (ne = Sy) del acuífero en la zona de la (Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán) FIUADY no pasa del 41 % (ya que f no puede ser mayor que 1), considerado para el espesor del acuífero donde fluctuó el nivel estático durante el período de estudio.

Considerando que del resultado de la prueba de bombeo en el pozo estudiado en el presente trabajo (2B San Román) se tiene que Sy = 0.2061 (o bien, 20.61 %), este valor se obtiene para una f de 0.50, tal como se observa en la tabla anterior.

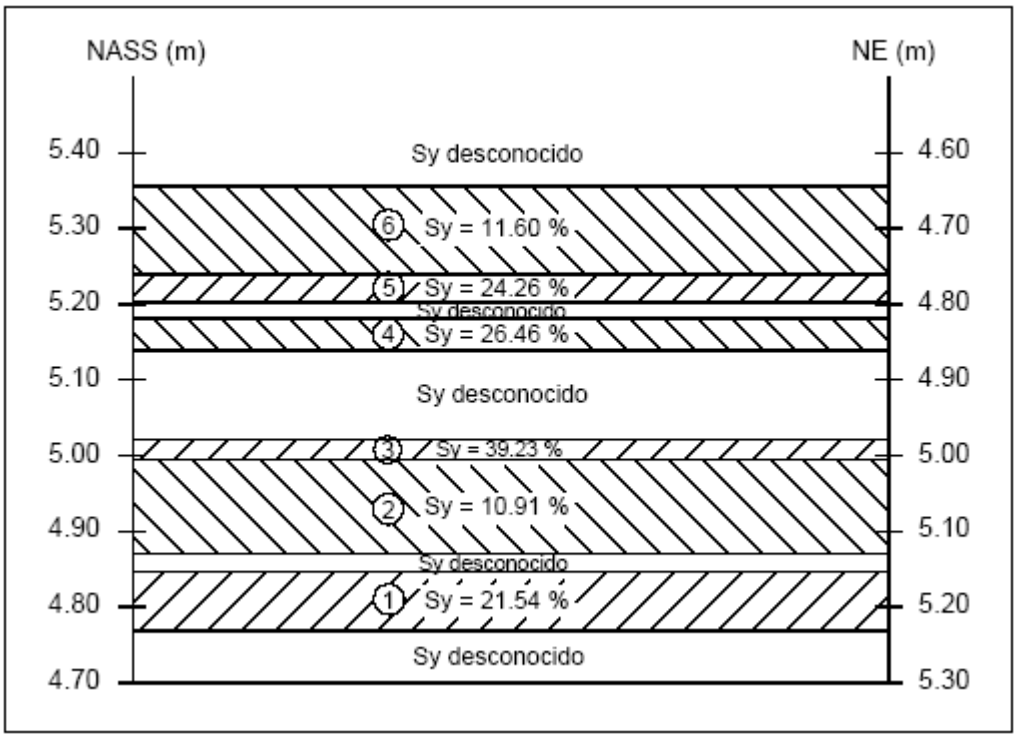
Este valor para el parámetro f se considera representativo de la zona de estudio, lo cual implica que el terreno sea moderadamente permeable, que el agua de lluvia infiltre con moderada rapidez y que la evaporación superficial sea pequeña debido al breve período de tiempo de retención del agua en los charcos.

En la tabla siguiente se presentan las estimaciones de Sy por evento de precipitación para una f = 0.50, la cual da como resultado una media aritmética de Sy = 20.51 %. Las columnas “H inicial” y “H final” de dicha tabla representan los niveles de agua con respecto a un mismo nivel base horizontal imaginario de 10 m por debajo del nivel del terreno, inmediatamente antes de la lluvia y al finalizar la recarga asociada a cada evento. La tabla está ordenada con base en la columna “H final” y así se observa que el valor de Sy varía por capas o estratos, dependiendo de la posición en la cual se encuentre el nivel del agua en el acuífero, lo cual se representa esquemáticamente en la figura siguiente, en la que se observa que no existe una tendencia clara en la variación de este parámetro con la profundidad. Las profundidades de los estratos representados en la figura siguiente fueron trazados con base en los promedios de “H inicial” y “H final” de la tabla que se presenta a continuación.

Tabla V.11).- Estimaciones de Sy por evento de precipitación para una f=0.50

Estrato	Fecha del evento	H inicial (m)	H final (m)	ΔH (mm)	Sy %
1	19-Jun-05	4.740	4.808	68	27.72
	15-Ago-05	4.751	4.858	107	18.32
	20-Jun-05	4.815	4.871	56	18.57
2	20-Ago-05	4.867	4.910	43	9.88
	16-Ago-05	4.838	4.937	99	15.05
	18-Ago-05	4.892	4.942	50	13.70
	21-Ago-05	4.890	5.009	119	8.95
	21-Jun-05	4.864	5.169	305	6.95
3	26-Jun-05	4.991	5.017	26	40.58
	28-Jun-05	4.998	5.024	26	37.88
4	24-Sep-05	5.124	5.170	46	26.41
	19-Sep-05	5.148	5.175	27	22.78
	15-Sep-05	5.146	5.197	51	30.20
5	14-Oct-05	5.205	5.230	25	29.60
	21-Oct-05	5.199	5.268	69	18.91
6	04-Oct-05	5.167	5.323	156	11.31
	05-Oct-05	5.291	5.389	98	11.89
					20.51

Figura V.76).- Distribución de Sy en los estratos que conforman el acuífero.



Puesto que los estratos de la figura anterior tienen diferentes espesores y valores de Sy, lo más apropiado para estimar una Sy media del acuífero es mediante la media ponderada, cuyo cálculo se presenta en la tabla siguiente, considerando que f = 0.50.

Tabla V.12).- Cálculo de la media ponderada de Sy, considerando f = 0.50.

	PROMEDIOS				PROMEDIO		MEDIA PONDERADA
Estrato	H inicial (m)	H final (m)	ΔH (m)	ΔH (cm)	Sy %	ΔH / ΣΔH	(Sy %) (ΔH / ΣΔH)
1	4.769	4.846	0.077	7.7	21.54	0.18	3.93
2	4.870	4.993	0.123	12.3	10.91	0.29	3.18
3	4.995	5.021	0.026	2.6	39.23	0.06	2.42
4	5.139	5.181	0.042	4.2	26.46	0.10	2.63
5	5.202	5.239	0.037	3.7	24.26	0.09	2.13
6	5.239	5.356	0.117	11.7	11.60	0.28	3.22
Σ			**0.422**	**42.2**		**1.00**	**17.50**

El valor obtenido de la media ponderada (Sy = 17.50 %) se aproxima mucho a la media aritmética (Sy = 20.51 %), por lo que se concluye que una aproximación práctica y sencilla al valor de Sy del acuífero bajo estudio formado por estratos de diferentes Sy puede ser a través de la media aritmética.

Los valores de Sy obtenidos (parámetro que equivale a la porosidad efectiva en el caso de los acuíferos libres) y que fueron presentados anteriormente se encuentran dentro de los rangos de porosidad estimados por González (1984) y Brewerton (1993), a saber:

1).- González (1984) determinó las porosidades del acuífero a escala de laboratorio con base en núcleos de roca en la ciudad de Mérida, los cuales fueron extraídos de pozos profundos a diversas profundidades, resultando que la porosidad es muy variable con la profundidad, con rango de valores del 5 al 50 %, aproximadamente.

2).- Brewerton (1993), formando parte del equipo de la British Geological Survey (BGS) en una serie de estudios de tipo geohidrológico y de calidad del agua para caracterizar el acuífero de la ciudad de Mérida y sus alrededores, también determinó las porosidades del acuífero a escala de laboratorio con base en núcleos de roca extraídos de pozos profundos a diversas profundidades, resultando también que la porosidad es muy variable con la profundidad, con rango de valores del 10 al 55 %, aproximadamente.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que en los horizontes cársticos donde existen cavernas, la porosidad alcanza el valor del 100 %.

Entre los factores que pueden influir en la estimación y variabilidad de Sy están: la intensidad y duración de la lluvia, los factores climatológicos (tales como la velocidad de los vientos y la humedad relativa), el déficit de humedad del suelo (DHS) y las heterogeneidades del sistema cárstico (litología, variaciones de porosidad en la vertical). Esta última hipótesis se sustenta en el conocimiento de los subsistemas caliche-carst a diversas profundidades (Sánchez *et al*, 1997).

De los resultados obtenidos se puede concluir que el MFNF aquí presentado, si bien tiene sustento teórico, debe ser aplicado con suma cautela para el caso del acuífero de Yucatán, ya que éste es cárstico y heterogéneo en la dirección vertical. Es así como se espera que arroje resultados más confiables en acuíferos homogéneos (de tipo libre, por supuesto), tales como los formados por arenas, gravas o aluviones.

Además, cabe mencionar que el valor de Sy obtenido mediante una prueba de bombeo es representativo de las profundidades de captación de agua en el acuífero, en tanto que el valor de Sy obtenido mediante el MFNF corresponde exclusivamente a la zona comprendida entre el nivel estático inicial y el final.

Algo que sí se observa con bastante claridad al aplicar este método en el acuífero cárstico de Yucatán es que con base en los resultados obtenidos en los eventos donde el nivel estático se encuentra aproximadamente a la misma elevación, la variabilidad de Sy se debe a la heterogeneidad del acuífero en cuanto a su porosidad, ya que los resultados fueron muy similares en cada uno de estos casos.

Casáres-Salazar, R. (2006), realizó también estimaciones sobre la descarga del acuífero al mar. Como ha sido mencionado, una vez que el agua de lluvia ha recargado al acuífero, ésta fluye por el subsuelo hasta descargar en el mar y lagunas costeras. Las heterogeneidades cársticas (como son las cavidades de disolución), así como los sistemas de fracturas y la geología controlan en forma local el flujo subterráneo.

A continuación, se presentan las estimaciones de descarga del acuífero de Yucatán al mar, realizadas por diversos autores:

1).- Hanshaw y Back (1980) estimaron la descarga media del acuífero de la zona norte de la Península de Yucatán en 8.6 x 10^6 m^3/año por kilómetro de costa.

2).- Sánchez (1999) cita que Weidie (1985), mediante un balance hidrológico, estimó la descarga promedio del acuífero de la Península de Yucatán, también en 8.6 x 10^6 m^3/año por kilómetro de costa. En su investigación, considerando una porción del acuífero del estado de Yucatán (ubicada al NNW), Sánchez (1999) estimó la descarga neta media mediante el análisis de la curva de recesión de los hidrogramas de 25 pozos ubicados en las inmediaciones de la ciudad de Mérida, obteniendo un valor de aproximadamente 7 972 260 m3/d, lo que equivale a 2 909.8749 x 106 m3/año. Considerando que la zona de dicho estudio tiene 208 km de costa, esta descarga equivale a 13.9897 x 10^6 m^3/año por kilómetro de costa.

3).- SARH (1988) reporta, para el estado de Yucatán, un estimado de la descarga al mar de aproximadamente 3 700 x 106 m3/año, lo que considerando que el estado tiene 342 km de costa (INEGI y Gobierno del Estado de Yucatán, 2002), equivale a 10.8187 x 10^6 m^3/año por kilómetro de costa.

4).- Smith *et al* (1999) estimaron la descarga del acuífero a las lagunas costeras del estado de Yucatán mediante el balance de silicatos y sales, empleados como trazadores hidrológicos. Los valores obtenidos son los siguientes:

Celestún, 2.4 x 10^6 m^3/año/km

Chelem, 1.2 x 10^6 m^3/año/km

Dzilam, 0.7 x 10^6 m^3/año/km

Ría Lagartos, 3.9 x 10^6 m^3/año/km

La suma de las descargas a estas lagunas, 8.2 x 10^6 m^3/año/km, es aproximada (en el mismo orden de magnitud) a las demás descargas presentadas en este apartado.

Con base en los resultados de su estudio Casáres-Salazar, R. (2006), estimó la descarga por kilómetro de costa, es decir que w = 1000 m. El espesor del acuífero en la zona de descarga (b) se consideró en 25 m, con base en el espesor del pozo 1A. El gradiente hidráulico se consideró en 45 mm/km, es decir que i = 0.000045, resultado del cálculo correspondiente a los tramos 1 y 2 (con los pozos 1A, 1B, 2B y 2C).

Puesto que en la literatura se reportan valores de la descarga del acuífero al mar comprendidos entre los 8.6 x 10^6 y los 13.9897 x 10^6 m^3/año por kilómetro de costa, se estimaron los valores de K para estos caudales de descarga, lo cual se presenta en la tabla siguiente.

Tabla V.13).- Estimaciones de K con la ley de Darcy.

Q (m^3/año) por km de costa	K (m/d)
8.6 x 10^6	20 943
13.9897 x 10^6	34 069

Es decir, que el valor de K aplicando la Ley de Darcy se ha de encontrar entre 20,943 m/d y 34,069 m/d. Estos valores son aproximados a los reportados por Sánchez (1999) y por Reeve y Perry (1990), de 23,000 m/d y de 44,928 m/d, respectivamente. Más aún, comparando los resultados de K aquí obtenidos con los del modelo de Ferris se observa que este rango de valores se obtiene mediante dicho modelo para un rango de Ss comprendido entre 1.1131 x 10^{-5} m^{-1} y 4.9 x 10^{-5} m^{-1}, valores que corresponden a roca con n = 0.3 y al valor mínimo de grava arenosa densa, respectivamente, lo cual concuerda con las observaciones de campo durante la perforación de los pozos.

La zona costera es donde descargan todas las aguas subterráneas que fueron infiltradas en tierras altas provenientes de la precipitación pluvial, las descargas de aguas residuales en áreas urbanas y también de granjas porcícolas, sitios de disposición de residuos a cielo abierto, así como de fertilizantes y otras sustancias químicas utilizadas en la actividad agropecuaria, como se muestra en la siguiente figura:

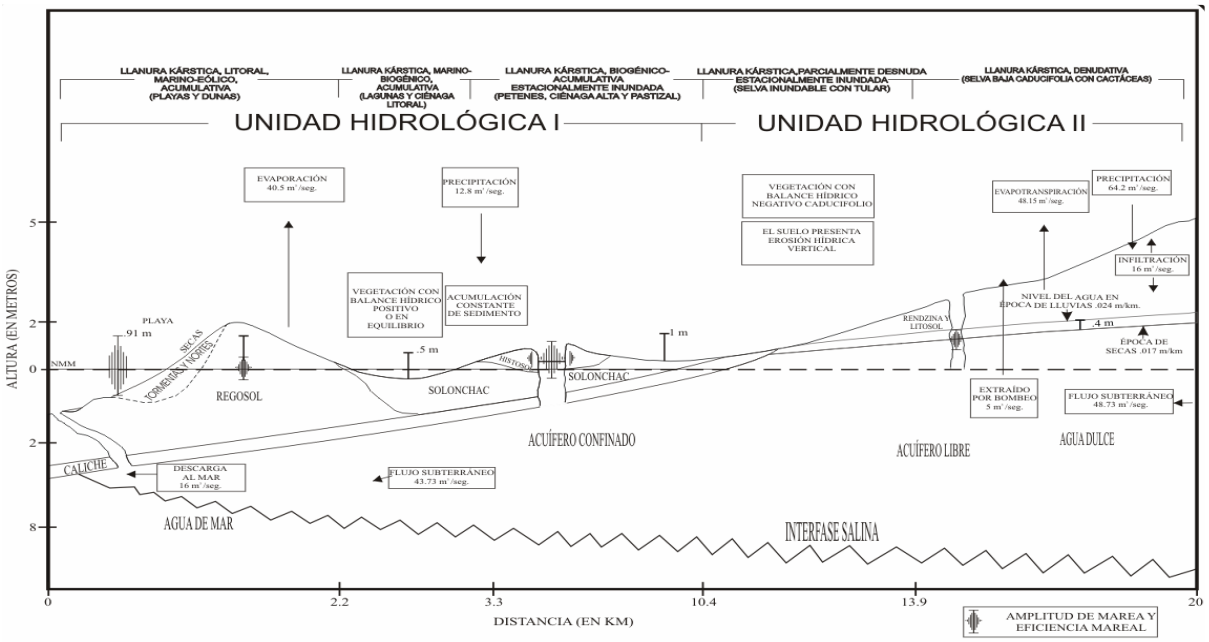
En toda esta área, los períodos de recarga y descarga del acuífero provocan oscilaciones estaciónales de su nivel de agua. Se abate durante el estío y asciende durante la temporada de lluvias. La magnitud de la oscilación es de unos cuantos centímetros en la porción norte y centro de la entidad y se influye por las mareas en la franja costera, la evapotranspiración y los cambios atmosféricos. Esto produce variaciones piezométricas diarias y estaciónales desde unos cuantos centímetros hasta varios decímetros. A pesar de su escasa magnitud, estas pequeñas oscilaciones son de una importancia tremenda porque provocan fuertes cambios de la interfase salina (Ward y Wilson, 1974); en consecuencia, producen variaciones importantes en el espesor aprovechable del acuífero, ya que, en respuesta al abatimiento de unos 10 centímetros, la interfase salina asciende 4 metros en el mismo sitio.

Es importante señalar que durante la época de lluvias y principalmente durante los nortes, el agua subterránea que alcanza a las aguas protegidas de la costa vierte una gran

cantidad de nutrimentos primarios, esenciales para la producción biológica como: silicatos, nitratos, nitritos y carbonatos (Herrera, 1988; Valdés, 1988; y Trejo, 1989). Es precisamente este flujo advectivo de agua procedente del acuífero, el que mantiene las bocas de las rías abiertas, ya que, de otro modo, los procesos litorales no tardarían mucho en azolvarlas.

Existe una respuesta en los niveles del acuífero a las diversas perturbaciones, principalmente climáticas, pero también se presentan respuestas en el acuífero por perturbaciones de corto periodo, como son las mareas, sin embargo, las aguas superficiales representadas por la ciénaga del manglar de cuenca con suelos hidromórficos del tipo solonchac, no responden significativamente a las oscilaciones de la marea en áreas sin contacto con el mar, su dinámica puede estar determinada por los vientos locales en el corto periodo y por la precipitación pluvial, la evaporación y por la marcha anual de marea.

Figura V.77).- Perfil costero y dinámica hidrológica.



Por otro lado, la respuesta observada en las fluctuaciones de nivel freático permite clasificar al acuífero subterráneo costero en dos tipos: **1)** un acuífero cárstico litológicamente homogéneo, que en la costa subyace al acuitardo costero, representado por sus expresiones expuestas como son los cenotes y manantiales y **2)** un acuífero edáfico que sobreyace al acuitardo costero, representado por la barra arenosa con suelos tipo regosol y el petén con suelos hidromórficos del tipo histosol.

Un aspecto interesante que se debe notar es que algunos cenotes pueden caracterizarse como lagos cársticos maduros, con respuestas más del tipo de acuífero edáfico como en la duna costera y suelo del petén, ya que, a pesar de estar inmerso en el acuífero, su dinámica es independiente de él y obedece a perturbaciones tales como la precipitación pluvial y la evaporación principalmente en el ciclo anual y en el corto periodo a los vientos locales. El cenote Chulchacá y el Kana son ejemplos de este tipo.

Hernández, L., y colaboradores, en su trabajo sobre la Reserva Geohidrológica del Anillo de Cenotes, y en el caso particular de los cenotes de Yucatán, encontraron que la temperatura

está asociada a la ganancia de calor mediante radiación y a la pérdida de energía debido a los procesos de interacción por convección con las masas de aire frío durante la época de nortes. Por su parte, los valores de conductividad expresan fenómenos de evaporación, disolución de la matriz calcárea, o la intrusión de agua marina.

Estos dos parámetros están relacionados con la estacionalidad climática de la Península de Yucatán. Durante la estación de nortes, que va de diciembre a febrero, todas las variables tienden a ser homogéneas en la columna de agua. Esto se debe a que la interacción con las masas de aire frío rompe cualquier indicio de estratificación en cenotes someros (< 20 m). Así, además de perder calor, la columna de agua se hace homogénea.

En esta época se presentan los menores valores de temperatura que traen aparejados las mayores concentraciones de oxígeno disuelto, el cual es producto de mecanismos de difusión desde la atmósfera. Lo contrario sucede en la estación seca (marzo a mayo) donde la ganancia de calor produce ligeras tendencias a la estratificación térmica en cenotes abiertos, una disminución del oxígeno disuelto y un aumento de la conductividad por efectos de evaporación.

En cenotes profundos (> 20 m) las variaciones por debajo de la capa superficial son mínimas. Esto se pudo observar en los cenotes Xlabom Subim y Ucil. En el primero se observó una capa superficial de 10 m muy variable, alcanzando valores mayores a 32 °C durante el estiaje, mientras que por debajo de esa profundidad la variación fue más ligera y a los 30 m ya no se detectaron cambios entre estaciones ni en la temperatura ni la conductividad.

En las figuras siguientes se presentan los perfiles de temperatura y salinidad de cenotes de la zona cercana a Dzilám de Bravo. Las figuras 9 corresponden a un cenote somero (< 20 m), y las figuras siguientes a un cenote con una profundidad mayor a 20 m. Debido a las características de los cenotes someros, éstos se consideran más bien como aguadas, esto es, cenotes viejos con alta deposición de materia orgánica que limita o impide el intercambio de agua con el acuífero. Esto produce zonas anóxicas en el fondo de estos cuerpos de agua.

Figura V.78).- Ubicación del cenote Xlabon Subim (línea roja).

Figura V.79).- Ubicación del cenote de Chunkanan

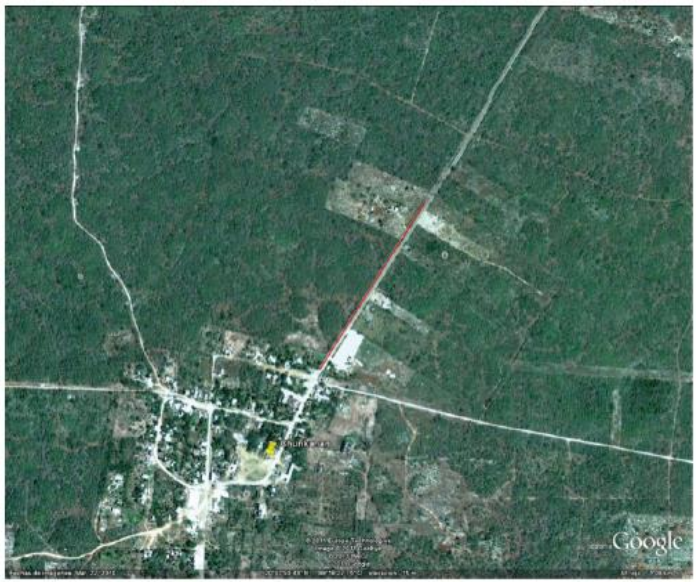


Figura V.80).- Perfiles de temperatura y salinidad del cenote Box Dzonot en marzo de 2010. Hay sólo 2 °C de diferencia entre el fondo (24 °C) y la superficie (26°C). La salinidad fue de 0.48 en todo el cuerpo de agua.

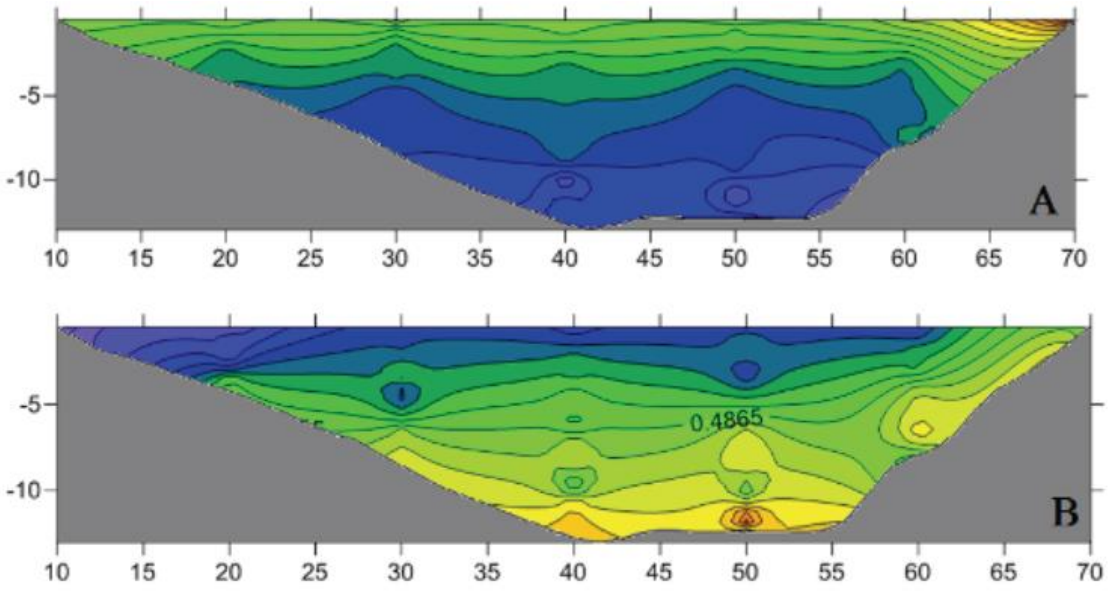
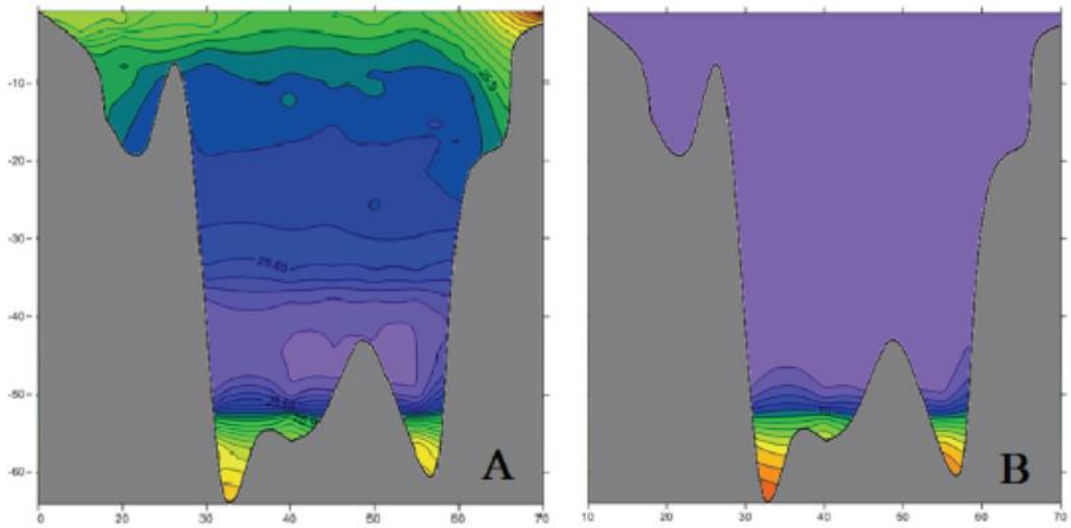
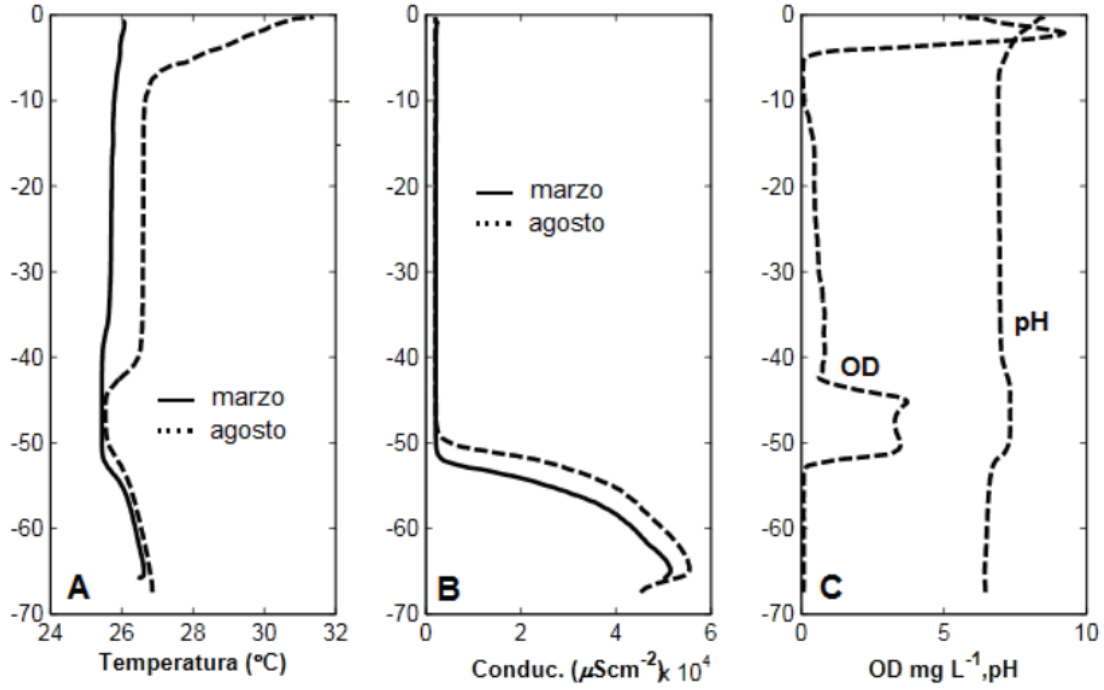


Figura V.81).- Perfiles de temperatura y salinidad del cenote Xlabom Subim profundo. Este fue el cenote con mayor variabilidad vertical en sus parámetros hidrológicos. La temperatura en superficie fue de 26 °C y aumentó en fondo a 26.2 °C con una capa intermedia de menor temperatura (25.4°C). La salinidad fue < 1 en los primeros 50 m y se fue incrementando gradualmente hasta 34 a 65 m.



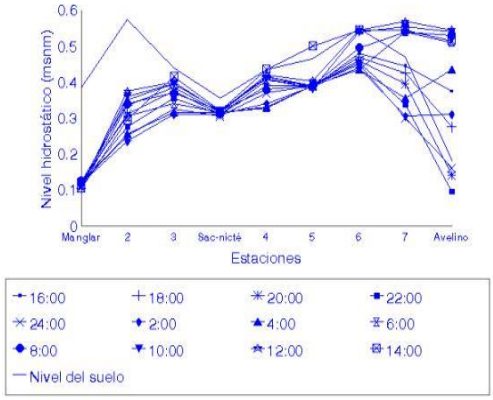
El cenote Xlbom Subim de la figura anterior fue muestreado nuevamente en agosto de 2011 obteniéndose además datos de pH y oxígeno disuelto. Estos datos se presentan en la figura 14 donde se contrastan los datos de temperatura y salinidad entre los meses de marzo y agosto (figs. a-b). En este último mes también se instalaron dos termistores para registro continuo de temperatura. Uno se colocó en superficie y el segundo a 65 m.

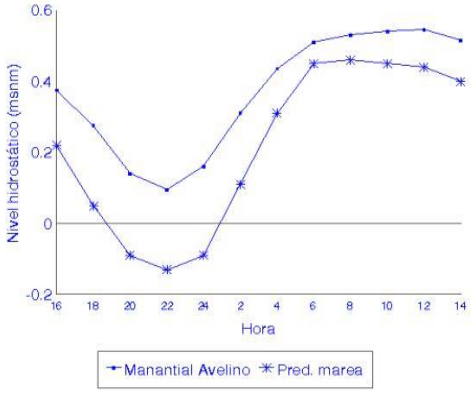
Figura V.82).- Perfiles hidrológicos de Xlabom Subim. A. Perfiles de temperatura durante marzo (línea continua) y agosto (línea punteada). B. Perfiles de conductividad para ambos meses. C. Perfiles de pH y OD para agosto.



Particularizando en el comportamiento hidrológico de algunos petenes (islas de vegetación de manglar, principalmente, con un manantial al centroque vierte agua dulce) del área de estudio (Palmar, Dzulá, Lagartero, Tzintzin, Bolón y Elepetén), en condiciones de marea muerta y de marea viva (cerca de 0.20 m y 0.60 m de amplitud respectivamente), la respuesta de los manantiales emplazados en dichos petenes a la oscilación de marea resultó altamente significativa, de manera inmediata y con una reducción de la amplitud de marea reflejada en el nivel del manantial de un 40 % a un 24 % respectivamente (Figura 3 a y b). En marea muerta el rango de oscilación del nivel hidrostático en el suelo del petén fue muy bajo: Desde más del 97% de reducción en el manglar de ciénaga aledaño hasta el 50 % en el suelo del interior del petén, cercano al manantial. El rango aumentó en marea viva hasta un 95 % de reducción en el manglar así como un 46 % en el petén. Es notorio entonces que a mayor amplitud en el manantial mayor oscilación de la tabla de agua en el suelo del petén y viceversa, excepto en el manglar de ciénaga, donde la dinámica es independiente.

Figura V.83).- a).- Características de los niveles de agua en el perfil ciénaga-manantial en un petén. b).- Efecto de la marea en los niveles de agua de un manantial.





Antiguamente, los petenes fueron explotados para la obtención de madera y chicle, donde los pobladores realizaron canalizaciones en los petenes del occidente del área de estudio, desde el manantial hasta el manglar. El efecto más importante de esta acción es la caída del nivel hidrostático promedio en el manantial y por ende en los suelos del petén también.

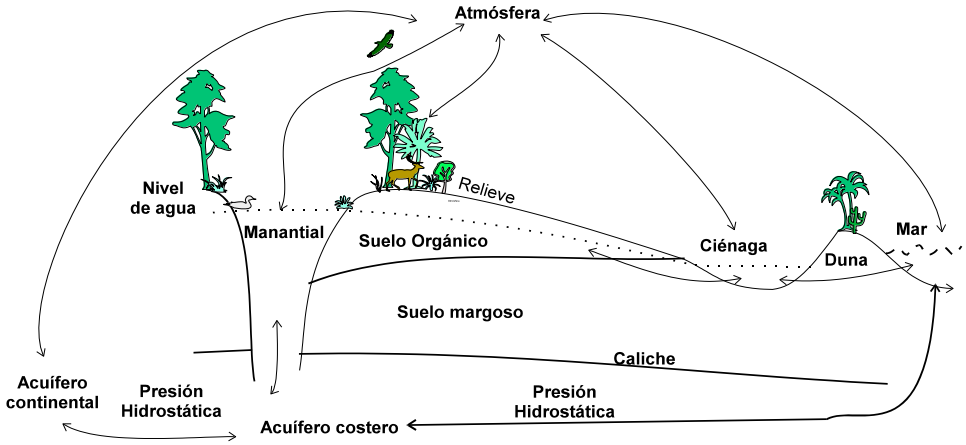
Considerando las observaciones realizadas en los petenes Dzulá, Tzintzín y Lagartero, se realizó el dezasolve del manantial del petén Elepetén pero sin canalizar el manantial hacia la ciénaga, la respuesta del manantial Elepetén a la marea, como se esperaba, es directa e inmediata y destaca el hecho de que después del dezasolve se registró una mayor elevación del nivel hidrostático en el manantial con un 33 %, mientras que la amplitud de la marea fue ligeramente menor.

De esta manera, el efecto de la canalización está representado por un abatimiento del nivel hidrostático mientras que el dezasolve de manantiales sin canalizar denota una mayor elevación del nivel y, por ende, un mayor escurrimiento superficial de agua hacia la ciénaga. Puede considerarse al suelo del petén como un brocal natural que confina las aguas del manantial.

En los petenes canalizados, se observó que en condiciones de marea muerta la dirección de la corriente fue siempre hacia el manantial, con un gasto desde -0.37 hasta -0.56 m3/s

en los momentos de máximo y mínimo nivel de agua en el manantial respectivamente. La salinidad en el manantial osciló entre 16 y 18 o/oo. En condiciones de marea viva, durante la pleamar existió un flujo de agua hacia la ciénaga hasta de 0.37 m3/s y en bajamar el flujo se invierte hacia el manantial hasta en -0.92 m3/s. De esta manera, la salinidad en el manantial fluctúa entre 2 y 23 o/oo durante la pleamar y bajamar respectivamente. En todos los casos el balance de sal siempre fue negativo produciendo una salinización del manto freático.

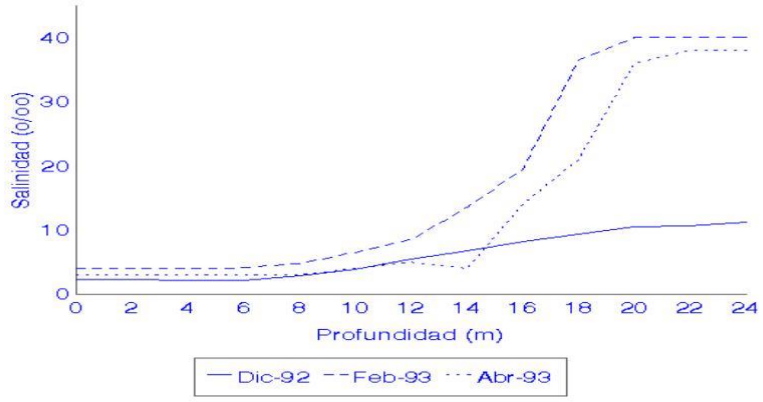
Figura V.84).- esquema de las relaciones hidrológicas de un petén con manantial.



Esquema de las relaciones hidrológicas de un petén con manantial

La oscilación de la salinidad en los manantiales parece estar relacionada con la variación del nivel hidrostático y amplitud de marea, así como a la temporada de observación; de tal forma que en marea muerta en temporada de nortes, el valor de salinidad fue de 0.9 (manantial Avelino, a 2.7 km de distancia de la costa), mientras que en marea viva el valor aumentó hasta 3 o/oo. La interfase salina se aprecia a partir de los -8.0 msnm de profundidad, cuando la salinidad comienza a incrementarse notablemente y se considera como el límite superior de la zona de mezcla. En temporada de nortes, el límite inferior de la interfase es imperceptible y pareciera que se prolonga hasta más de los -24.0 msnm de profundidad, presentando una salinidad promedio de 5.9 o/oo y un intervalo entre 2.2 y 11.2 o/oo (superficie y fondo respectivamente). En temporada de secas, el límite inferior de la zona de mezcla se detectó a los -18.0 msnm de profundidad, con una salinidad media de 13.4 o/oo y un rango entre 3 y 38 o/oo en superficie y fondo (figura 4).

Figura V.85.- Cambios de la interfase salina por temporada en un manantial.

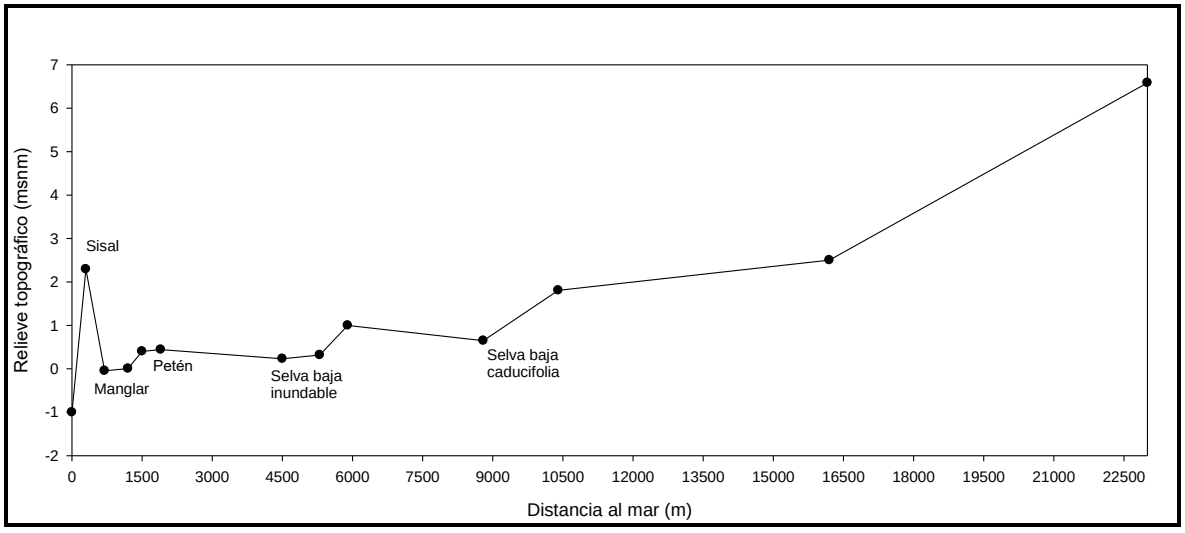


Las conexiones funcionales entre los flujos de agua dulce, viento, la acción de la marea, el régimen climático y las fuerzas oceánicas resultan en un patrón particular de circulación y transporte de materiales que caracterizan a un humedal costero. Entre los principales factores que “modulan” el patrón de energía, que controla la capacidad de carga de los ecosistemas costeros, se encuentran la profundidad de la columna de agua, la salinidad y la temperatura, entre otras (Mitsch y Gosselink, 1993).

Para analizar las características hidrológicas de los paisajes costeros se instaló un sistema de control geodésico (Batllori, 1992), que permitiera tener una referencia precisa al nivel medio del mar, de 11 transectos perpendiculares distribuidos en la costa de Yucatán (Celestún, Palmar, Sisal, Chuburná, Progreso, San Crisanto Este, San Crisanto Oeste, Chabihau, Santa Clara, Dzilam de Bravo, Río Lagartos y El Cuyo). En estos transectos se incluyeron diferentes paisajes, como la selva baja caducifolia (SBC), selva baja inundable (SBI), petén (PET), manglar de cuenca (MC), manglar de borde (MB), ciénaga (CIE) y lagunas (LAG). En la Figura 1 se presenta, a manera de ejemplo, el perfil fisiográfico de Sisal, con información topográfica, paisajes y distancia al mar (Batllori E, y Febles J.L. 2006).

Se consideraron 67 puntos de monitoreo hidrológico, establecidos a través de diferentes proyectos desde 1990 hasta 2005, en los cuales se determinó los valores de profundidad, salinidad y temperatura del agua y nutrientes escenciales. Se presentan promedios totales por transecto, así como promedios totales por unidad de paisaje (SBC, SBI, PET, etc.) representados en cada transecto. Los valores se agruparon en dos temporadas con relación a los periodos de inundación (septiembre-febrero) y de secas (marzo-agosto) respectivamente. El periodo de septiembre a febrero corresponde con el final de la temporada de lluvias y la temporada de “nortes” (otoño-invierno), cuando se registran la mayor descarga de agua subterránea al sistema costero y la mayor elevación en el nivel de marea oceánica (Perry et al. 1989; Marín, 1990; Batllori, 1995).

Figura V.86).- Perfil fisiográfico del transecto Sisal, Yucatán.



En general existe un gradiente espacial de menor a mayor salinidad desde la selva baja inundable hasta la ciénaga con manglar; así mismo, podemos observar dos temporadas principales, de secas e inundación.

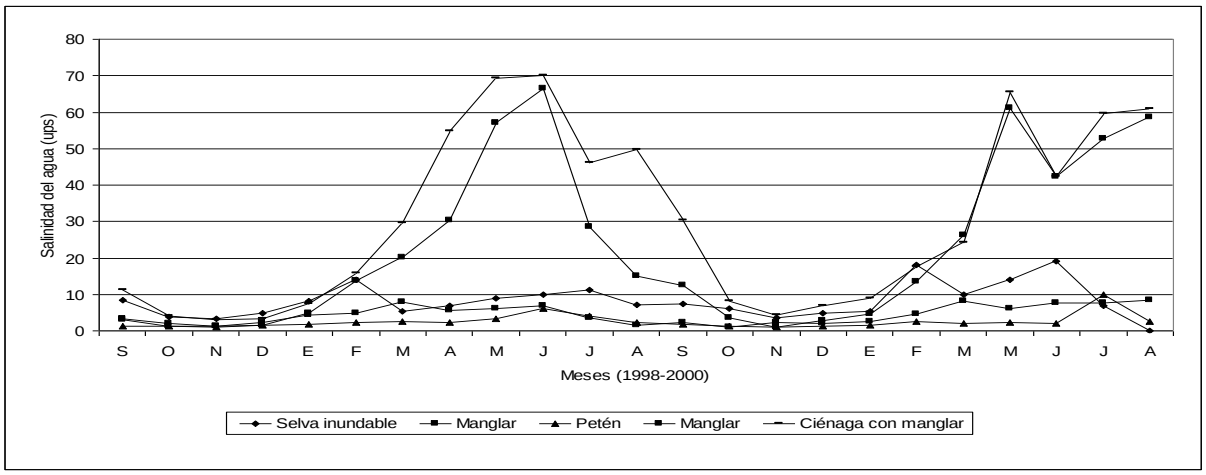
Como ejemplo se presenta la siguiente figura donde podemos observar la fluctuación mensual de la salinidad (ups), nivel de agua (msnm) y temperatura del agua (^{o}C) en los humedales costeros del transecto de Sisal, de 1998 a 2000.

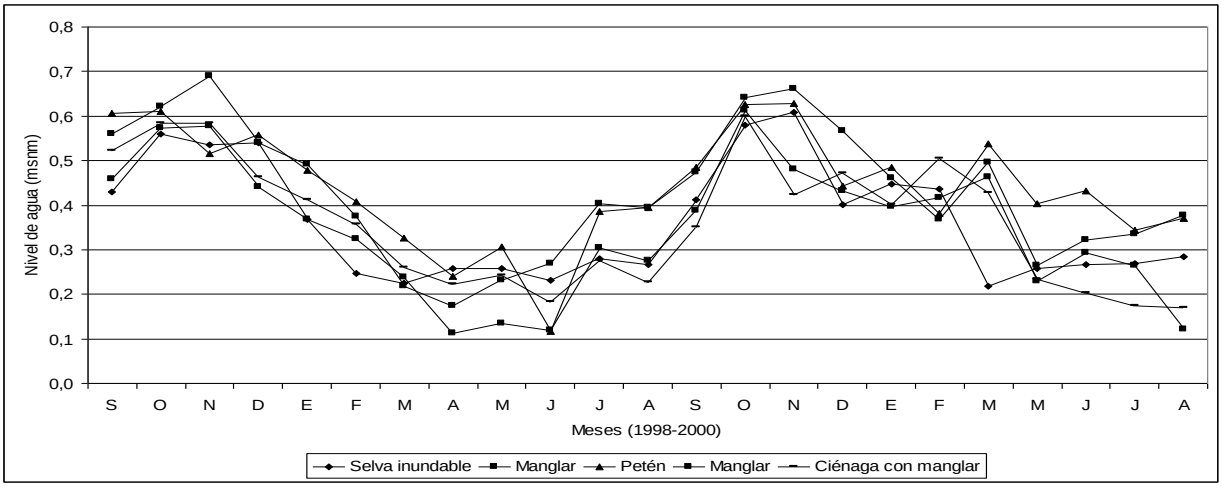
En la selva inundable y el petén, la salinidad del agua se mantiene por debajo de 10 ups prácticamente todo el tiempo, aunque se nota un ligero aumento desde marzo hasta agosto, en los dos años.

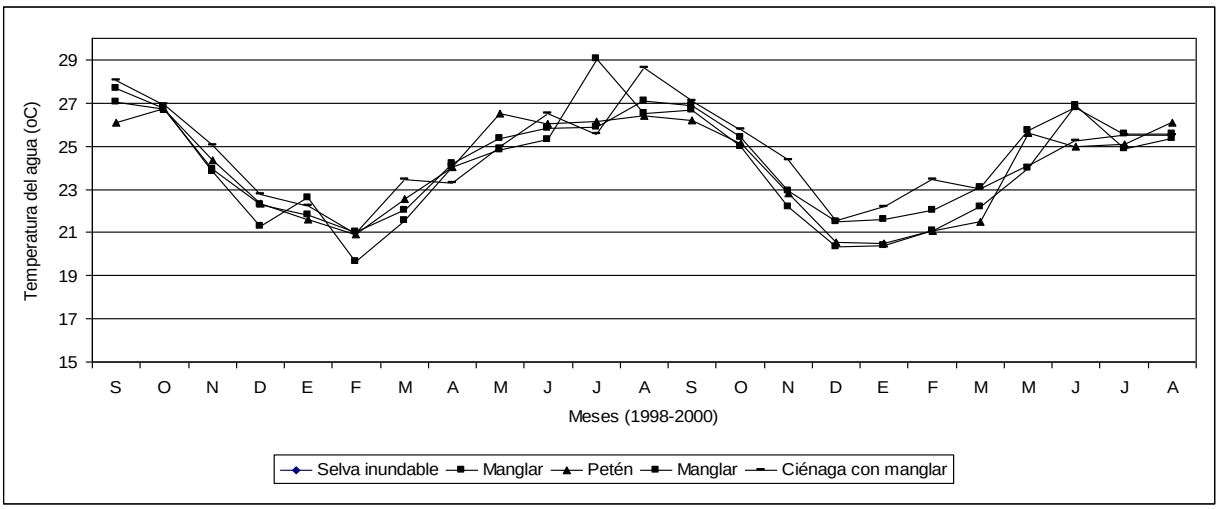
En el manglar y la ciénaga con manglar la salinidad se mantiene por debajo de 10 ups de septiembre a enero de 1999 y luego aumentó gradualmente a partir de febrero hasta alcanzar el valor máximo de 60 a 70 ups en mayo y junio del mismo año. A partir de agosto y septiembre la salinidad desciende, manteniéndose por debajo de 20 ups hasta febrero del siguiente año, para luego volver a incrementarse durante la siguiente temporada de secas. Se observa la menor salinidad entre septiembre y febrero y la mayor salinidad entre marzo y agosto. Al respecto, podemos notar que los niveles de agua más bajos se registraron entre marzo y junio, mientras que los máximos fueron entre septiembre y febrero.

El análisis muestra una asociación inversa significativa entre la salinidad y la profundidad dela columna de agua en el manglar, y una relación directa entre la salinidad y la temperatura. Sin embargo, se registraron diferencias significativas en la salinidad, profundidad y temperatura del agua entre temporadas de inundación (septiembre-febrero) y de secas (marzo-agosto) en todos los paisajes (selva inundable.

Figura V.87).- Variación mensual de la salinidad, nivel de agua y temperatura en los humedales costeros de Sisal, Yucatán (1998-2000).

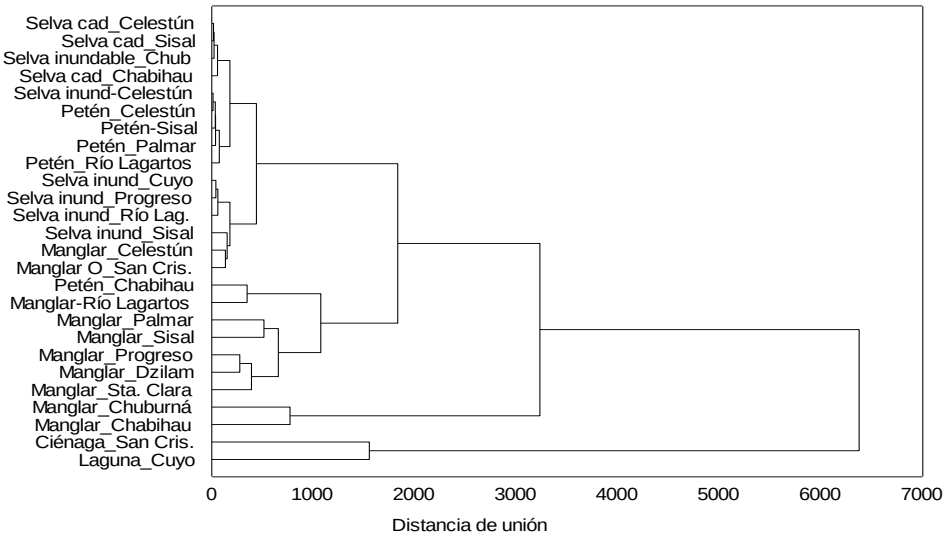






En el caso de la salinidad de los paisajes al interior de cada transecto, como en el caso de Celestún, no existen diferencias significativas entre la SBI y el Peten, con altos valores de correlación, así como tampoco hay diferencias significativas entre MC, Mb y Lag. De esta manera, en el dendrograma de salinidad del agua por paisaje de los diferentes transectos se observa claramente la agrupación de todos aquellos puntos de monitoreo cuya salinidad promedio total es menor a 5 ups (oligohalinas), asociados a las aguas subterráneas de la SBC y de los manantiales distribuidos en forma de parches (Pet), dentro de una matriz de manglar de cuenca (MC). Intercalados en éstos, se distribuye un área con un gradiente de aguas mesohalinas (mayor a 5 ups, y menor a 10 ups) asociados a la selva inundable con sabana (SBI). Por arriba de estos valores el paisaje dominante es el manglar de cuenca (MC) de tipo polihalino y euhalino (mayor de 10 ups, y menor de 40 ups). En zonas de ciénagas, como en Chuburná, San Crisanto, Chabihau y el Cuyo se alcanzan salinidades mayores a 40 ups (hiperhalino).

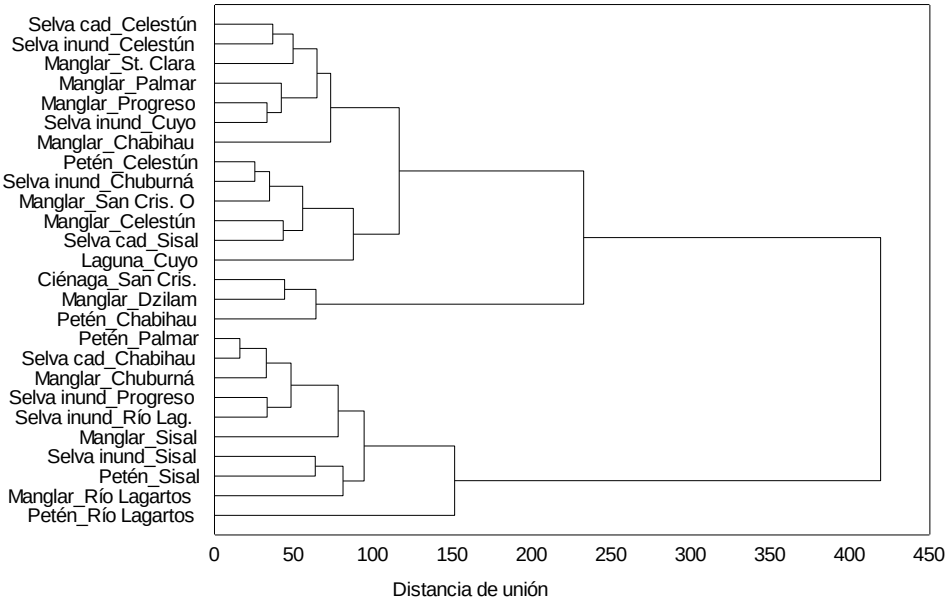
Figura V.88).- Dendrograma de salinidad por paisaje, humedales costeros de Yucatán.



De igual forma se observa en el dendrograma de temperatura agrupaciones con valores promedio menores a 26 ºC asociadas a petenes, selvas bajas y medianas así como selvas inundables, donde la salinidad es menor. Así mismo, los sitios donde se presentan temperaturas promedio mayores a 30º C son en las ciénagas de San Crisanto, Chabihau y Dzilám (áreas hiperhalinas).

Con relación a la profundidad se observó de manera general que los valores fueron más someros (menores a 20 cm) en la selva baja caducifolia (SBC) y selva inundable (SBI), seguidos por el manglar de cuenca (MC), petenes (Pet) y lagunas con profundidades mayores a 50 cm.

Figura V.89).- Dendrograma de temperatura por paisaje, humedales costeros de Yucatán. Distancia euclidiana (Unión completa).



De esta manera se observa una fuerte asociación entre la selva baja caducifolia (SBC) y la selva baja inundable (SBI), y en particular con los petenes (Pet) asociados a manantiales dispersos (anillo de cenotes) en una matríz de manglar de cuenca, donde los valores máximos de inundación no sobrepasaron la isolínea de altitud de 1.0 msnm.

Se caracterizan por sus aguas someras, oligohalinas y mesohalinas, temperaturas cálidas y una dinámica independiente de la marea, excepto en los manantiales y cenotes. Estos paisajes se definen como áreas palustres. Los manglares y las lagunas se caracterizan por presentar su máxima inundación de septiembre a febrero, asociada al incremento del nivel de la marea y con características polihalinas, euhalinas e hiperhalinas. En el manglar de borde, las lagunas y ciénaga con contacto permanente con el mar, el nivel de agua es mayor y oscila en relación con la marea, con variaciones de salinidad muy marcadas. Se definen como áreas estuarinas.

En general, la zona oriental del área, y que incluye sólo los paisajes de manglar y laguna, se constituye como una zona muy cálida – hiperhalina, mientras que el extremo occidental y sur oriental se constituye como una zona cálida y polihalina.

En términos de la calidad de agua y considerando los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos del agua a través de todos los transectos y por tipo de vegetación, se observa que la concentración de fosfatos (índice que muestra la presencia de materia orgánica) es mayor en los petenes (0.48 mg/l) que en el manglar (0.08 mg/l), selva inundable y baja caducifolia (0.06 mg/l respectivamente); por el contrario el oxígeno disuelto es menor en los petenes (1.74 ml/l) y aumenta en el manglar (1.83 ml/l), selva inundable y caducifolia (2.85 y 2.10 ml/l respectivamente). Los nitratos se encuentran en mayor concentración en la selva inundable (2.40 mg/l) y selva baja caducifolia (1.62 mg/l) y disminuye en petenes (0.95 mg/l) y manglar (0.32 mg/l). La alcalinidad por carbonato de calcio es mayor en el manglar y en la selva inundable (450.5 y 426.5 mg/l respectivamente) y disminuye en los petenes y en la selva baja caducifolia (384.5 y 342.7 mg/l respectivamente). La dureza es mayor en el manglar (3331.8 mg/l) y disminuye gradualmente hasta la selva baja caducifolia donde se registra la más baja (653.3 mg/l). La conductividad eléctrica del agua aumenta desde la selva caducifolia (1,189.5 mmhos/cm) hasta el manglar (10,821.6 mmhos/cm)

En el manglar se registran los mayores rangos de variación en la concentración de nitritos (.0 a 1.0 mg/l), silicatos (0.49 a 46.0 mg/l), alcalinidad (226 a 1230 mg/l), dureza (680 a 14900 mg/l), pH (6.9 a 8.5) y conductividad eléctrica (1100 a 46000). La mayor variación en la concentración de fosfatos se registra en los petenes (0.01 a 4.14 mg/l), de amonio en la selva inundable (0.49 a 9.13 mg/l) y de oxígeno disuelto y nitratos en la selva baja caducifolia (de .0 a 8.8 ml/l y de 0.02 a 6.77 mg/l respectivamente).

Podemos observar que en general los niveles de fosfatos, nitratos y nitritos no exceden los valores para consumo humano; no obstante, se encuentran ligeramente por encima de los niveles permisibles para la protección de la vida acuática. Esto en parte puede ser un reflejo de la contaminación ocasionada por las actividades humanas en tierras altas y en la misma zona costera. En relación a los índices para consumo humano, la elevada salinidad y conductividad eléctrica del agua son los principales factores limitantes.

Tabla V.14).- Características fisico – químicas del agua de los humedales costeros considerando los 11 transectos mencionados anteriormente.

Manglar					
Variable	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	N
Oxigeno (ml/l)	1,83	2,11	0,00	6,70	22
Fosfatos (mg/l)	0,08	0,13	0,00	0,47	24
Nitratos (mg/l)	0,32	0,82	0,00	3,62	24
Nitritos (mg/l)	0,06	0,21	0,00	1,00	24
Amonio (mg/l)	1,26	1,09	0,13	4,70	24
Silicatos (mg/l)	14,63	11,03	0,49	46,00	24
Ph	7,71	0.45	6,90	8.50	24
Alcalinidad (mg/l)	450,50	226,05	226,00	1230,00	22
Dureza (mg/l)	3331,82	4193,89	680,00	14900,00	22
Conductividad (micromhos/cm)	10821.67	13130,36	1100,00	46000,00	24
Peten					
Oxigeno (ml/l)	1,74	1,60	0,50	5,08	8
Fosfatos (mg/l)	0,48	1,37	0,01	4,14	9
Nitratos (mg/l)	0,95	1,91	0,00	5,96	9
Nitritos (mg/l)	0,11	0,15	0,00	0,45	9
Amonio (mg/l)	0,95	0,61	0,20	2,39	9
Silicatos (mg/l)	13,52	7,11	0,46	22,61	9
Ph	7.70	0.27	7,20	8.09	9
Alcalinidad (mg/l)	384,50	66,43	306,00	520,00	8
Dureza (mg/l)	927,50	323,89	560,00	1500,00	8
Conductividad (micromhos/cm)	2011.67	741.22	1075,00	3220,00	9
Selva inundable					
Oxigeno (ml/l)	2,85	2,27	0,00	5,70	7
Fosfatos (mg/l)	0,06	0,04	0,00	0,11	7
Nitratos (mg/l)	2,40	2,38	0,00	5,37	7
Nitritos (mg/l)	0,03	0,03	0,00	0,07	7
Amonio (mg/l)	2,34	3,10	0,49	9,13	7
Silicatos (mg/l)	9,71	6,55	4,07	23,44	7
Ph	7,54	0,32	7,10	8,00	7
Alcalinidad (mg/l)	426,50	183,59	192,00	790,00	7
Dureza (mg/l)	888,57	473,41	460,00	1680,00	7
Conductividad (micromhos/cm)	1839,29	1974,94	600,00	6250,00	7

Selva Baja Caducifolia					
Oxigeno (ml/l)	2,10	2,47	0,00	8,80	11
Fosfatos (mg/l)	0,06	0,09	0,00	0,24	12
Nitratos (mg/l)	1,62	02,13	0,02	6,77	12
Nitritos (mg/l)	0,03	0,03	0,00	0,10	12
Amonio (mg/l)	1,11	0,74	0,18	2,57	12
Silicatos (mg/l)	12,76	4,60	2,24	17,48	12
Ph	7,54	0,23	7,10	7,89	12
Alcalinidad (mg/l)	342,75	113,13	152,00	540,00	12
Dureza (mg/l)	653,33	208,08	400,00	1000,00	12
Conductividad (micromhos/cm)	1189,55	447,12	500,00	1850,00	11

De acuerdo con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua publicados en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989, el nivel máximo permisible de fosfatos para el consumo humano y protección a la vida acuática es de 0.1 y 0.002 mg/l, para los nitratos de 5.0 y 0.04 mg/l y para los nitritos de 0.05 y 0.002 mg/l respectivamente. Para el oxígeno disuelto el nivel mínimo admisible es de 4.0 y 5.0 mg/l respectivamente.

Herrera-Silveira (1993), menciona que el régimen hidrológico de las lagunas costeras varía sustancialmente a través del año. Los cambios estacionales de las condiciones del medio ambiente se relacionan con los tiempos de residencia, flujos de agua y materiales que le dan a la hidrología de cada laguna un patrón de comportamiento distintivo.

En la laguna de Celestún durante la temporada secas los rangos altos de evaporación, bajo flujo de agua subterránea y cambios en el nivel medio del mar, limitan los flujos hacia el mar (1.1×10^6 m^3/h) y favorece tiempos de residencia moderados (190 días).

La temporada de lluvias se caracteriza por un incremento en la descarga de agua subterránea (2.5×10^6 m^3/h) y bajos tiempos de residencia (menos de 150 días).

En los "nortes" se reducen los flujos de agua subterránea (0.6×10^6 m^3/h). En adición, durante el mismo período, los altos niveles del mar formados como consecuencia de los vientos dominantes del norte, favorecen los más altos tiempos de residencia de las masas de agua (mayor de 250 días). Durante este período la columna de agua de la zona interna muestra un color rojo característico debido a los taninos acumulados los cuales no son exportados durante esta estación (Herrera-Silveira,1993).

En la Laguna de Río Lagartos, debido a su longitud, muestra los más altos tiempos de residencia de casi cuatro años, lo cual favorece sus condiciones hipersalinas. La salinidad observada en la zona interna de la laguna de Chelem durante al menos la estación seca sugiere que el tiempo de residencia es también alto, pero es más bajo (200 días) que en Río Lagartos. La laguna de Dzilam muestra un patrón de comportamiento similar al observado en Celestún, pero con tiempos de residencia más altos y flujos de agua más bajos. Estas son características muy importantes que se relacionan con los procesos de acumulación de sustancias tóxicas producto de la descomposición de la materia orgánica y aguas residuales de las áreas urbanas.

Los procesos involucrados en el transporte de material tales como afluencia de agua dulce, mareas y vientos, muestran que las formas inorgánicas dominan durante la estación lluviosa, material particulado durante los nortes y probablemente compuestos orgánicos durante el período seco.

El sistema actúa como un almacén de NO_3 y SRSi pero como una fuente de NH_4 y SRP, éste último podría ser el nutriente limitante debido a que por la alta alcalinidad (2.3 a 3.7 meq/l) del agua subterránea y las elevadas concentraciones de carbonatos en los sedimentos, se favorece su precipitación física al fondo (Trejo, 1988).

Independientemente de las variaciones estacionales del balance de nutrientes en las lagunas, éstas deberían ser consideradas como exportadores de nutrientes (Herrera-Silveira y Comín, 1994).

La columna de agua en las lagunas no muestra estratificaciones, como resultado de los procesos de mezcla debido a la baja profundidad media (menor de 1.5 m) y las corrientes generadas por el viento. El rango anual de la temperatura del agua es de 7 a 11 oC con los más altos valores entre junio y agosto (31.4 oC) y los más bajos durante enero-febrero (22.4 oC). La diferencia máxima entre la temperatura del aire y del agua ocurre durante la temporada de lluvias, debido a las entradas de agua subterránea con temperaturas más bajas que las encontradas ene l agua de la laguna (Herrera-Silveira, 1994c).

Un gradiente horizontal de salinidad ha sido observado a través del año en cada laguna. En Celestún fue entre 10 a 37 o/oo, en Chelem de 29 a 42 o/oo, Dzilam entre 25 y 36 o/oo y Río Lagartos de 30 a 180 o/oo, Los valores promedio del pH muestran un comportamiento alcalino (8.3) casi durante todo el año, pero estos valores pueden descender durante la temporada de secas debido a que los procesos de descomposición son favorecidos por las condiciones hidrológicas (Herrera-Silveira, 1993; Herrera-Silveira, et. al., 1995).

Las concentraciones de oxígeno disuelto oscilan entre 1 mg/l en áreas de las lagunas con poblaciones densas de macrofitos durante las primeras horas de la mañana, hasta 8 mg/l en las mismas áreas y en las bocas durante el paso de sistemas frontales de viento.

En relación con los niveles de nutrientes, los nitratos y SRSi se observan en altas concentraciones respecto al amonio y SRP, debido a que la descarga de agua subterránea es rica en estos nutrientes (Herrera-Silveira, 1994). La concentración de los nutrientes muestra una variación estacional de acuerdo con el patrón climático. Durante la temporada de lluvias los nitratos (15-40 μmol) y SRSi (100-350 μmol) se incrementan debido a que la descarga de agua subterránea también se incrementa. Asimismo, durante la temporada de secas y "nortes la remineralización y procesos biológicos favorecen altos niveles de amonio (10-24 μmol) y SRP (5-9 μmol).

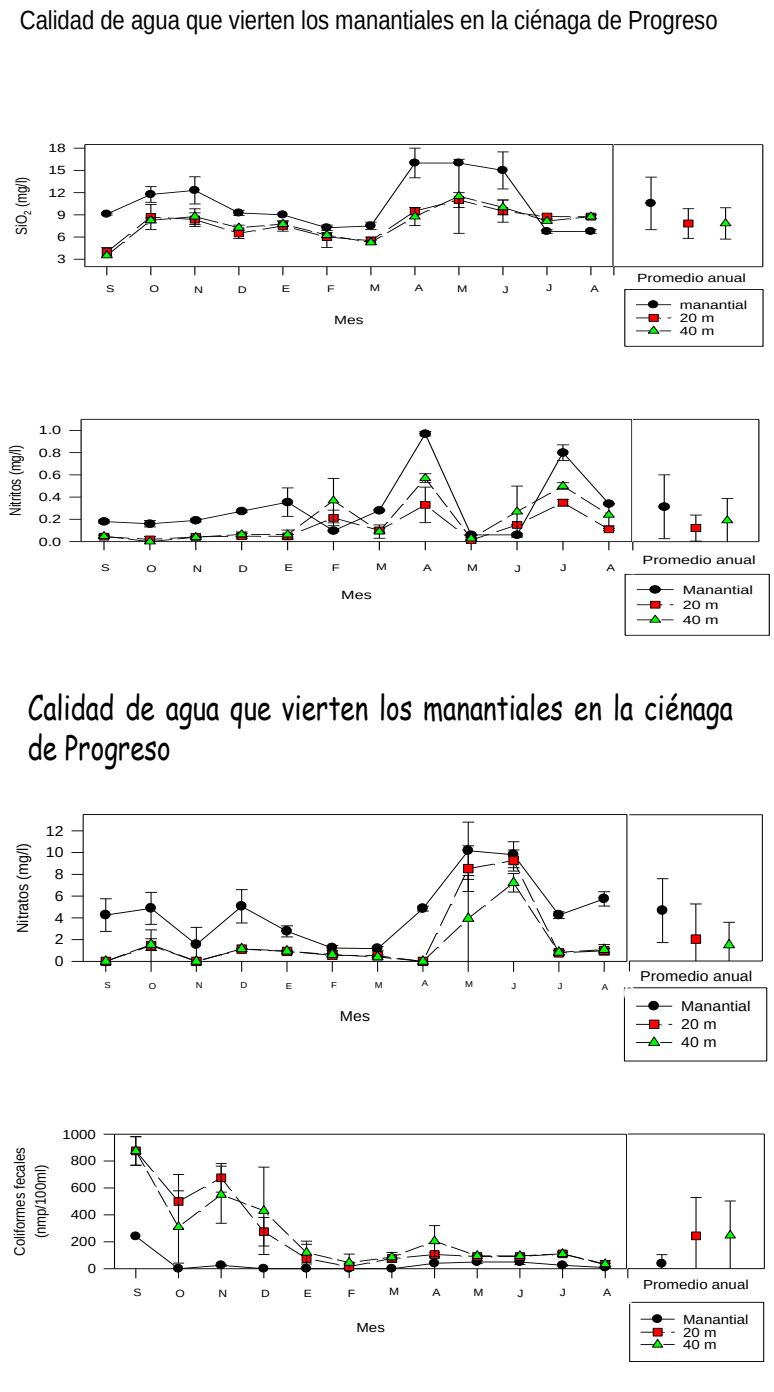
De acuerdo con la distribución espacial de algunos parámetros hidrológicos de cada laguna, se pueden observar diferentes zonas. En Celestún pueden ser reconocidas tres zonas. La parte interna de la laguna se caracteriza por baja salinidad y elevada concentración de nitratos y SRSi. Claramente esto se relaciona con la descarga de agua subterránea. Como se esperaría la zona cercana a la boca y en mayor comunicación con el mar presenta elevada salinidad y baja concentración en nutrientes. La zona en el medio de la laguna presenta valores intermedios de salinidad y nutrientes; no obstante se detectaron concentraciones más altas de SRP y amonio que en el resto de la laguna como consecuencia del comportamiento no conservativo de estos componentes probablemente de acuerdo a procesos biológicos y aguas residuales de las áreas urbanas cercanas (Herrera-Silveira, 1994).

Esta zonación representa un patrón típico encontrado en lagunas costeras con una entrada para intercambio de agua con el mar y descargas de agua dulce ocurriendo en la parte interna (KJerfve, 1986; Guelorget y Perthuisaot, 1992).

En Chelem, la parte interna de la laguna se caracteriza por presentar una alta salinidad y bajos niveles de nitratos y SRSi. Claramente, esto se ve afectado por la evaporación y las actividades en el Puerto. La zona cercana al mar se caracteriza por tener salinidades cercanas a la marina y baja concentración de nutrientes. La zona de en medio se caracteriza por tener una salinidad desde marina hasta hipersalina, asimismo las concentraciones de SRP y amonio fueron más altas que en el resto de la laguna.

En la siguiente figura se muestra la calidad del agua que brota de un manantial en la ciénaga de Progreso en un ciclo anual y 2 puntos más de observación a 20 y 40 metros de distancia del ojo de agua. Es posible observar que del manantial brotan grandes cantidades de nutrientes como silicatos, nitritos, nitratos, así como también bacterias coliformes, particularmente en temporada de lluvias. Muchos materiales contaminantes provenientes del interior del estado son vertidos ala zona costera por este mecanismo.

Figura V.90).- Calidad de agua que vierten los manantiales en la ciénaga de Progreso.



Respecto a Dzilam, solo se aprecian dos zonas, una representada por las áreas internas de ambos brazos, caracterizada por bajas salinidades, y la zona media cercana al mar la cual muestra un comportamiento marino en términos de la variación en la salinidad y nivel de nutrientes.

Las diferencias hidrológicas observadas estacionalmente (secas, lluvias y nortes) y entre zonas de cada laguna (interior, media y cercana al mar) revelan patrones espaciales y estacionales. Estas diferencias se relacionan con la intensidad y frecuencia de factores externos como lluvia, vientos, sistemas frontales y procesos biogeoquímicos tales como la producción primaria, mineralización, comportamiento conservativo y no conservativo de los nutrientes, fertilización y bioturbación. Si estos patrones se repiten año tras año puede ser inferido un proceso de microsucesión (Herrera-Silveira, 1993).

Tabla V.15).- Principales características químicas en las lagunas costeras del norte del estado de Yucatán. Las tres primeras están dentro del anillo de cenotes.

	Celestún	Chelém	Dzilam	Río Lagartos
Salinidad (o/oo)				
secas	28.5	38.3	33.6	56.8
lluvias	21.5	32.1	28.1	50.7
nortes	24.2	35.7	31..7	55.4
Nitratos (mg/l)				
secas	3	1.74	0.99	1.33
lluvias	6.2	4.11	2.56	1.96
nortes	4.5	2..1	1.41	1.26
Fosfatos (mg/l)				
secas	1.68	0.36	1..31	0.34
lluvias	0.58	0.89	0.79	1.57
nortes	2.65	1.65	2.11	1.07
Amonio (mg/l)				
secas	8.05	6.7	6.1	9.6
lluvias	20.1	8.4	4.8	16.6
nortes	37.4	4.9	3.5	19.2
Silicatos (mg/l)				
secas	31..2	15.2	49.4	
lluvias	144.4	102.4	29.8	33.4
nortes	47.9	34.1	27.1	8.9

Fuente: Herrera-Silveira, manuscrito 1996

Es evidente que las lagunas costeras de Yucatán son sistemas donde los factores externos como lluvia, marea, descarga de agua subterránea y sistemas frontales, juegan un papel fundamental en los gradientes respecto a características hidrológicas y biológicas. La estacionalidad y distribución de la descarga de agua subterránea determina el gradiente de salinidad el cual es un factor clave en la distribución y organización de los productores primarios, de acuerdo con la disponibilidad de nutrientes y material particulado.

Existe una significativa asociación entre la variación de algunos parámetros hidrológicos como la salinidad, nitratos y silicatos con la intensidad y frecuencia de los factores externos. En cuanto a los productores primarios, existen diferencias entre las lagunas respecto al

grupo que domina las características funcionales de los sistemas. En la laguna de Celestún y Dzilam es clara la alternancia entre fitoplancton, macroalgas, pastos marinos y manglares, donde las macrofitas sumergidas representan la comunidad dominante.

En el caso de la laguna de Chelem, aparentemente el fitoplancton y los macrofitos son los más importantes debido al bajo desarrollo del bosque de manglar, como una consecuencia del impacto de las actividades humanas como la construcción de carreteras las cuales reducen el intercambio de agua entre los diferentes subsistemas. En el caso de Río Lagartos, el tamaño de la laguna favorece la diferenciación en subsistemas, los cuales están dominados por macrofitos sumergidos, otros por fitoplancton y los últimos por microfitobentos. La estructura del bosque de manglar ha sido alterada como consecuencia de la explotación salinera.

Independientemente de que solo la laguna de Dzilam puede ser considera una laguna costera pristina, el grado de conservación de las otras es bueno, considerando que en ningún caso la concentración de nutrientes es elevada, y la producción primaria total no es controlada por un grupo simple, sino que una alta diversidad de productores primarios puede ser observada a través de todo el año y diferentes tejidos tróficos pueden establecerse favoreciendo una alta producción secundaria. Esto significa que en estos someros ecosistemas tropicales las fuerzas climáticas externas y el origen geomorfológico, juegan un importante papel en la hidrología y patrones de distribución de las comunidades de productores primarios.

Para mantener el potencial productivo alto y el buen estado de salud de las lagunas costeras de Yucatán, es indispensable realizar un Plan de manejo y uso integral de la tierra y el agua y de las áreas circundantes en donde se presenta una ocupación humana intensa. El uso de los recursos naturales debe ser regulado a través del establecimiento de áreas adentro de cada laguna de acuerdo con cada actividad; por ejemplo, conforme a la caracterización ecológica presentada, sugerir los mejores sitios y estación del año para el turismo y para cada pesquería (camarón, caracol, langosta y peces), pero considerando en todos los casos sitios protegidos preservados como banco de genes y programas de investigación.

VI).- CONDICIONES SOCIO - ECONÓMICAS DEL LA ZONA GEOHIDROLÓGICA DEL ANILLO DE CENOTES. REGIÓN METROPOLITANA DE MÉRIDA.

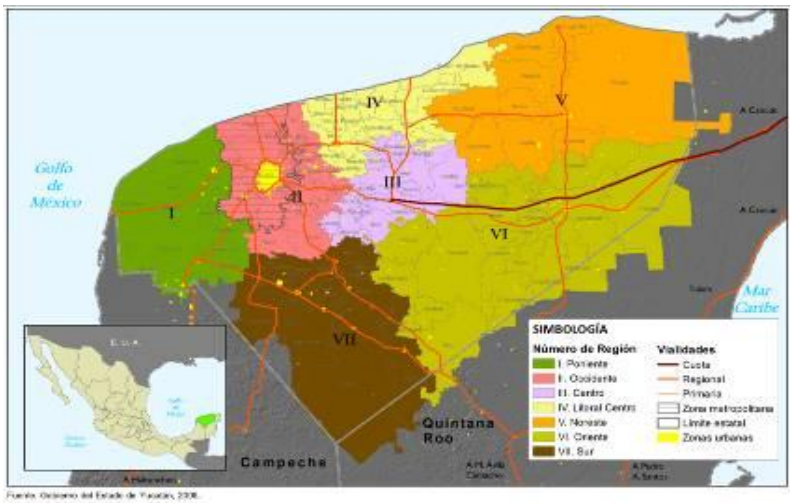
El estado de Yucatán está dividido en su territorio por 7 regiones, de todos éstos sólo existe una zona metropolitana alojado en la región Noroeste, la cual consta de 19 municipios, de ellos la Secretaría de Desarrollo Social selecciona 5 como parte de la *Zona Metropolitana de Mérida*, estos son: **Conkal, Kanasín, Mérida, Ucú** y **Umán**, sin embargo, por su interacción y la expansión de la Zona Metropolitana, en este estudio se anexan 2 Municipios más que son: **Progreso** y **Tixpéhual**.

En cuanto a la población, para el año 2010, la suma total de la región Noroeste es de: 1,126,735, de ello Mérida representa el 73.7% con 830,732 habitantes, seguido por Kanasín con 78,709 habitantes, representando el 7% de la región, en tercer lugar está el Municipio de Progreso, único municipio costero de la Zona Metropolitana y el más importante de esta categoría en el Estado, en ella residen 53,958 habitantes, representando una tasa del 4.8% del total de la Región, le sigue el Municipio de Umán contando con una población de 50,993, que representa el 4.5% de la Región y al final se están los Municipios de Conkal, Tixpéhual y Ucú con 9,143, 5,388, 3,469 habitantes respectivamente, sumando entre los tres el 1.6% del total de la población de la Región.

Los servicios que necesitan tal cantidad de personas, el impacto en la calidad del agua, aire y suelo, así como la administración del crecimiento, hacen de suma importancia la gestión del territorio. El propósito del trabajo es proporcionar las herramientas analíticas sobre una diversidad de temas, desde población, el crecimiento urbano, el impacto ambiental, los servicios básicos, entre otros, para la planeación futura inmediata de la Zona.

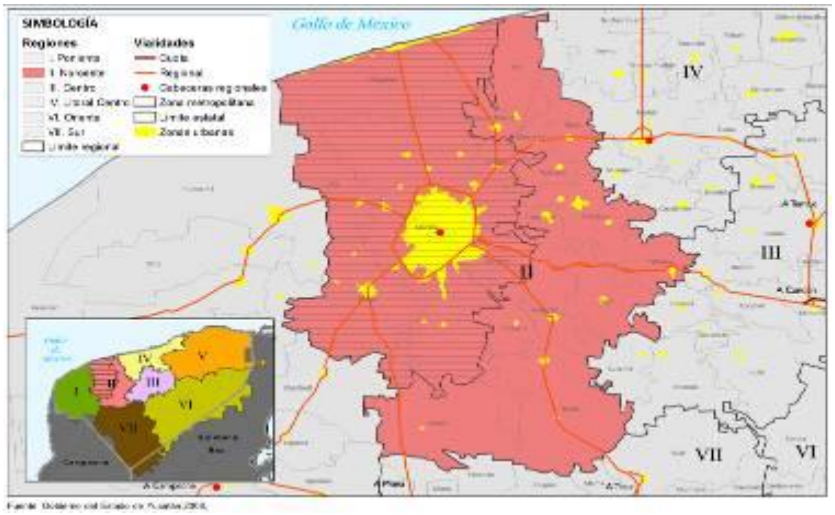
En el marco de la actual regionalización del Estado de Yucatán, elaborada en el año 2008, vigente hasta la actualidad, la Zona Geohidrológica Metropolitana incluye completamente a la región II, conocida como de influencia metropolitana, así como parcialmente a las regiones I al poniente, VII al sur, III al oriente y IV al nororiente. Sin embargo para efectos de este trabajo sólo se incluirá para el diagnóstico la Región II.

Figura VI.1).- Yucatán: Regionalización Estatal, 2008



La Región II Noroeste se integra por los municipios: Abalá, Acanceh, Baca, Conkal, Chicxulub Pueblo, Ixil, Kanasín, Mérida, Mocochá, Progreso, Seyé, Tahmek, Tecoh, Timucuy, Tixkokob, Tixpéhual, Ucú, Umán y Yaxkukul.

Figura VI.2).- Región II y sus municipios, 2008



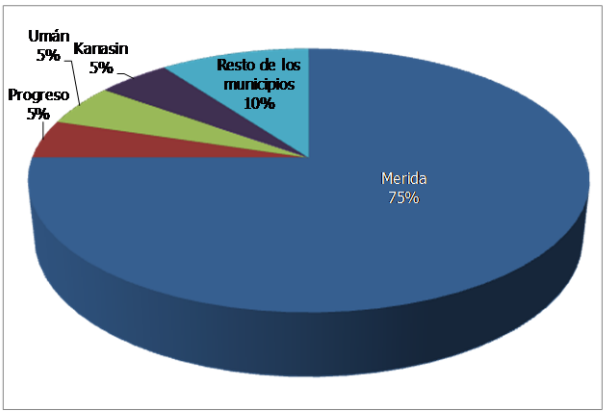
VI.1).- Distribución territorial de la población

De acuerdo con los datos estadísticos de INEGI y CONAPO, el Estado de Yucatán registró para el año 2005 una población de 1 millón 818 mil 948 habitantes distribuidos en 106 municipios, cantidad que supera más doble de la población respecto a 1970 (758 mil 355 habitantes). La población total de la Región II representa el 57.2% del total estatal al año 2005, en ella se localiza la Zona Metropolitana de Mérida.

Otro aspecto importante con referencia a esta Zona, es la concentración de la población, pues en el Estado En el año 2010, la población estatal alcanzó la cifra de 1,955,577 habitantes que se censaron, y la Zona Metropolitana centraliza el 57.6% de ésta.

Para el año 2014, la población a nivel estatal llegó a 2,091,513 habitantes y sólo en la zona metropolitana, que incluye Mérida, Kanasín, Conkal, Ucu y Umán, la población ascendió a 1,107,322 habitantes.

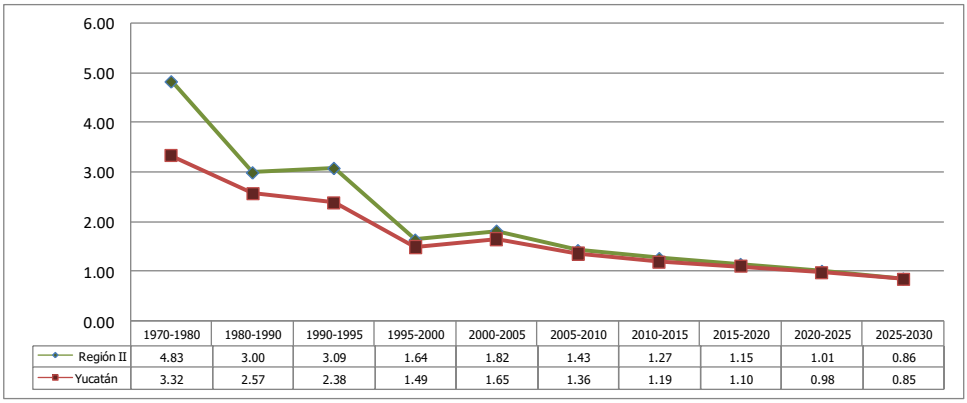
Figura VI.3).- Población total por municipio, 2005



Fuente: INEGI; II Conteo de Población y Vivienda, 2005.

La tasa de crecimiento media anual estatal (TCMA) ha ido decreciendo en un lapso de 35 años, para el periodo de 1970-1980 se establecía de 3.3%, cayendo 1.7 puntos porcentuales respecto al periodo 2000-2005 (1.6%), siendo superior a la media nacional (0.89%)[3].

Figura VI.4).- Tasa de Crecimiento Medio Anual 1970-2030

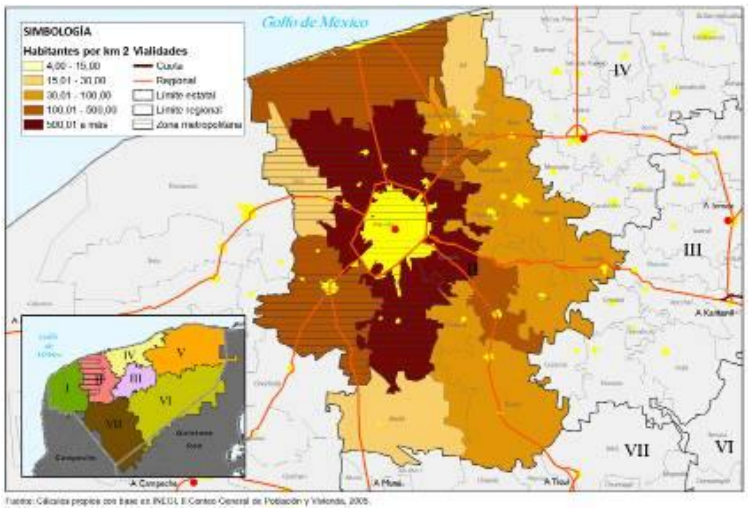


	1970-1980	1980-1990	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020	2020-2025	2025-2030
Región II	4.83	3.00	3.09	1.64	1.82	1.43	1.27	1.15	1.01	0.86
Yucatán	3.32	2.57	2.38	1.49	1.65	1.36	1.19	1.10	0.98	0.85

Fuente CONAPO, 1994: La población de los municipios de México 1950-1990. INEGI, 2000: XII. Censo General de Población y Vivienda, 2000, II Conteo de Población y Vivienda, 2005.

De los 19 municipios que integran la región, Mérida es el más densamente poblado, concentra al 75% de la población convirtiéndose en el centro urbano en torno al cual se ha conformado su zona metropolitana. La TCMA a la que creció el municipio en el periodo 2000-2005 fue de 1.8% que, si bien es más alto respecto a la tasa estatal, otros municipios de la región crecieron a ritmos más dinámicos como es el caso de Progreso cuya TCMA fue de 5%, la más alta de la región.

Figura VI.5).- Densidad de población, 2005



Caso contrario sucede en los municipios de Abalá, Baca, Chicxulub Pueblo**,** Ixil**,** Mocochá, Tahmek, Tixpéhual, Ucú y Yaxkukul, los cuales concentran únicamente al 3.45% de la población de la región, mostrando la gran concentración poblacional existente en la actualidad. La distribución de la población en la región muestra un patrón de

[3] Estimación obtenida del Articulo "Situación Demográfica Nacional y Estatal", (2006) por Virgilio Partida Bush, CONAPO.

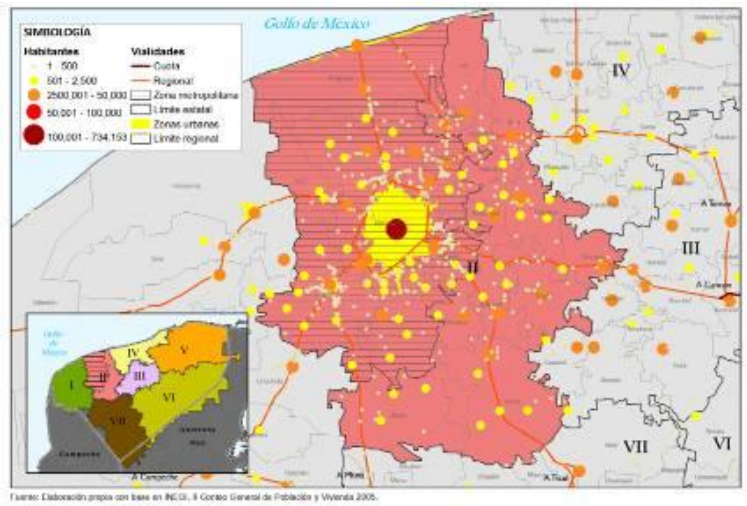
concentración en el municipio de Mérida el cual sumado a los municipios de Kanasín, Progreso y Umán concentran al 90% de la población de la región.

En cuanto a la densidad demográfica, según datos del 2005, se registra un promedio de 275 habitantes por kilómetro cuadrado, cifra que es rebasada en los municipios de Mérida (884.7) y Kanasin (502.7), en cuatro municipios más: Umán, Progreso, Chicxulub Pueblo y Abalá, la densidad demográfica es superior a los 100 habitantes por km2.

En los trece restantes esa densidad es menor a los 50h/km^2, siendo los más bajos los observados en Ixil, Ucú y Acanceh, ligeramente superiores a los 20 h/km^2.

La región es eminentemente urbana, el 81.5% de la población habita en localidades de más de 15 mil habitantes. El 18.5% se ubica en localidades rurales predominando las de entre 5 mil a 10 mil habitantes. La ubicación física de la concentración de la población es entorno al municipio de Mérida, mostrándose como una gran zona metropolitana desarticulada del resto de los municipios que integran la región.

Figura VI.6).- Distribución de la población por tamaño de localidades, 2005

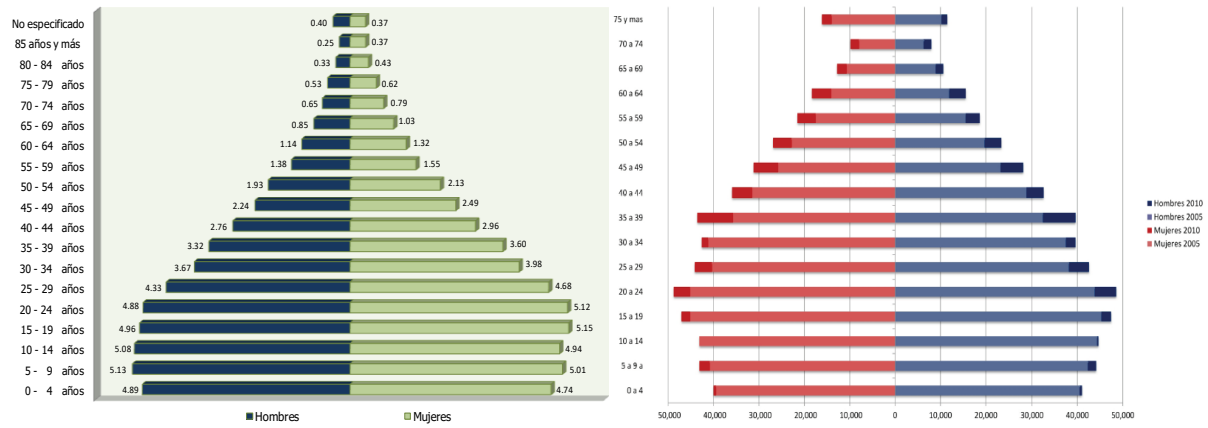


La concentración de población que existe en la región favorece al municipio de Mérida, que al tener mayor número de habitantes, lo posiciona como el que aporta mayor cantidad de mano de obra a la región.

Es notorio el bono demográfico de una población en franco crecimiento con un sector joven que demandará bienes y servicios así como infraestructura urbana, equipamientoi, vivienda y empleo.

Casi el 60 % de la población de la región se encuentra en el rango de 15 a 64 años, convirtiendo esto en una oportunidad para su desarrollo, al tener un mayor tamaño de población en edad de trabajar. La razón de dependencia demográfica es una medida de las personas que están en edades no laborales en relación con las personas que se encuentran en edad de trabajar. (CONAPO, 2002).

Figura VI.7).- Pirámide poblacional, 2000 y 2005-2010. Esta última sólo incluye la zona metropolitana de Mérida, mientras que la primera muestra la región metropolitana.



Fuente: INEGI: XII. Censo General de Población y Vivienda, 2000

A este respecto y según estimaciones CONAPO, la razón de dependencia de la población estatal ha disminuido para el periodo 2000-2005 pasando de 63.7 a 57 personas dependientes de aquellas que trabajan por cada 100 habitantes. En la medida que es menor la razón de dependencia demográfica, la población en edad laborar tiene menos presiones para generar los satisfactores que demanda la población dependiente; la Región II tiene la peculiaridad de ser la de menor razón de dependencia de la entidad, por cada 100 habitantes 51 son población dependiente de aquella que trabaja.

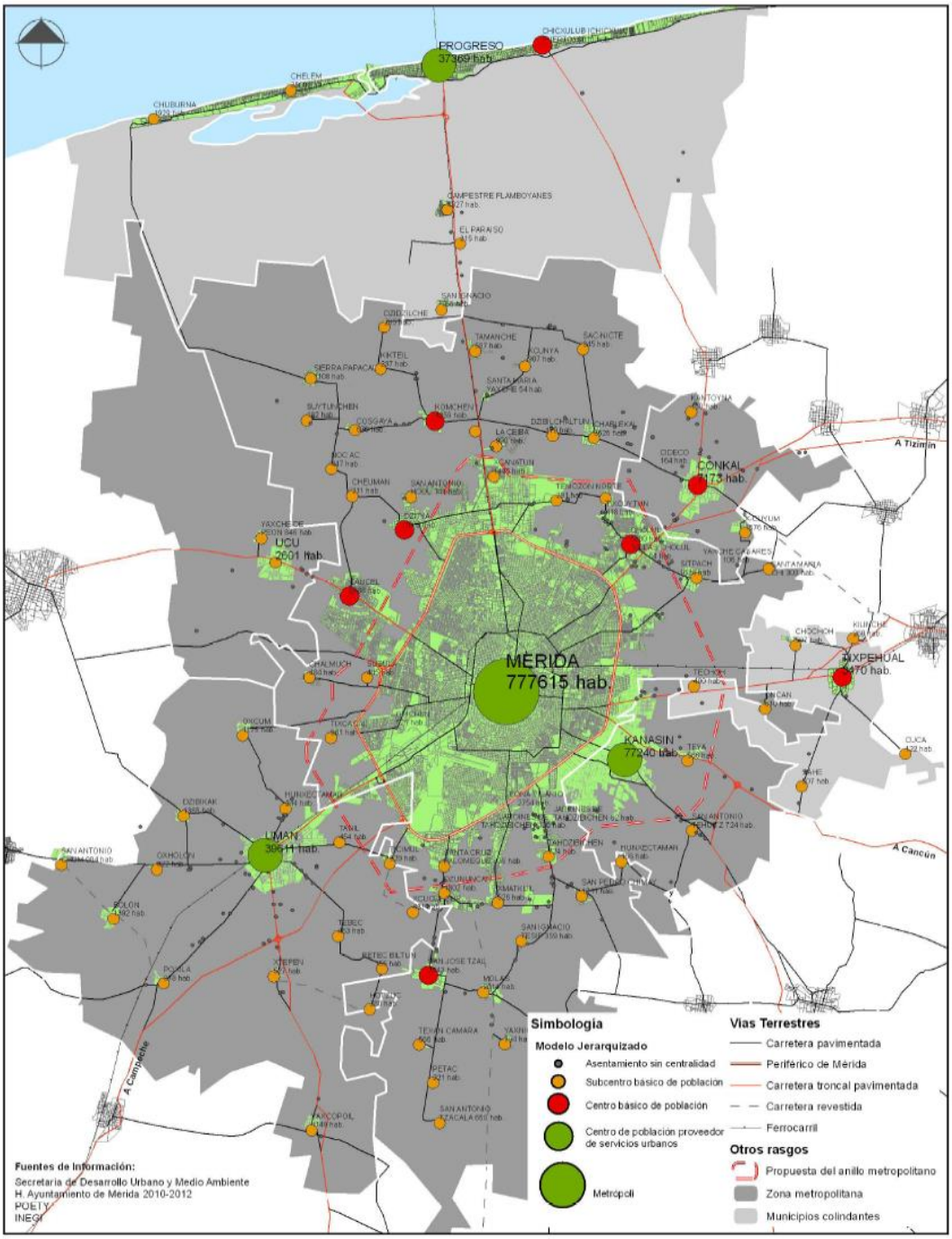
El Sistema de Asentamientos Humanos del Estado de Yucatán, integra un modelo espacial jerarquizado de los asentamientos humanos en el Estado e identifica a los sistemas urbanos existentes en el mismo.

Este modelo considera a todas las localidades en la entidad, y a diferencia de ejercicios previos que utilizaban el tamaño de población como criterio para definir la jerarquía, el presente modelo desarrollado utiliza como criterio la existencia de servicios y equipamientos públicos existentes en las localidades, es decir, sus funciones centrales. El objetivo principal es el de poder tener un instrumento de medición del comportamiento de las localidades y la distribución de los servicios centrales, para que, con base en esto poder generar políticas ya sea de crecimiento, consolidación o mantenimiento que impulsen el desarrollo equilibrado. El presente modelo cuenta de cinco niveles: 1. Asentamiento sin centralidad, 2. Subcentro básico de población, 3. Centro básico de población, 4. Centro proveedor de servicios urbanos, y 5. Metrópoli. La mayoría de estas localidades cuentan con cajas populares de ahorro; el centro proveedor de servicios urbanos cuenta con todas las funciones centrales más el servicio hospitalario (algunos también cuentan con bancos); finalmente, la metrópoli cuenta con la mayor concentración y variedad de estas funciones centrales. En la entidad existe una metrópoli (0.04% del total de localidades en el Estado), 12 centros proveedores de servicios urbanos (0.52% del total de localidades en el Estado), 183 centros básicos de población (7.87% del total de localidades en el Estado), 421 subcentros básicos de población (18.11% del total de localidades en el Estado), y 1,708 asentamientos sin centralidad (73.46% del total de localidades en el Estado), es decir, asentamientos sin servicios.

Los servicios públicos que provee la región (los más sofisticados del Estado), se concentran en las localidades de Progreso y Umán, pero principalmente en Mérida; en

cuanto a la influencia territorial de estos servicios, ésta no sólo abarca al Estado mismo, sino también a otras entidades del sureste del País. De manera simultánea pero contrastante, la región experimenta desbalances en cuanto a la provisión de algunos servicios educativos y de salud básica; esta contrastante realidad está relacionada con la dinámica y modelo de desarrollo regional

Figura VI.8).- Modelo espacial jerarquizado de las poblaciones de la Zona Metropolitana al año 2010



Migración

En México la migración y las remesas son fenómenos de una relevancia cada vez mayor, tanto por la pérdida de fuerza de trabajo como por los efectos multiplicadores que generan

las remesas en las comunidades de origen. Actualmente el Estado de Yucatán se encuentra en el lugar 23 a nivel nacional de persona emigrantes, de acuerdo datos arrojados por el INEGI (2005) 28 mil 720 personas salen de la entidad, mientras que para el mismo año, la inmigración se encuentra en el lugar 24 a nivel nacional con 34 mil 380 personas que arriban a la entidad. Conforme a datos del año 2000, el grado de intensidad migratoria de la Región II es de muy bajo, e incluso en el municipio de Timucuy éste se registra como nulo.

El índice de intensidad migratoria es en todos los casos de carácter negativo, en nueve municipios del orden de -0.80, siendo el más alto el que se observa en Ucú. En Progreso y Mérida se localiza el mayor porcentaje de hogares que reciben remesas en la región, en el primer caso el 1.78%, índice superior al promedio estatal del 1.4%, y en el segundo el 1.33%, en este mismo sentido, en Yakukul se registra el 1%; en el resto de los municipios de la Región II los porcentajes son inferiores, e incluso en tres de ellos el porcentaje es cero: Conkal, Mocochá, Timucuy y Tixpéhual.

Tabla VI.1).- Índice y Grado de Intensidad migratoria, 2000

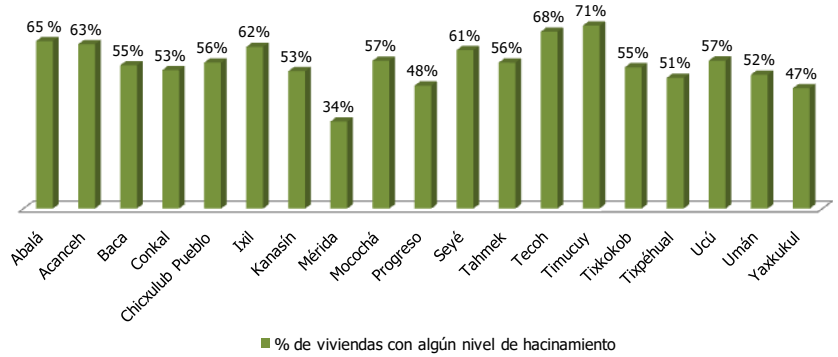
Ámbito	% Hogares que reciben remesas	Índice de intensidad migratoria	Grado de intensidad migratoria
Abala	0.76	-0.83	Muy bajo
Acanceh	0.59	-0.82	Muy bajo
Baca	0.97	-0.81	Muy bajo
Conkal	0.00	-0.88	Muy bajo
Chicxulub Pueblo	0.37	-0.86	Muy bajo
Ixil	0.28	-0.84	Muy bajo
Kanasin	0.91	-0.77	Muy bajo
Merida	1.33	-0.72	Muy bajo
Mococha	0.00	-0.77	Muy bajo
Progreso	1.78	-0.74	Muy bajo
Seye	0.10	-0.87	Muy bajo
Tahmek	0.82	-0.79	Muy bajo
Tecoh	0.43	-0.84	Muy bajo
Timucuy	0.00	0.00	Nulo
Tixkokob	0.37	-0.85	Muy bajo
Tixpehual	0.00	-0.86	Muy bajo
Ucu	0.15	-0.87	Muy bajo
Uman	0.27	-0.79	Muy bajo
Yaxkukul	1.00	-0.71	Muy bajo
Estado de Yucatán	**1.41**	**-1.08**	**Muy bajo**

Fuente: Estimaciones de CONAPO con base en la muestra del diez por ciento del XII Censo General de Población y Vivienda 2000.

Vivienda

Uno de los indicadores más alarmantes y que contribuyen a elevar el grado de marginación de la población de la región es el hacinamiento, según datos CONAPO del año 2000, el porcentaje de viviendas con algún nivel de hacinamiento es superior al 50%, con excepción de Mérida en donde éste disminuye al 38.20%. En el polo opuesto, los porcentajes superiores al 70% se observan en cinco de los municipios de la región, siendo el más alto el 77.56% de Timucuy.

Figura VI.9).- Porcentaje de viviendas con algún nivel de hacinamiento, 2005.



Fuente: Estimaciones de CONAPO con base en el II Conteo de Población y Vivienda, 2005.

Para el año 2000, el total de hogares en la región representaban el 60% del total estatal, de ellos, el 20.5% estaban encabezados por mujeres, condición que varió significativamente para el 2005 cuando se registra el 23.3% de hogares con jefa de familia, esto repercute de manera directa en el decremento del porcentaje de hogares presididos por jefes de familia de sexo masculino, pues del 2000 al 2005 disminuyó casi un 3%. Cabe anotar que el porcentaje de hogares presididos por mujeres en la Región II representa el 70.1% de los hogares con jefas de familias en todo el estado.

De acuerdo con el Programa Regional para la Zona Metropolitana de la Ciudad de Mérida (PRZM), elaborado en el año 2014 por SEDUMA, para el año 2014, se presentaba una ocupación potencial de 15,678.62 has, distribuidas en 253 desarrollos inmobiliarios ubicados fuera del área urbana actual. Esto equivale a más de la mitad del área urbana existente en al año 2014, el cual tiuene una superficie de 28,594.9 has. En la tabla y figura siguiente se muestra la tendencia actual de ocupación, ya sea que el desarrollo está en trámite en materia de impacto ambiental y permisos ante los ayuntamientos respectivos.

Tabla VI.2).- Desarrollos habitacionales para el año 2014 autorizados y/o en procesos de autorización en los ayuntamientos de la Zona Metropolitana

Polígonos	**Información SEDUMA**		
	No	Has.	Viviendas
Fracc. Seduma 2010	21	2,371.10	53,218
FUAS	128	4,472.72	-
Fracc. Ayto. Kanasín	13	766.13	26,978
Fracc. Ayto. Merida	21	659.52	8,562
Fracc. Ayto. Progreso	6	483.01	-
Fracc. Ayto. Uman	9	349.99	-
Fracc. Ayto Conkal	20	441.93	-
Reservas IVEY	2	3,265.17	-
Propuestas Canadevi	33	2,869.07	4,240
TOTAL	**253**	**15,678.62**	**89,685 ***
Vacíos urbanos	**-**	**3,513.14**	**-**
Gran TOTAL		**19,191.76**	

Como vemos en la tabla anterior, existe una oferta actual de casi 90,000 viviendas en la Zona Metropolitana, sin embargo, este dato representa sólo el 18.57 % de información verificada del número de viviendas en desarrollos en trámite. El Programa Regional hizo

evidente que existe una sobreoferta de vivienda en la Zona Metropolitana, como se muestra en la siguiente tabla. Vale la pena mencionar que el número de viviendas particulares al año 2010 ascendía a 355,000 viviendas, de las cuales 51,000 viviendas están desocupadas, lo que representa una tercera parte de las viviendas requeridas para el año 2040.

Tabla VI.3).- Requerimientos de vivienda por incremento demográfico.

Requerimiento de vivienda 2010 – 2040 por incremento demográfico	114,103 viviendas
Viviendas sobreocupadas (hogares ampliados)	25,622 viviendas
Rezago habitacional (CONAVI, 2010)	3,519 viviendas
ESTIMACIÓN TOTAL DE VIVIENDA NUEVA REQUERIDA (2040)	**143,244 viviendas**
Oferta de vivienda para el corto y mediano plazos	MUCHAS MÁS de 89,685 viviendas*

En una prospectiva demográfica al año 2040, se presentará un proceso de estancamiento general en los ritmos de crecimiento poblacional, la Zona Metropolitana de Mérida tendrá 422,180 habitantes más que en 2010, lo que se traduce en un requerimiento de 114,103 viviendas nuevas; es decir, 3,803 viviendas al año.

Tabla VI.4).- Prospectiva demográfica al 2040

Ámbito	**Población total**						
	2010	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**
Estado de Yucatán	1,955,577	2,118,762	2,252,505	2,380,828	2,503,132	2,638,544	**2,766,811**
ZM de Mérida	1,027,004	1,122,759	1,194,039	1,257,397	1,314,757	1,385,558	**1,449,184**

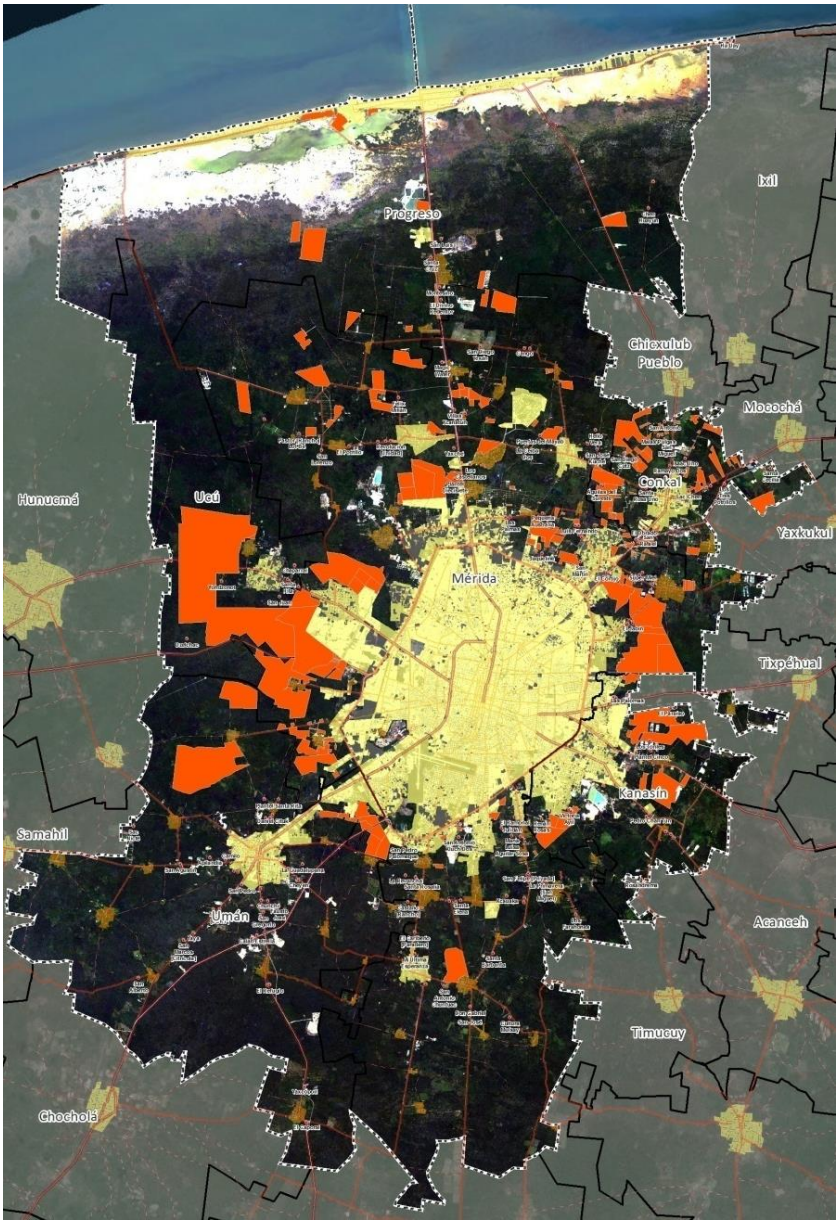
Lo anterior implica una necesidad de suelo urbano para satisfacer las necesidades de vivienda para la población creciente. Mediante estimaciones del promedio de ocupantes de la vivienda, el lote promedio requerido para la vivienda, mas el rezago habitacional actual de 3,519 viviendas, las proyecciones muestran una superficie mínima de 4,407.50 ha de terreno.

Tabla VI.5).- Suelo Urbano requerido por periodo y total al año 2040.

Ámbito	**Suelo urbano total requerido/periodo**						
	2010-2015	**2015-2020**	**2020-2025**	**2025-2030**	**2030 - 2035**	**2035 - 2040**	**Suelo total requerido 2010-2040**
	Rezago habitacional (Necesidades de vivienda nueva) 2010						**108.28**
	Población excedente en hogares ampliados y compuestos 2010						**788.37**
Conkal	6.2	4.9	4.6	4.2	5.5	4.9	30.22
Kanasín	177.9	96.7	75.1	69.7	39.3	39.6	498.28
Mérida	556.8	434.5	389.4	347.0	487.4	427.9	2,643.04
Progreso	39.0	30.0	28.1	26.3	33.8	30.5	187.68
Ucú	3.2	2.3	2.1	2.0	2.7	2.4	14.71
Umán	13.2	24.3	27.6	27.8	20.2	23.8	136.93
ZMM	**796.3**	**592.8**	**526.9**	**477.0**	**588.8**	**529.1**	**4,407.50**

De aquí pues que lo que se observa es que existe un excedente de más de 14,784.26 ha, es decir 3.35 veces lo mínimo requerido, como se observa a continuación .

Figura VI.10).- Desarrollos inmobiliarios autorizados o en proceso de trámite al 2014



Lo anterior implica que las soluciones habitacionales no están siendo las adecuadas: ni en el tamaño de las viviendas, ni en la localización, ni en la oferta de equipamientos sociales. De aquí surge la pregunta en relación a la población en condiciones de pobreza. El 60 % de la demanda total es de la población con menos de 2 vsm, la construcción de la

vivienda es 30% más pequeña, con menores costos pero con menor habitabilidad y una oferta lejana, a más de 6.5 Km en promedio, por lo que son soluciones caras, injustas e ineficientes. La solución no es promover más conjuntos de vivienda, sino ocupar las viviendas desocupadas, ofrecer suelo servido y bien localizado, incluyendo los vacios urbanos y masificar la producción social y los apoyos a la autoconstrucción (PRZM, 2014).

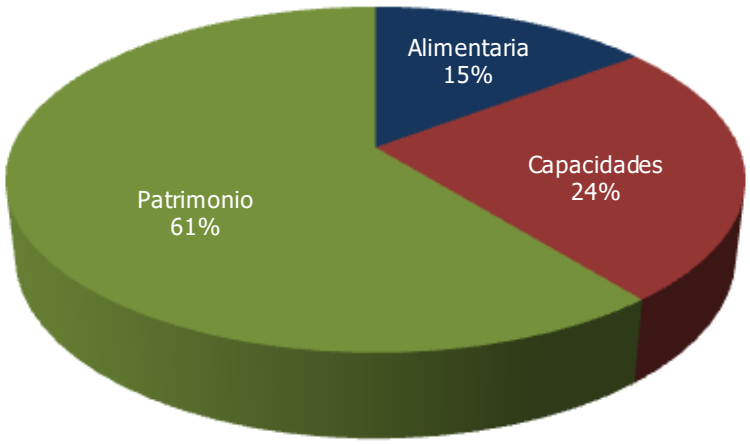
VI.2).- Desarrollo social y humano

Pobreza

La pobreza es uno de los principales problemas que actualmente enfrenta la entidad, sin embargo, la Región II es la que tiene los niveles más bajos de pobreza del Estado. Al año 2005, el 15% de la población no cuenta con el ingreso per cápita suficiente para cubrir sus necesidades alimenticias correspondientes establecidas en la canasta alimentaria INEGI – CEPAL. En los municipios de Timucuy, Tecoh y Acanceh, se localizan los mayores porcentajes de población en situación de pobreza alimentaria, entre el rango del 23% al 30%, seguidos de los municipios de Tecoh, Acanceh, Tixpéhual, Seyé y Kanasín, con porcentajes de pobreza alimentaria menores al 25%. En siete de los municipios que integran la región esos índices son menores al 10%, siendo el más bajo el que se presenta en Mérida (7.6%). El 24% de los hogares de la región se encuentra en pobreza de capacidades, entendiéndose como un ingreso per cápita insuficiente para cubrir el patrón básico de consumo de alimentación, salud y educación. En este rubro, Timucuy, Tecoh y Acanceh, son los municipios con porcentajes más altos de población en esta situación.

La pobreza patrimonial es el principal problema que enfrenta la región, el 61% de su población no cuenta con el ingreso per cápita suficiente para cubrir el patrón de consumo básico de alimentación, vestido y calzado, vivienda, salud, transporte público y educación. En este tipo de pobreza están nueve de los municipios que integran la región. En lo que respecta al nivel de ingreso, predomina la población que percibe hasta dos salarios mínimos, más del 40% de la población de los municipios que integran la región se encuentran en este rubro. En Abalá, Tahmek, Timucuy y Ucú, los porcentajes son del 80%, en tanto los más bajos observados se presentan en las zonas urbanas de Mérida y Progreso siendo éstos del orden del 50%.

Figura VI.11).- Población en pobreza alimentaria, de capacidades y de patrimonio, 2005



Nota(s):"1/ Pobreza alimentaria: se refiere a los hogares cuyo ingreso per cápita es menor al necesario para cubrir las necesidades de alimentación correspondientes a los requerimientos establecidos en la canasta alimentaria INEGI - CEPAL. 2/ Pobreza de capacidades: se refiere a los hogares cuyo ingreso per cápita es menor al necesario para cubrir el patrón de consumo básico de alimentación, salud y educación. 3/ Pobreza de patrimonio: se refiere a los hogares cuyo ingreso per cápita es menor al necesario para cubrir el patrón de consumo básico de alimentación, vestido y calzado, vivienda, salud, transporte público y educación." Fuente(s): Indicadores, índice y grado de rezago social, estimaciones del CONEVAL con base en el II Conteo de Población y Vivienda 2005.

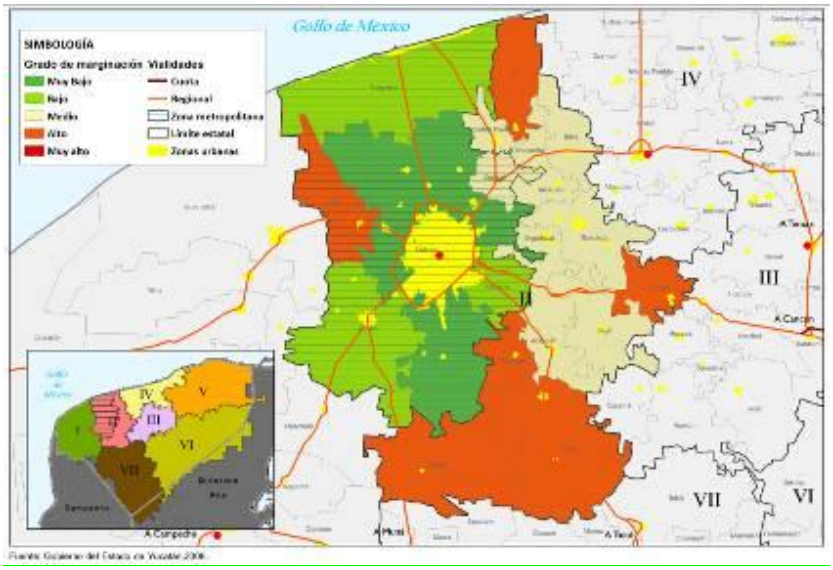
Marginación y rezago social

En 82 de los 106 municipios que conforman el estado, habita el 29% de la población y dichos municipios estás clasificados como de alta y muy alta marginación. (PED, 2007). Una característica muy peculiar de Yucatán es la gran desigualdad que se tiene en sus municipios; mientras Mérida se ubica en las ciudades con menor marginación a nivel nacional, otros municipios están marginados en condiciones similares a los de Chiapas, Oaxaca y Guerrero.

En la Región II el mapa de marginación muestra diversidad en las condiciones de vida de la población, los municipios con alto grado de marginación son: Abalá**,** Ixil, Tahmek, Tecoh, Timucuy y Ucú. Posterior a este grupo se encuentran los de grado de marginación medio que junto que con los anteriores son los municipios con las condiciones de vida más bajas. Dichos municipios son: Acanceh, Baca, Conkal, Chicxulub Pueblo, Mocochá, Seyé, Tixkokob, Tixpéhual y Yaxkukul. Los municipios con mayor influencia de la zona metropolitana son los que tiene el grado de marginación más bajo y se localizan en el centro de la región.

Con respecto al estado, la zona costera se caracteriza por tener los índices más bajos de marginación siendo que ninguno de ellos presentó, en el año 2000 un grado muy alto de marginación. El 61.5 % de los municipios presentó grado de marginación muy bajo y el 38.5% grado bajo. Sin embargo, si se comparan los grados de marginación entre 1990 y 2000, encontramos un deterioro de los municipios costeros de Telchac Puerto y Hunucmá. Actualmente, Ixil se encuentra entre los municipios de más alta marginación.

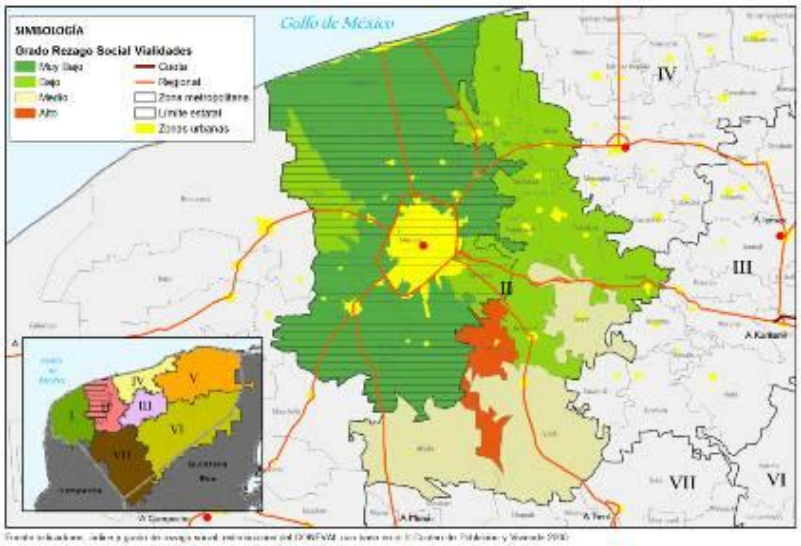
Figura VI.12).- Grado de marginación, 2005



La dispersión de la población es otro de los factores que marginan a la población de la región, en Abalá, Baca, Chicxulub Pueblo, Ixil, Mocochá, Tahmek, Timucuy, Tixpéhual, Ucú y Yaxkukul, todas las localidades que los integran concentran a menos de 5,000 habitantes, condición que dificulta el acceso de servicios básicos, de equipamiento e infraestructura, situación que va en decremento de su calidad de vida.

La mayor parte de los municipios de la región presentan un bajo y muy bajo rezago social, salvo Timucuy que es el único municipio con un índice alto. Sólo los municipios de Abalá, Seyé y Tecoh tienen un grado de rezago social medio, en tanto 11 municipios más registran índices de tipo bajo y cuatro más muy bajo: Conkal, Mérida, Progreso y Umán. Es la región con las mejores condiciones de comunicación terrestre ya que cuenta con vialidades que la cubren en todas direcciones.

Figura VI.13).- Grado de rezago social, 2005



Desarrollo humano

Las condiciones de vida inciden directamente en el desarrollo humano, dicho desarrollo afecta directamente el territorio, es por ello que actualmente el Estado de Yucatán cuenta con un índice de desarrollo humano de 0.76 relativamente similar al nacional, con base en datos de la Conapo (2000), la entidad se encuentra en lugar número 22 respecto a las demás entidades. En la clasificación de cada municipio del índice de Desarrollo Humano 2005, éstos tuvieron importantes ascensos en la clasificación a nivel nacional respecto al año 2005, Mérida y Progreso son los municipios de la entidad mejor posicionados a nivel nacional. Timucuy es el municipio con el IDH más bajo de la región se ubica en el lugar 2 mil 63 en el contexto nacional; caso contrario es Mérida, municipio mejor posicionado en la región para el 2005 se ubica en el lugar 93 a nivel nacional.

Los indicadores más bajos de la región y que impactan en el desarrollo humano de la población son: la Tasa de alfabetización, el nivel de asistencia escolar, el nivel de ingreso por cápita.

Salud

El índice general de salud es para todos los municipios el mismo: 1, no obstante, al revisar este índice con componente de género se puede observar variaciones significativas del 2000 al 2005 a nivel municipal, como en el caso de Umán. Por lo que respecta a éste índice durante el año 2005, el menor índice registrado el del municipio de Ticumuy el 0.79, caso contrario sucede en la zona urbana de Mérida y Kanasín, Progreso y Umán con índices superiores al 0.90.

Natalidad

En el año 2005 se registraron un total de 18,634 nacimientos en la región, de los que el 50.5% fueron hombres, lo que arroja un mayor equilibrio poblacional por sexo. Los nacimientos totales en la región representan el 39.1% del total de nacimientos en la entidad, en tanto la cantidad de hombres representa el 39.9% estatal y el de mujeres el 39.4%. A nivel municipal, el mayor porcentaje de alumbramientos se presenta en Mérida con el 74%, en tanto el menor es el de Mocochá con el 0.27% con respecto al total regional. Por sexo, en casi todos los municipios la proporción de nacimientos de hombres y mujeres es igual, con excepción de Tixpéhual, en donde nacen más mujeres que hombres. La Tasa Bruta de Natalidad (TBN) de la entidad es de 19.60 nacimientos por cada mil habitantes, la Región II está por debajo de la tasa estatal al tener al año 2005 una TBN de 18.11., cabe mencionar que a acepción de la Región IV, el resto de la entidad está creciendo a tasas similares o incluso superiores a la estatal.

Tabla VI.6).- Índice de Desarrollo Humano 2000-2005

Ámbito	Índice de Desarrollo Humano		Grado de Desarrollo Humano		Lugar en el contexto nacional	
	2000	2005	2000	2005	2000	2005
Abala	0.668	0.7422	Medio alto	-	1610	1481
Acanceh	0.719	0.7508	Medio alto	-	1010	1336
Baca	0.728	0.7842	Medio alto	-	913	816
Conkal	0.767	0.7477	Medio alto	-	468	1387
Chicxulub Pueblo	0.729	0.8027	Medio alto	-	907	576
Ixil	0.727	0.8616	Medio alto	-	931	109
Kanasin	0.748	0.8067	Medio alto	-	694	535
Merida	0.833	0.8126	Alto	-	66	454
Mococha	0.749	0.8940	Medio alto	-	678	22
Progreso	0.804	0.8216	Alto	-	178	366
Seye	0.704	0.7703	Medio alto	-	1205	1023
Tahmek	0.694	0.8145	Medio alto	-	1311	435
Tecoh	0.682	0.8052	Medio alto	-	1458	556
Timucuy	0.691	0.8245	Medio alto	-	1345	337
Tixkokob	0.768	0.7709	Medio alto	-	460	1012
Tixpehual	0.754	0.7908	Medio alto	-	620	722
Ucu	0.712	0.7320	Medio alto	-	1098	1619
Uman	0.803	0.8109	Alto	-	181	479
Yaxkukul	0.746	0.6867	Medio alto	-	718	2075
Estado se Yucatán	**0.770**	**-**	**Medio alto**	**-**	**19**	**-**

Fuente: Conapo, 2002: Índice de Desarrollo Humano 2000. Y PNDU-México 2008: Índice de Desarrollo Humano Municipal en México 2000-2005

Mortalidad

En cuanto al número total de defunciones en la región se tiene que en 2005 se reportaron 5,269 muertes, de las cuales el 53.5% correspondió a varones. Por su propia densidad población es el municipio de Mérida el que aporta el mayor porcentaje de defunciones en

la región, junto con los otros municipios del área metropolitana, no obstante, existen otros municipios con índices superiores al 1% como Tixkokob, Tecoh, Acanchec y Seyé. La Tasa Bruta de Mortalidad (TBM) de la entidad es de 5 defunciones por cada mil habitantes, misma tasa corresponde a la región. La tasa de mortalidad infantil para ese mismo año a nivel municipal se ubica entre el 27.3 de Timucuy como el más alto, hasta el 8.8 de Mérida. Siete municipios presentan tasas mayores al 21.2, en tanto el resto se ubica entre esa tasa y la menor de un dígito en Mérida.

Acceso a los sistemas de salud

Según INEGI (2007), poco más de la mitad de la población del estado es derechohabiente, quedando la otra parte de la población con difícil acceso al los sistemas de salud social. En lo que respecta a la región, al corresponder a la zona metropolitana de Mérida, se tiene una gran concentración de servicios médico y de unidades de salud de todos los tipos, la condición de derechohabiente de la población se ejemplifica en que poco más del 60% de la población está afiliada a alguna institución de salud pública, estando por demás decir que es el mayor porcentaje con respecto al resto de las regiones del estado.

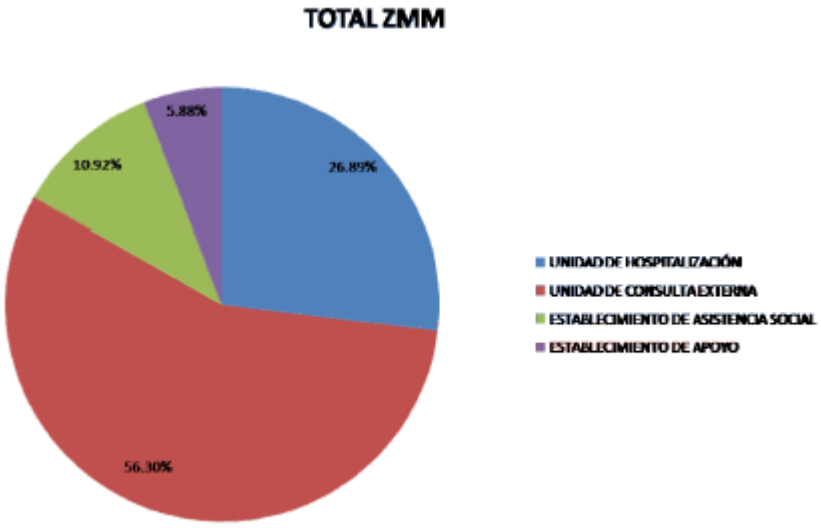
En este apartado se clasifica el equipamiento de salud pública con el que cuentan las localidades según los criterios de SEDESOL, así como el equipamiento para la asistencia social.

Como panorama general en la Zona Metropolitana se cuenta con 61 instalaciones de salud de diferentes niveles y tipos, así como 14 que se dedican a la asistencia social, desglosándolos por niveles según SEDESOL, tenemos que existe 1 Centro de salud con hospitalización –servicio de cirugía de baja complejidad, radio diagnóstico, odontología entre otros, 3 hospitales generales; 1 administrado para el público en general (por el Estado) y 2 para los derechohabientes del IMSS, estos cubren servicios de hospitalización en gineco-obstetricia, pediatría, cirugía y medicina interna.

También se cuenta con 6 hospitales especializados (la mitad para población en general y la otra mitad para derechohabientes del IMSS) en ellas se atiende a pacientes con padecimientos de alta complejidad como son los relacionados con psiquiatría, pediatría, ginecoobstetricia, materno infantil (ginecopediatría), traumatología y ortopedia, cardiología y neumología, oncología, entre otras; también funcionan como centros de investigación y docencia especializada.

Se cuenta con 10 centros de salud rural, así como 19 centros de salud urbanos, estos otorgan los servicios de consulta externa general – la diferencia de uno a otro es el enfoque que tienen, mientras uno es para localidades de 2500 habitantes hasta menos de 15,000, el otro es para más de 15,000 habitantes en adelante. Para los derechohabientes del IMSS existen 15 unidades de medicina familiar en las cuales se proporciona consulta de medicina familiar, planificación familiar, fomento a la salud, orientación nutricional, medicina preventiva, odontología, laboratorio, radiodiagnóstico y urgencias. En contra parte para los afiliados al ISSSTE, se cuenta con 1 clínica de medicina familiar, también para estos existen 2 Hospitales regionales. Existe de igual manera 2 Hospitales de 3er nivel proporcionado por la Cruz Roja Mexicana, 2 Unidades de hospitalización por parte de la Secretaría de la Defensa Nacional y 1 Centro estatal de transfusión sanguínea administrado por el Estado.

Figura VI.14).- Tipo de equipamiento de salud.



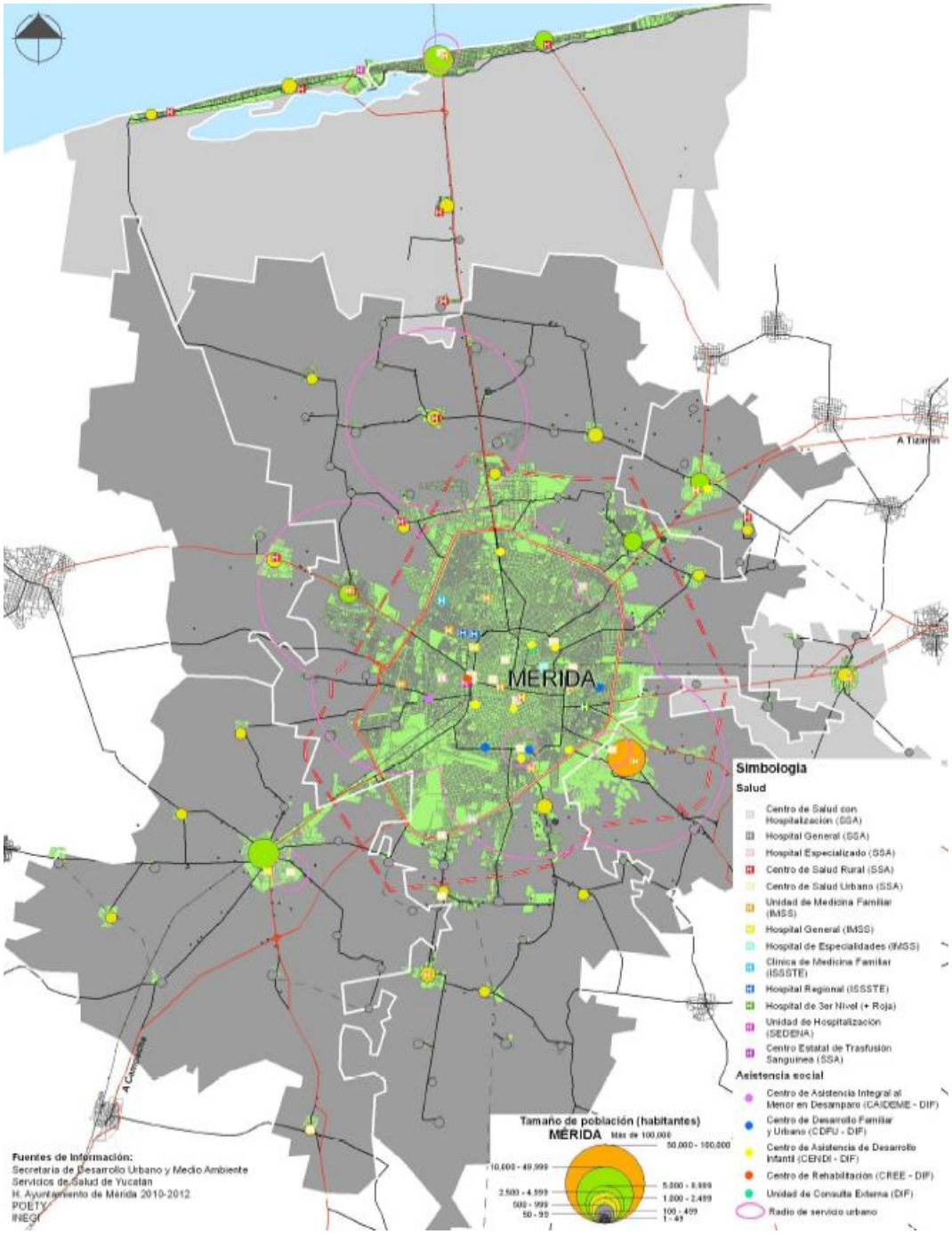
Con respecto a las instalaciones para la asistencia social en la Zona se encuentran 14 de éstas. Catalogadas como sigue: 1 Centro de asistencia al menor en desamparo, 3 Centros de desarrollo familiar y urbano, 8 Centros de desarrollo infantil, 1 Centro de Rehabilitación y 1 unidad de consulta externa por parte del DIF. Mérida por su población y ubicación centraliza los servicios de salud y asistencia social. En este municipio se aloja la mayor cantidad de hospitales, entre ellos 2 con especialidades (uno perteneciente al IMSS y otro administrado por el Estado) y 2 de tercer nivel (Cruz roja) y 1 hospital Regional (IMSS). Además de los 14 centros para la asistencia social que existen (CREE, CENDI, CAIMEDE, entre otros), la mayoría se encuentran en la ciudad de Mérida.

Conforme a las normas de SEDESOL de cobertura por distancia se proporciona un área de influencia del servicio, irónicamente esto no significa que la demanda del servicio este satisfecha, pues no se toma en cuenta la cantidad de habitantes que necesitan el servicio ni la capacidad en personal e instalaciones para satisfacerlo.

En el rubro de Salud para el año 2008 el municipio de **Conkal** contaba con 2 centros para consulta externa y 1 hospital, después del paso de dos años, a 2010, estos servicios se siguen brindando sin aumento o disminución. El municipio de **Kanasín** de igual manera sigue sin cambios en su equipamiento, para 2008 contaba con 2 centros para consulta externa, al año de 2010 la cantidad no varió. Para la ciudad de **Mérida** su centralidad y nivel de metrópoli hacen que tenga constantes avances en la mayoría de los rubros analizados, en salud para 2008 la Ciudad contaba con 28 centros para consulta externa y 10 hospitales, pero para 2010 estos aumentaron a 35 centros para consulta externa y 12 hospitales, habiendo un aumento de 7 instalaciones para consulta externa y 2 hospitales.

En el municipio de **Progreso** para 2008 había 4 centros para consulta externa y 2 hospitales, para 2010 los hospitales siguieron siendo la misma cantidad, sin embargo hubo un aumento de 4 centros para consulta externa llegando a 8 en el municipio. El municipio de **Tixpéhual** durante este periodo continuo sin cambio habiendo sólo 1 centro para consulta externa. En **Ucú** aumentó a 2 centros para consulta externa para 2010 ya que antes para 2008 sólo existía 1. Por último, el municipio de **Umán** permaneció sin cambios, contando con 2 instalaciones para consulta externa y 1 hospital.

Figura VI.15).- Equipamiento de salud y asistencia social en la Zona Metropolitana



Educación

Acceso al sistema educativo

El nivel educativo de la población es otro de los indicadores que incrementan el grado de marginación y rezago social, en esta región menos del 20% de población de 15 años o más es analfabeta, presentándose el índice más alto en Timucuy con el 26%; doce municipios más presentan porcentajes de dos dígitos menores 19%, y en los otros seis de

entre el 4% en Mérida y el 9% en Conkal. Por lo que respecta a la tasa de alfabetización en la región para el año 2005, en todos los casos en superior al 80%, con excepción de Timucuy que es del 73%, en tanto en nueve más las tasas son superiores al 90%. El grado promedio de escolaridad en los municipios de la región no es homogéneo, pues la zona urbana presenta índices que van de los nueve a los siete grados en Umán, lo que supone el inicio de la educación media superior y el primer año e secundaria. Los más bajos promedios de escolaridad son del orden del cuarto grado como mínimo, hasta la conclusión de la primaria aproximadamente, situación existente en once de los municipios de la región.

En cuanto a Educación* en la Zona Metropolitana al paso de 2 años (2008 a 2010), 5 de los 7 municipios de la zona de estudio manifestaron aumentos, pero paradójico a ello 4 de los 7 también manifestaron disminución en algún tipo de equipamiento educativo, los que no crecieron en equipamiento educativo fueron Tixpéhual y Ucú, incluso el primer municipio presentó un disminución en ella, **Tixpéhual** para el año 2008 tenia 6 preescolares, 6 primarias, 1 secundaria y 1 bachillerato, sin embargo para 2010 se quedó con 5 preescolares (1 menos que en 2008), y el resto de los niveles continuaron igual. **Ucú** no tuvo cambios en estos 2 años, continuó con 2 preescolares, 2 primarias y 1 secundaria. **Progreso** presentó tanto aumento como disminución en su equipamiento, en 2008 tenía 22 preescolares, 27 primarias, 13 secundarias, 4 bachilleratos y 1 oferta de educación superior, para 2010 aumentó 1 primaria, pero desapareció 1 bachillerato. En el municipio de **Umán** se tenía 29 preescolares, 31 primarias, 16 secundarias y 2 bachilleratos en 2008, en 2010 las primarias aumentaron a 33, 2 más que en 2008, pero desaparecieron 2 preescolares y 1 secundaria.

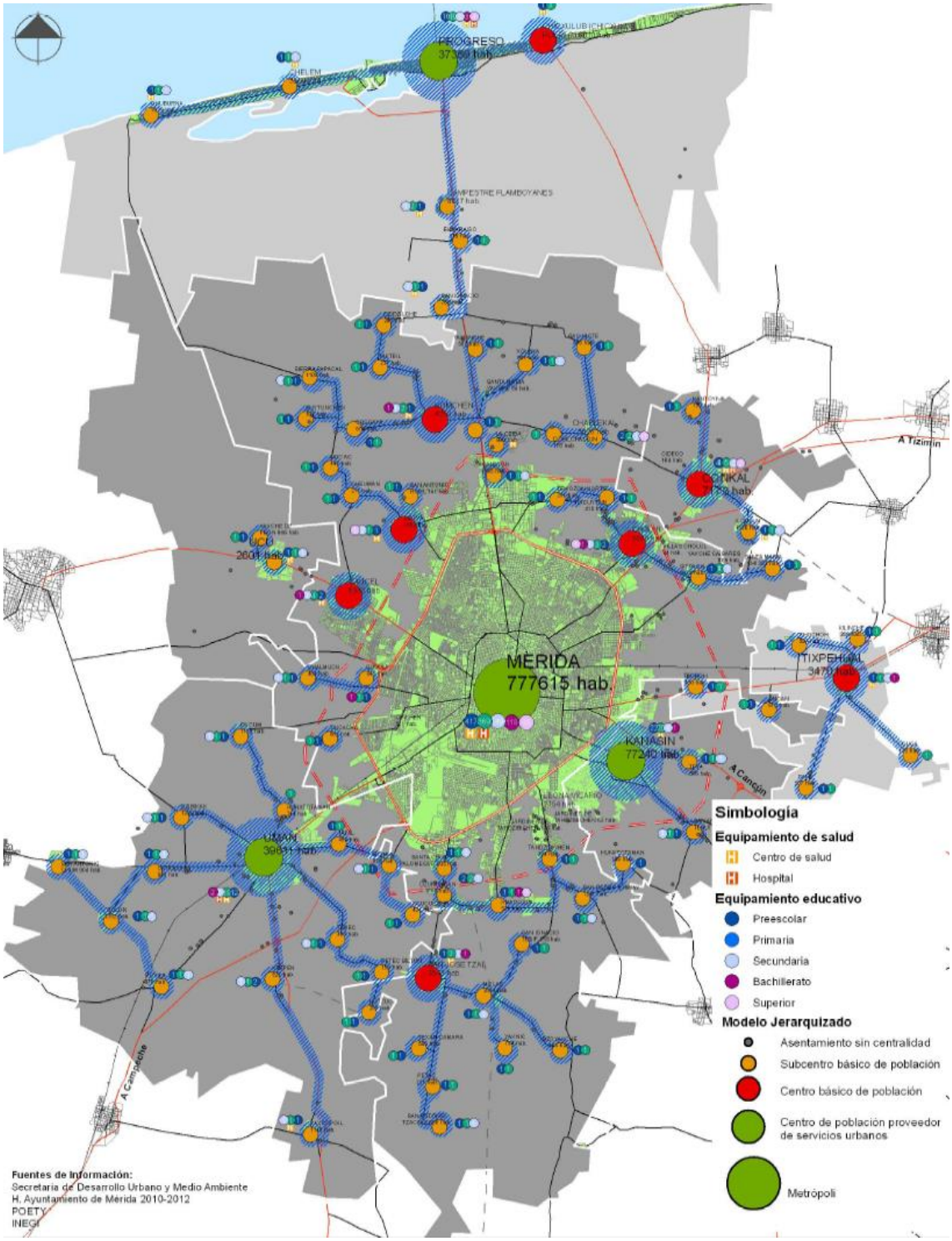
En **Conkal** aumentó, en 2008 se contaba con 5 preescolares, 7 primarias y 2 secundarias para 2010 los preescolares aumentaron a 6 y las secundarias a 3 (1 más), cabe señalar que en este municipio no hay oferta de educación media superior (bachillerato). Para el municipio de **Kanasín** se registró un aumento de 3 de los 4 niveles básicos en equipamiento, en 2008 había 20 preescolares, 17 primarias, 5 secundarias y 1 bachillerato, para 2010 los preescolares aumentaron a 24 (+4), las primarias a 22 (+5) y las secundarias a 6 (+1), quedando sin incremento el bachillerato. Como final el municipio de **Mérida** en 2008 contaba con 462 preescolares, 400 primarias, 152 secundarias y 125 bachilleratos, el municipio mostró una disminución de 1 oferta en 2 niveles para 2010 –bachillerato, quedando en 124 y en preescolares retrocediendo a 461. En caso de los niveles de primaria y secundaria para 2010 evidenció un aumento de 18 primarias y 14 secundarias –quedando en 418 y 166 respectivamente.

Se presenta en la figura siguiente la ubicación de la mayoría de los planteles educativos por nivel*, comenzando con **educación Inicial**, en este nivel se puede observar que existen en el área 54 instalaciones en total, plasmados en el mapa. De estos, 1 se halla en Conkal, 49 en Mérida, 2 en Progreso y en Umán 2; no existen registros que existan al momento del levantamiento instalaciones de este nivel en el municipio de Kanasín, Tixpéhual y Ucú. En el nivel **Preescolar** existen 481 instalaciones registrados en total, que se reparten en los municipios como sigue: 5 en Conkal, 22 en Kanasín, 407 en Mérida, 21 en Progreso, 3 en Tixpéhual, 2 en Ucú y 21 en Umán. Bajo el nivel **primaria** existen 449 planteles que se distribuyen de la siguiente forma: 6 en Conkal, 21 en Kanasín, 370 en Mérida, 24 en Progreso, 3 en Tixpéhual, 2 en Ucú y 23 en Umán.

Existen 171 escuelas con el nivel de **secundaria** los cuales están ubicados en: 2 en Conkal, 4 en Kanasín, 139 en Mérida, 12 en Progreso, 1 en Tixpéhual, 1 en Ucú y 12 en

Umán. Las instalaciones de los niveles anteriores se contaron incluyendo a las escuelas privadas, con los datos podemos reconocer fácilmente la dependencia a la ciudad de Mérida, de algunas de las localidades del la Zona Conurbada, entre las cuales podemos mencionar a Kanasín y Umán.

Figura VI.16).- Equipamiento en educación



En los niveles medio superior y superior se contabilizaron únicamente los datos de las escuelas públicas. Para la educación media superior (**bachillerato**) se contabilizaron 87

de ellas dispersos en 5 de los 7 municipios que consta la Zona Metropolitana como sigue: 1 en Kanasín, 79 en Mérida, 4 en Progreso, 1 en Tixpéhual y 2 en Umán, las localidades de Conkal y Ucú no cuentan con este equipamiento, a nivel **superior** se encontraron 25 planteles ubicados en 3 de los 7 municipios de la zona de estudio, como siempre centralizando las instalaciones de este tipo en el municipio de Mérida que cuenta con 22 de los planteles seguido por Conkal con 2 y Progreso con 1.

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) en su documento Sistema Normativo para el Equipamiento Urbano, proporciona lineamientos en cuanto a cobertura de las instalaciones educativas en base a la distancia óptima, en este rubro se agrega una capa de información donde muestra el área de influencia de los planteles educativos según el nivel de éstos. Como se aprecia en el mapa la mayor parte de los planteles de educación de todos los niveles se alojan en la ciudad de Mérida, con ello se hace más marcado el déficit de planteles en la ciudad de Kanasín que por el número de habitantes contra el numero de planteles –no por distancia, ya que en distancias los planteles actuales aparentemente son 'suficientes'- la cobertura educativa es insuficiente, así como en la zona poniente de la ciudad de Mérida en Ciudad Caucel que tiene la misma problemática que Kanasín en todos los niveles educativos.

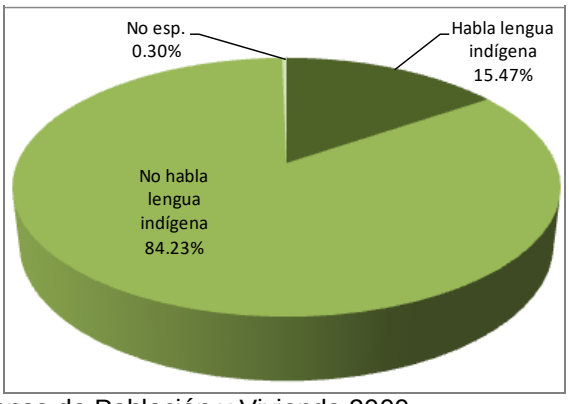
*Los datos de educación provienen de los productos Jerarquía del “Modelo espacial jerarquizado de las localidades del Estado de Yucatán” para los años 2005 y 2010
*la cantidad de elementos representados en el mapa son lo que se tomaron en campo como parte del proyecto de levantamiento de infraestructura y equipamiento de los municipios, complementados con datos tabulares provenientes de la SEP estatal, por tanto no todas las entidades educativas se pudieron ubicar geográficamente. Los planteles de nivel superior privados no se presentan.

VI.3).- Integración del Pueblo Maya al Desarrollo

Distribución territorial de los pueblos mayas

Yucatán es el estado con el mayor número de indígenas (59.2%) hablantes de una sola lengua: la maya. En 22 municipios del estado se da la mayor concentración de los maya hablantes (PED, 2007). Los municipios en los que predomina población maya hablante son: Mérida, Abalá, Timucuy y Tahmek mismos en los que más del 70% de su población habla lengua indígena, siendo el sur y oriente de la región donde se tiene mayor presencia del pueblo Maya.

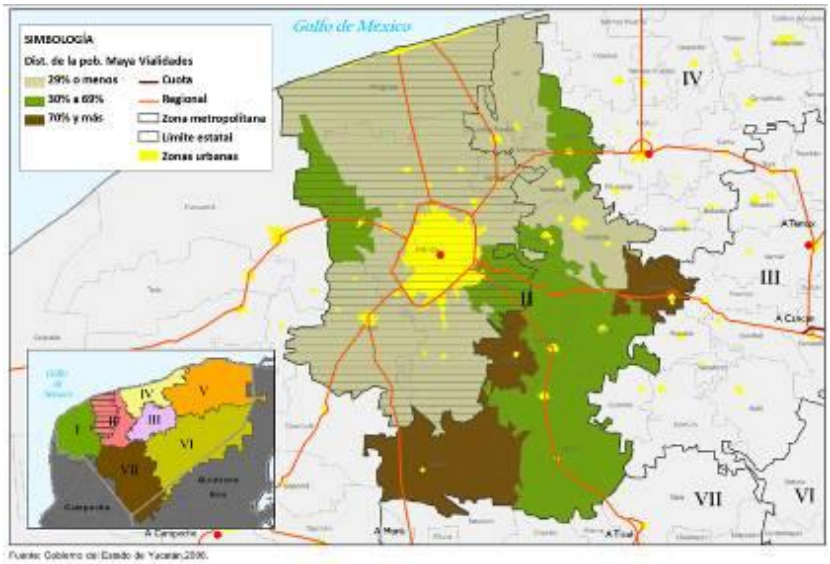
Figura VI.17).- Población de 5 años y más según condición de habla indígena por región y municipio, 2000



Fuente(s): INEGI, 2001: XII Censo de Población y Vivienda 2000.

El municipio de Mérida ocupa el primer lugar estatal por concentrar al mayor porcentaje de población maya hablante (182 mil 733). (PED, 2007). La población hablante de lengua indígena de la región representa el 26.48% del total estatal. El 15.43% de la población mayor a 5 años habla lengua indígena en la región, de ellos únicamente el 0.11% no habla español.

Figura VI.18).- Localización de los pueblos mayas, 2005



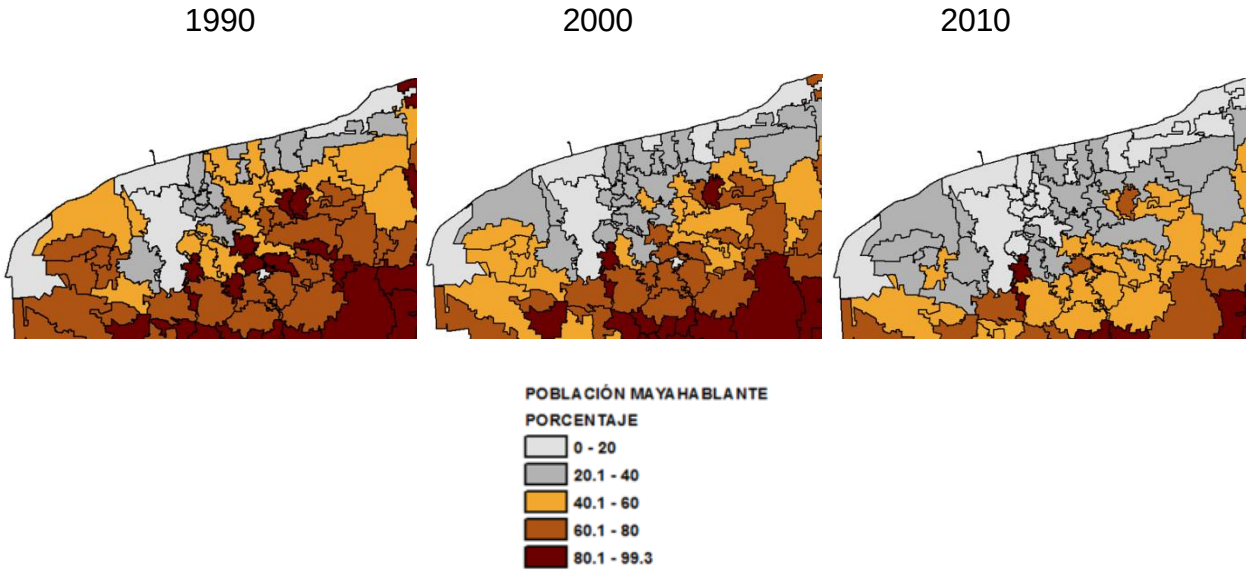
La tasa media de crecimiento anual para el año 2005 en esta región es del 2.06%, la estimada para el quinquenio siguiente, 2005 al 2010 es del 1.43%, decremento sostenido en la tasa que se prevé sea del 0.86% para el año 2030.

En este sentido, los patrones de asentamiento de la población indígena no sólo responden a procesos económicos, sino también a otros de carácter histórico, geográfico y cultural, lo que explica la dispersión de sus localidades, cuyo análisis a través de los cortes generalmente usados para distinguir lo rural y lo urbano son a todas luces insuficientes.

Podemos observar en las siguientes figuras como ha evolucionado lo que podríamos considerar la región Maya en el Estado de Yucatán, en términos de población mayahablante para los años 1990, 2000 y 2010. Es notorio que se presenta una importante reducción de municipios indígenas, en término de la población mayahablante, con respecto del total de la población (considerando la proporción del 40 % del total poblacional).

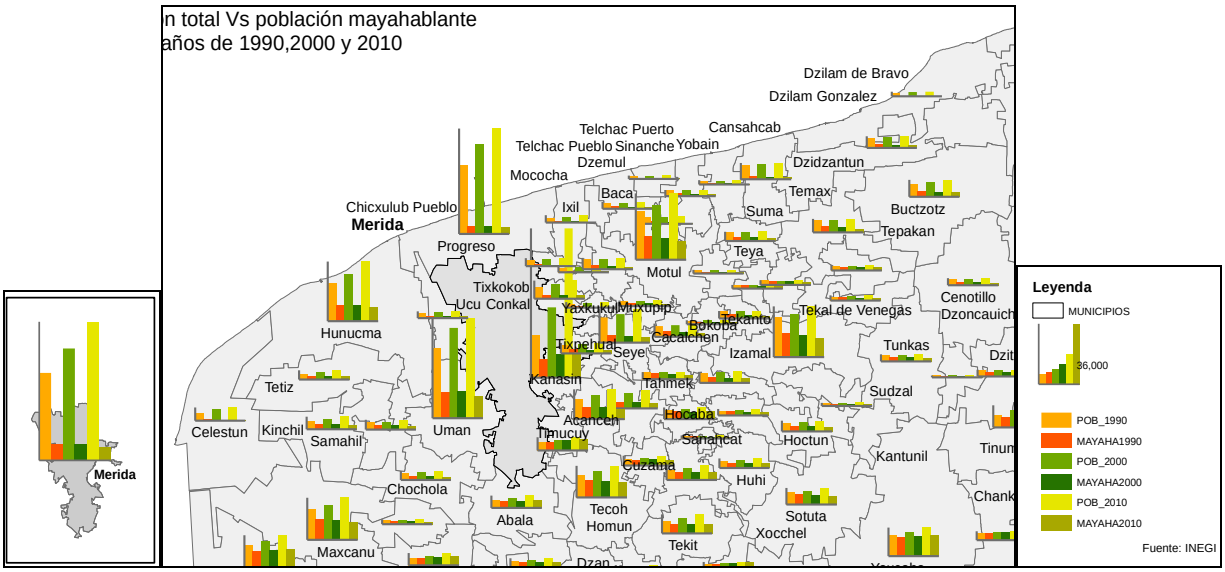
Como se mencionó párrafos arriba, los factores que promueven esta reducción pueden ser muy variados (apropiación de sus territorios por los grupos sociales dominantes, al mestizaje y al paulatino proceso de abandono de sus lenguas, entre otras), pero es evidente que la pérdida de municipios con el carácter indígena se extiende del norte hacia el sur y que al ritmo que va, podríamos esperar que para el 2040 quedarán sólo unos reductos en el sur y el oriente del estado de Yucatán, es decir apreciamos un proceso de extinción cultural y de forma de relación milenaria muy bien adaptada con la naturaleza.

Fiogura VI.19).- Población Mayahablante en la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes para los periodos censales de 1990, 2000 y 2010.



Cabe hacer mención que en dicha forma de relación con la naturaleza se ha garantizado la conservación de una agrobiodiversidad que hoy sigue pesando a nivel nacional como un importante banco de germoplasma. Lo anterior se aprecia en las figuras que se presenta más adelante, donde se observa que las áreas mejor conservadas y con un uso de agricultura de temporal (milpas) se encuentran precisamente en donde se mantienen los municipios indígenas.

Figura VI.20).- Población total y maya hablante para los años 1990, 2000 y 2010.



Se observa que en muchos municipios del norte de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes, así como del estado de Yucatán, la población mayahablante ha disminuido con respecto a la población total del mismo,particularmente en algunos de ellos la presencia de no mayahablantes se ha incrementado de manera importante mientras que la mayahablante crece a tasas más bajas, perdiendo su carácter de municipio indígena, en otros casos, donde la población total crece de manera baja, la población mayahablante ha

disminuido de manera importante, probablemente por procesos de migración, o por pérdida de la lengua maya.

Desarrollo social del pueblo maya

Los municipios con 75% y más de maya hablantes en la entidad se encuentran en las categorías de alta y muy alta marginación. La pobreza afecta de manera directa a la población indígena, en tres municipios con población de 5 años y más de habla indígena: Timucuy, Abalá y Tahmek, con porcentajes que van del 92.9% al 65%; en la región, el 71.65% de la población indígena percibe hasta dos veces el salario mínimo y presentan tasas de desempleo abierto del 0.89, la más alta a nivel estatal.

Conforme a datos del 2005, en los municipios de Timucuy, Abalá y Tahmek, el porcentaje de la población en condición de pobreza alimentaria va del 30% al 19% respectivamente, siendo el primero de ellos el más alto de la región; en pobreza de capacidades es nuevamente Timucuy el que posee el mayor índice de la región con más del 40%, situación similar para el caso de pobreza de patrimonio con el 69.3%.

La situación anterior se observa en los otros dos municipios en los que más de la mitad de su población se encuentra en condición de pobreza de patrimonio, por arriba del promedio estatal, al igual que en caso de la pobreza de capacidades con índices del 25%.

Los municipios de Tahmek, Abalá y Timucuy son mayoritariamente mayas, el primero tiene una tasa de natalidad inferior a la del estado (18 nacimientos por cada mil habitantes), para el caso de los dos siguientes la tasa es de 23 nacimientos, superior incluso a la estatal.

La Tasa de Bruta Mortalidad indica que el pueblo maya con mayor número de defunciones es Tahmek, seguido de Timucuy y Abalá, en los tres caso su TBM es superior a la del estado incluso a la regional. Las condiciones de derechohabientes de la población maya son muy bajas, más del 50% de la población es no derechohabiente, condición que dificulta su acceso a los sistemas de salud.

VI.4).- Equidad de Género

La población femenina en el estado representa el 50.7% del total de los habitantes según datos del año 2005, de esas poco más de novecientas mil mujeres, el 58% habita en la Región II, en la que la población femenina es ligeramente mayor con respecto a la población masculina, pues existe una diferencia positiva de 26 mil 084 mujeres, de una población total un poco mayor al millón de habitantes.

En el estado son cada vez más las mujeres que acceden, permanecen y concluyen una formación educativa, posponen sus uniones conyugales, se incorporan al mercado de trabajo y permaneces laboralmente activa aun con la maternidad. (PED, 2007). En el quinquenio que comprende el paso del año 2000 al 2005, la población femenina en la entidad se incrementó en poco más de ochenta y dos mil mujeres, un crecimiento del 8.9%, en tanto en la Región II se incrementó en un 0.4%, poco más de 53 mil mujeres. Al interior de la región, el mayor aumento de población femenina se observa en los municipios de Chicxulub Pueblo, Kanasín y Yaxkukul, en tanto el menor se presenta en Tahmek.

El índice de femeneidad para el 2005 en el estado, es del 1.03, en contraste con el índice de masculinidad registrado para el mismo año del 0.97. De los 19 municipios que comprenden la región II, sólo en Tetiz ese índice es mayor al índice estatal, al registrar el 1.06, en tanto el resto de los municipios presentan índices menores al 1.0.

Al interior de la región el menor índice de hijos nacidos vivos se presenta en Mérida, asociado a la baja en el índice de natalidad de las regiones urbanas, con un promedio de 2.03, misma localidad en la que se registra el mayor porcentaje de hijos sobrevivientes en la región con el 94.81%. En contraste, es en el municipio de Abalá en donde se observa el mayor promedio de hijos nacidos vivos, 2.70, en tanto el porcentaje de sobrevivencia de estos más baja de la región se registra en Seyé con el 88.9%.

El porcentaje de hogares según sexo del jefe de familia es uno de los indicadores que permiten observar el papel de la mujer en el desarrollo de la familia, en el 2005, en Yucatán se registran 88 mil 117 hogares encabezados por una jefa de familia, el 20% del total de los hogares. En la Región II dicho indicador muestra que el 23.34% de los hogares están presididos por una mujer, lo que representa un incremento del 3% con respecto al año 2000.

El porcentaje más alto de hogares encabezados por mujeres se registra en la zona urbana de Mérida, Progreso y Kanasín con índices superiores al 20%; no obstante, destacan ocho municipios más que presentan porcentajes superiores al 15% entre los que se encuentran Yaxkukul, Umán y Baca, entre otros. El resto de los municipios de la región tienen porcentajes de dos dígitos, con excepción de Timucuy con el 8.6%.

La participación de la mujer es uno de los aspectos a incentivar en la región ya sea involucrándose en actividades culturales, recreativas y económicas para así aprovechar su potencial. En la zona costera las organizaciones de mujeres han demostrado su tenacidad y perseverancia por su participación en actividades productivas y en actividades para el bienestar de sus comunidades.

Grupos vulnerables

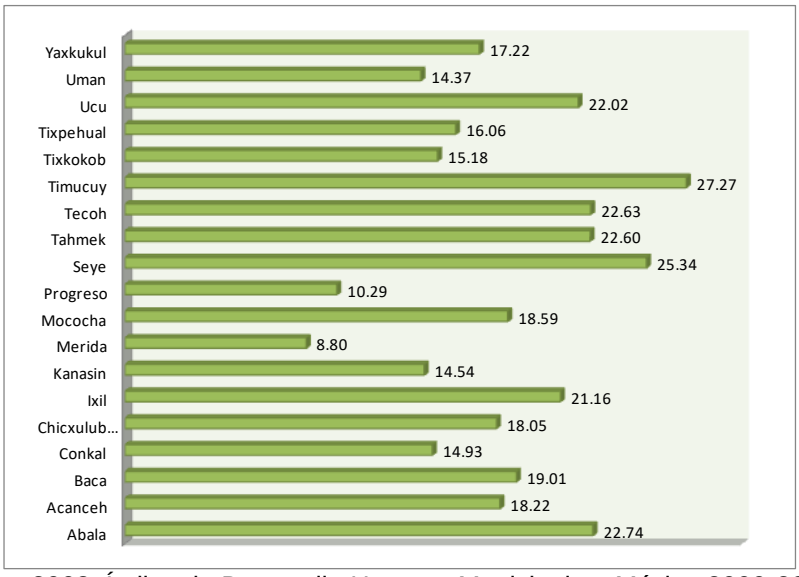
Niños y niñas

La población infantil es considerada como un grupo vulnerable que al año 2005 representa el 52% de la población de la Región II. Evitar la mortalidad infantil es uno de los aspectos que disminuye la vulnerabilidad de este segmento de la población; al año 2005 la entidad tuvo una Tasa de mortalidad de 27%.

Al interior de la Región II el municipio con mayor tasa de mortalidad infantil es Timucuy (27.3%), caso contrario es Mérida (8.8%), municipio con la menor tasa de mortalidad infantil de la región, incluso del estado, siendo este municipio en el que mejor atención medica reciben la población infantil.

A pesar de que sólo un municipio de la región supera la tasa de mortalidad que se tiene a nivel estatal, es importante disminuir aún más la muerte de infantes mejorando los servicios de salud de la región, ya que se concentran Mérida.

Figura VI.21).- Tasa de Mortalidad Infantil, 2005.



Fuente: PNDU-México 2008: Índice de Desarrollo Humano Municipal en México 2000-2005

A partir del índice de riesgo nutricional ponderado por población, para el año 2000, Yucatán presenta un riesgo alto y ocupa el octavo lugar nacional en el nivel de riesgo (Roldán y Cols. 2004). Es decir, se encuentra entre los diez estados con mayor riesgo de que su población padezca desnutrición en la niñez.

Adultos mayores

Los adultos mayores representan un sector particularmente vulnerable debido a la carencia de fuentes de empleo, pero sobre todo por el abandono familiar. La población mayor de 60 años en la región es de 92 mil 091 personas, de las cuales, el 45.1% son hombres, cifra que comparada con la población total de ese rango de edad en el estado representa el 25.5%. Con respecto al resto de las regiones que conforman la entidad, la Región II alberga la mayor población de adultos mayores, el 56.5% estatal, en tanto al interior de esta, por municipio, Mérida aporta el 78.5% de los adultos mayores de la región, situación propia del área metropolitana de Yucatán.

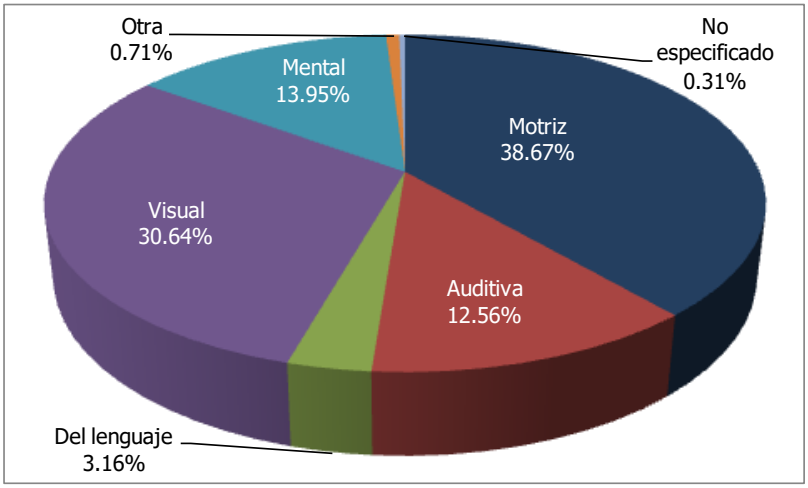
Por sexo, la población de mujeres mayores de 60 años es superior a los hombres, pues éstos representan el 48.6% del total estatal, en el caso e la Región II el porcentaje de mujeres es aun más elevado al significar casi el 55% de las habitantes de esta, poco más de cuatro puntos porcentajes más que el estatal. Al interior de la región, sólo en Mérida se rebasa el porcentaje referido, pero en tres más son superiores al 50%: **Progreso**, Tecoh y Tixpéhual; en tanto el menor porcentaje de mujeres adultas mayores se observa en **Ixil** con el 42.8%.

Personas con capacidades diferentes

Al año 2000 se registró un 2.9% de personas con discapacidad en el estado, de ellas, el 56.3% habitan en la Región II. En esta región predomina la condición de discapacidad motriz (43.3%), seguida de la de tipo visual (34.3%). En Mérida y **Progreso** concentran el 81.4% de las personas con capacidades diferentes. En términos porcentuales y con respecto a la población total de cada uno de los 19 municipios que integran la región, la

mayor proporción de personas con discapacidad se localizan en Tahmek, Abalá, Yaxkukul e **Ixil**.

Figura VI.22).- Distribución de la población según condición y tipo de discapacidad por región y municipio, 2000



Fuente: INEGI,2001: XII Censo General de Población y Vivienda 2000, Resultados Definitivos.

Juventud

Nivel de Vida de la Juventud

La mitad de la población de Yucatán tiene menos de 25 años y 70% menos de 35. (PED, 2007). La población de 15 a 24 años de edad en la región representa el 55.5% de la población total de ese rango de edad en la entidad, de ellos, el 49.7% son hombres y el 50.3% mujeres. Al interior de la Región II es Mérida la que aporta el 73.7% de la población joven, situación que se refleja en los demás municipios urbanos de la región, aunque en proporciones muy menores a la mencionada.

Doce municipios más de la región aportan porcentajes menores al 1%, siendo los más escasos los de Yaxkukul, Ucú y Tahmek. Por sexo, en seis municipios los porcentajes de mujeres son superiores al 50%, la mayoría de ellos de carácter urbano, en tanto el resto e ubica por debajo de esa cifra siendo el menor el registrado en Tixpéhual con el 45.8%.

Empleo e ingreso

En años recientes aumento el número de jóvenes que ingresaron al mercado laboral, sin embargo, sólo el 32.9% de los jóvenes de entre 20 y 29 años se incorporaron a la población ocupada en la entidad. (PED, 2007).

Educación

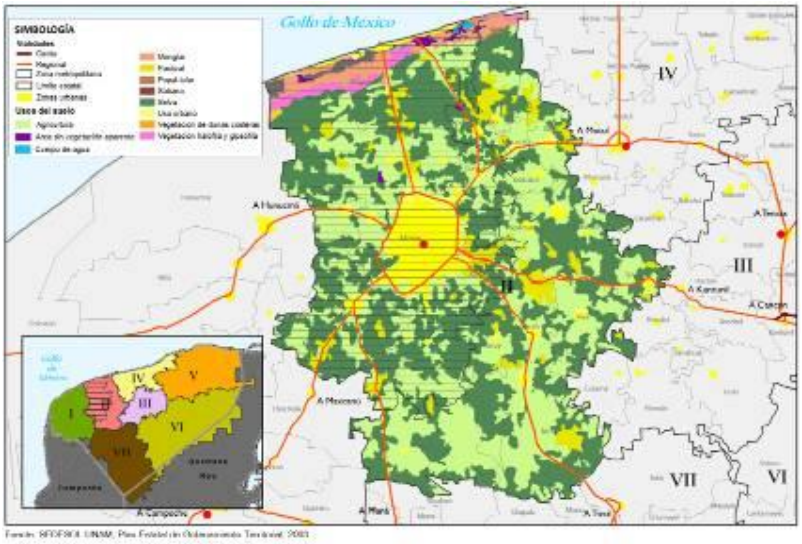
A nivel estatal se tiene que el 97% de los jóvenes de 15 años o más saben leer y escribir y el 63% de ellos tienen un grado posterior a la primaria. La población mayor de 15 años en condición de analfabetismo es del 29.6% con respecto al total en esa misma condición en la entidad, porcentaje del que 61.8% son mujeres. El nivel educativo de la población

joven es en promedio inferior al séptimo grado, equivalente al primer año de secundaria, lo que apunta a la conclusión de la primaria completa, derivada de la amplia zona urbana que compone esta región; en tanto en siete municipios más el grado de escolaridad es de sexto grado, en Ucú, Seyé, Techoh, Abalá y Timucuy, el promedio escolar es menor a cinco años, siendo el más bajo 4.68 grados. En Mérida, el grado promedio escolar de las mujeres es de secundaria concluida, en **Progreso** y Baca es de siete grados, en el resto de los municipios el grado de escolaridad femenina fluctúa entre tercero y cuarto de primaria, siendo el más bajo registrado en Abalá. Por lo que toca a la población masculina, el índice más bajo se presenta nuevamente en Abalá, aunque un año más que el de carácter femenino, con excepción de Mérida, en doce municipios más los hombres iniciaron la educación secundaria.

VI.5).- Uso de suelo

El uso del suelo hace referencia a la manera en que el hombre hace uso del recurso para el desarrollo de las actividades que le permiten obtener los bienes que necesita en su vida cotidiana, pudiendo orientarse hacia la agricultura, la ganadería, el uso habitacional, el aprovechamiento forestal, entre otros, o bien, comprende los ecosistemas que se encuentran en la entidad medianamente antropizados (o perturbados por la acción humana).

Figura VI.23).- Usos del suelo, 2005



En Estado de Yucatán el uso de suelo predominante por la extensión que abarca es el correspondiente a la vegetación secundaria, que se refiere a las asociaciones vegetales producto de una alteración o modificación de los ecosistemas originales del Estado. El segundo uso en orden de importancia es el Agrícola, que comprende básicamente la superficie estatal que se destina a las labores del campo y que sufrido una disminución importante debido a la caída de la producción de henequén. El ámbito de otros tipos de vegetación incluye la vegetación hidrófila, de galería, tular, manglares, halófila y gipsófila y de duna costera; ubicándose por su extensión en tercer lugar a nivel estatal. Le siguen en importancia la vegetación de selva, las áreas urbanas, los pastizales del noreste del Estado, las áreas sin vegetación aparente y los cuerpos de agua. En la Región II Noroeste el uso de suelo predominante es la vegetación secundaria con 264 mil 488 hectáreas, le sigue el uso agrícola con 65 mil 708 hectáreas, áreas urbanas con 23 mil 788 hectáreas,

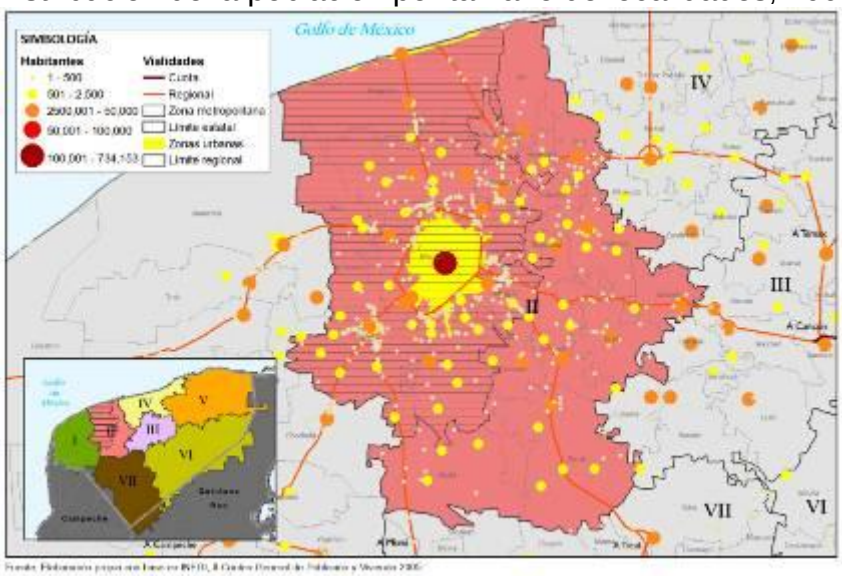
así como otros tipos de vegetación (10 mil 368 hectáreas) y en menor proporción pastizal, áreas sin vegetación aparente y cuerpos de agua.

La región pertenece al Distrito de Desarrollo Rural No. 178 Mérida y tiene sede en la ciudad del mismo nombre, en total se conforma por 60 municipios de la entidad. (SAGARPA, 2008). La importancia de la Región y en general del Distrito No. 178 es que las características físicas de la zona ven favorecido el desarrollo de actividades agrícolas, sin embargo, la capacidad del suelo es una limitante por no ser apto para ser arable. El suelo permite, con ciertas restricciones, el cultivo de frutales, hortalizas y pastizales con bajo condiciones de riego y con limitantes en la zona costera por el alto contenido en sales. La ganadería en este distrito presenta condiciones poco favorables al presentarse en la zona un periodo superior a 5 meses de sequia y por consiguiente se tiene escasez de forraje. La vocación del suelo del distrito tiene aptitud para la ganadería menor (ovina y caprina). La vegetación del distrito en su mayoría es del tipo secundario, no apta para la explotación silvícola permanente.

Características del sistema de asentamientos humanos

Los análisis realizados indican que los municipios que integran la Región II, constituyen un solo territorio de actuación, dentro del cual existen factores de carácter ambiental, urbano-rurales y de especialización económica, entre otros, que contienen valores y representaciones propias. Desde hace dos décadas la Zona Metropolitana de Mérida ha sido sometida a un acelerado proceso de expansión urbana y de especialización económica, que ha provocado impactos desiguales en el resto de la entidad. En la ciudad de Mérida se concentra el 40.4% de la población del estado según el II Conteo de Población y Vivienda 2005, INEGI.

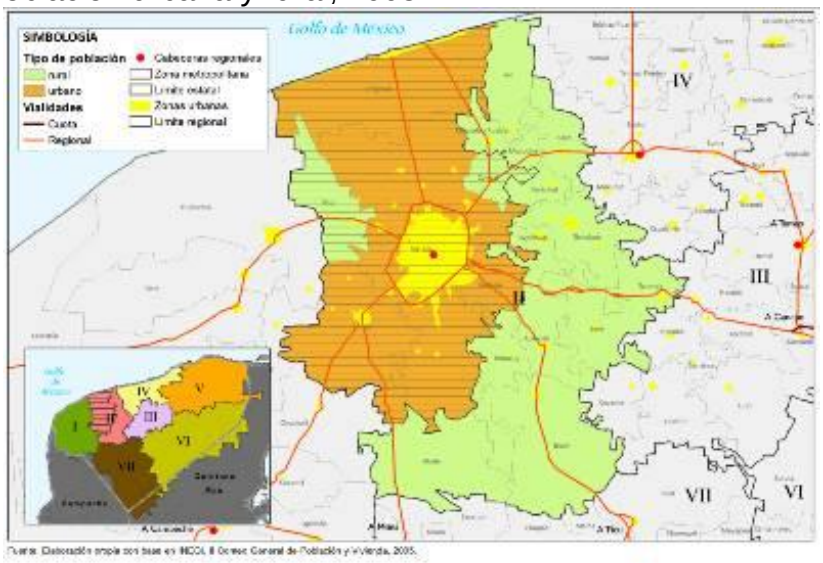
Figura VI.24).- Distribución de la población por tamaño de localidades, 2005



En comparación con los municipios de la región, incluso de la entidad, sólo Mérida tiene un alto grado de urbanización, si bien, otros 3 municipios cuentan con una localidad con más de 15 mil habitantes, aún conservan muchas características, usos y costumbres rurales. En la zona metropolitana de Mérida se concentra el 57% de la población total y casi 60% de la población urbana del estado. La marginación y los desequilibrios regionales se hacen presentes en las 431 localidades rurales que completan la

integración de la Región II, al estar dispersas se dificulta la dotación de servicios básicos. En Mérida como localidad, habitan más de 700 mil personas dando cuenta de la importante concentración de población en la región. Las zonas costeras cercanas a las ciudades, como es el caso de Puerto Progreso, han sufrido procesos acelerados de urbanización al funcionar como polos turísticos altamente atractivos para la inversión. Sin embargo, lo anterior representa un fuerte riesgo para las sociedades rurales, los espacios agropecuarios y las reservas ecológicas, las cuales enfrentan la urbanización sin contar con alternativas viables de desarrollo y con severas restricciones de suelo para el crecimiento urbano.

Figura VI.25).- Población urbana y rural, 2005



Según datos del 2005, se registra un promedio de 275 habitantes por kilómetro cuadrado en la región, cifra que es rebasada en los municipios de Mérida (884.7) y Kanasin (502.7), en cuatro municipios más: Umán, **Progreso**, Chicxulub Pueblo y Abalá, la densidad demográfica es superior a los 100 habitantes por km^2.

La pérdida de productividad del campo y la acelerada tendencia de privatización del suelo en la región producto de la urbanización, han propiciado la especulación y las ventas irregulares de terrenos, especialmente en Mérida y Progreso.

Los patrones de distribución de la población influyen en la formación del sistema de ciudades que se articula a partir de los servicios que ofrece una localidad a sus propios habitantes y a las comunidades ubicadas en torno a ella; la afluencia de la población depende de la oferta de servicios.

Los niveles de los servicios que ofertan las localidades se pueden clasificar en tres: Alto, en el caso de Mérida, por su amplia oferta educativa, de salud, bancaria, así como por el monto de producción en industria, comercio, que nos indica la cantidad de intercambios y servicios brindados.

En un nivel medio, **Progreso** es el único asentamiento que cubre este papel en el territorio costero. De la misma manera se observa que los servicios básicos de agua entubada, electrificación y drenaje son mayores.

Figura VI.26).- Mapa. Densidad habitacional, 2005

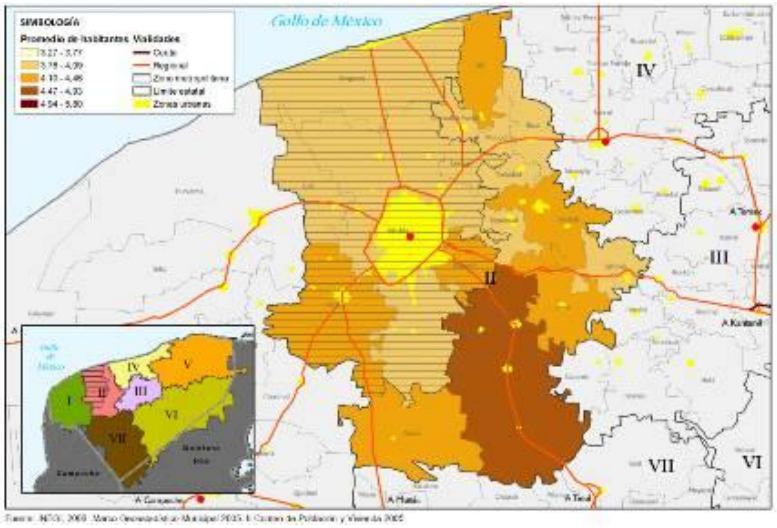


Figura VI.27).- Porcentaje de viviendas que no disponen de energía eléctrica

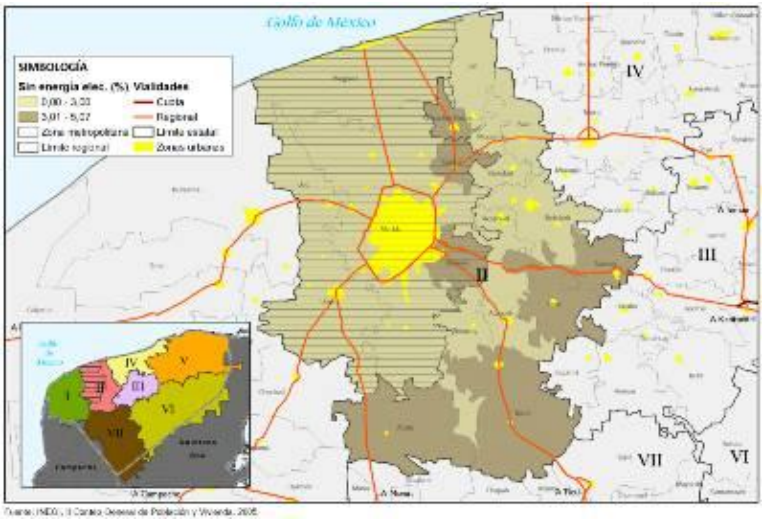


Figura VI.28).- Mapa. Porcentaje de viviendas que no disponen de agua entubada.

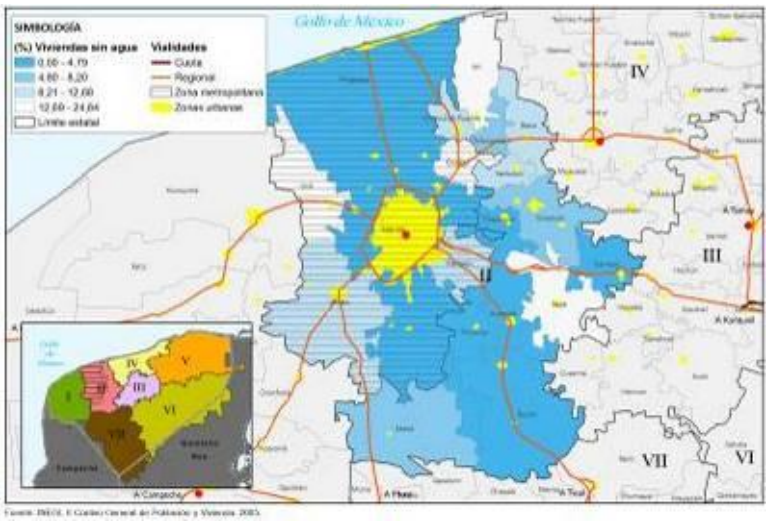
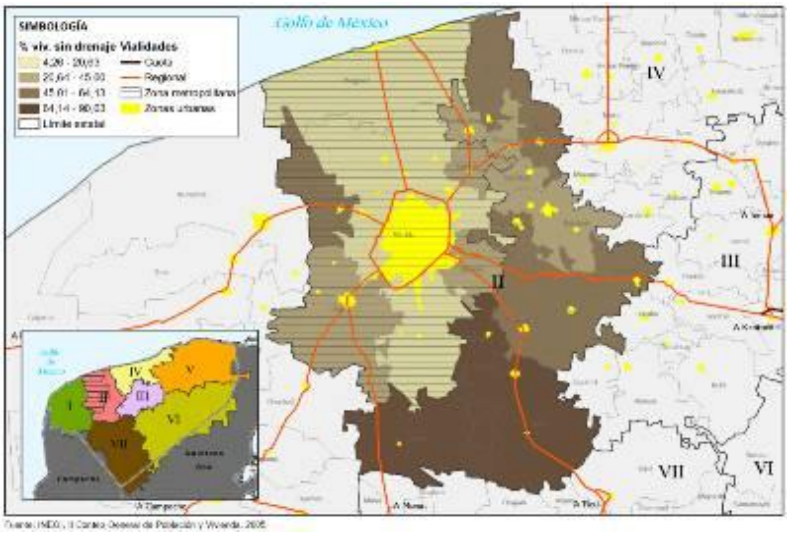


Figura VI.29).- Porcentaje de viviendas que no disponen de drenaje



La disposición de aguas residuales de la región Metropolitana esta íntimamente ligado a la calidad del agua para consumo humano, sin embargo, el uso excesivo de éste, la falta de saneamiento, los efectos de las obras y los procesos productivos que se realizan, alteran el ciclo de agua, evitan su renovación natural y ponen en riesgo a todos los componentes del sistema hidrológico. Con afectaciones a los recursos naturales, muchas veces irreversibles.

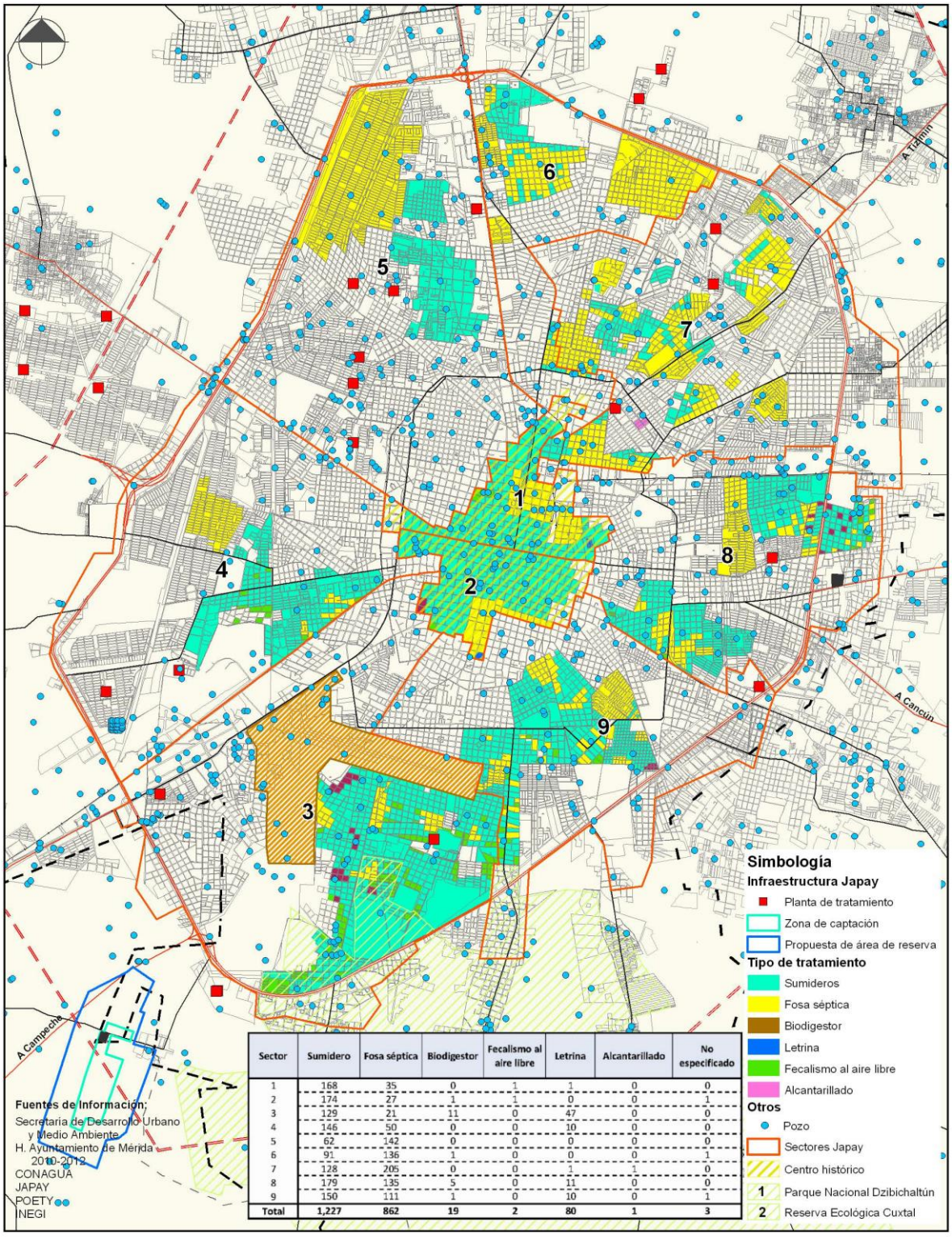
Es de suma importancia entender que las descargas contaminantes, pueden afectar las fuentes de agua para la región, por ejemplo, tenemos el caso de la franja de recolección de agua potable ubicada en el sureste del área metropolitana (JAPAY I), que en época de secas, la disminución del nivel de agua puede generar contracorrientes que provocaría que los contaminantes que se vierten a través de fosas sépticas, pozos pluviales y otros, puedan ser captados por los campos de recolección que sirven para suministrar del vital líquido a gran parte de la Zona.

Aunado a lo anterior, está el acelerado crecimiento urbano de las grandes ciudades de la Región, que amenaza con invadir los campos de pozos de abasto de agua potable, como el caso de los pozos de Temozón que surten a la Ciudad de Progreso. El crecimiento urbano es un foco importante de contaminación, puesto que la principal causa de contaminación del subsuelo son las descargas domésticas, con más del doble de descargas que los desechos de mixtamalización, servicios municipales y de industriales en proceso juntos. En síntesis, un inadecuado desalojo y tratamiento de las aguas residuales podrían ser catastróficas para el medio ambiente e indiscutiblemente para las personas del la Zona, por ello es imperativo identificar que se esta haciendo con estos residuos y establecer políticas claras y estrictas sobre su disposición.

La información cartográfica contiene los tipos de tratamiento que se le da a las aguas negras en zonas específicas de la ciudad de Mérida, éstos se dividen en 6 clases: sumideros, fosa séptica, biodigestor, utilizado principalmente en los desarrollos de fraccionamientos, así como letrina, fecalismo al aire libre y alcantarillado, quedando como predominantes, el uso de sumidero y las fosas sépticas con 1,227 y 862 viviendas respectivamente, cifras que se obtienen en base a las encuestas que se hicieron de una muestra de la población.

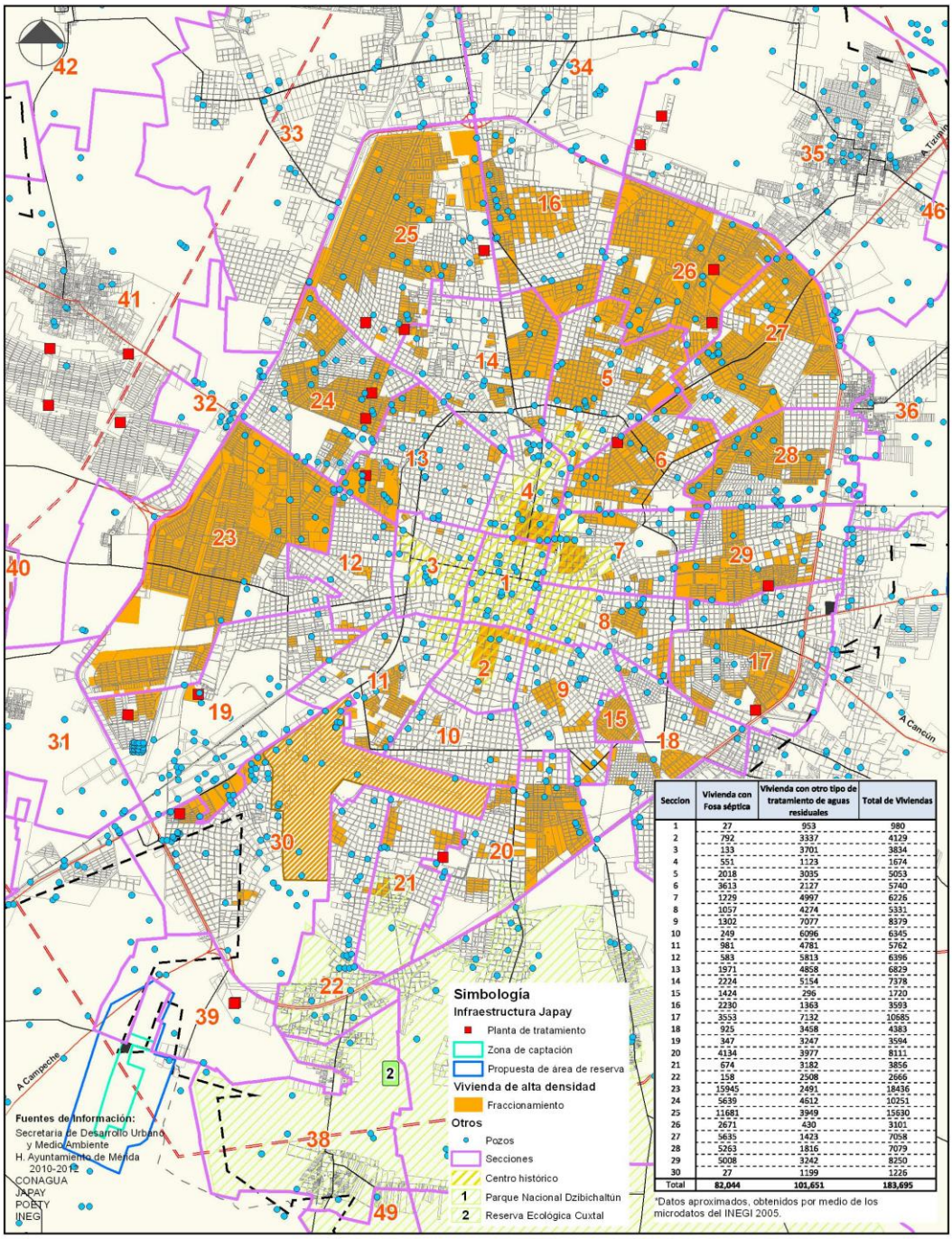
Así como incluye los datos de 82,044 viviendas adicionales que se estiman que tienen fosa séptica. así de la misma manera se adiciona las zonas de captación de la JAPAY, las zonas de amortiguación, así como algunos de los diferentes pozos que hay en la zona metropolitana, igualmente se agrega las plantas de tratamiento, las cuales se contabilizan 24, ubicadas exclusivamente en fraccionamientos para el año 2010.

Figura VI.30).- Muestreo de sistemas de tratamiento domiciliar en la Ciudad de Mérida en los diferentes sectores definidos por la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán.



Sector	Sumidero	Fosa séptica	Biodigestor	Fecalismo al aire libre	Letrina	Alcantarillado	No especificado
1	168	35	0	1	1	0	0
2	174	27	1	1	0	0	1
3	129	21	11	0	47	0	0
4	146	50	0	0	10	0	0
5	62	142	0	0	0	0	0
6	91	136	1	0	0	0	1
7	128	205	0	0	1	1	0
8	179	135	5	0	11	0	0
9	150	111	1	0	10	0	1
Total	1,227	862	19	2	80	1	3

Figura VI.31).- Fraccionamientos censados por tipo de sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas.



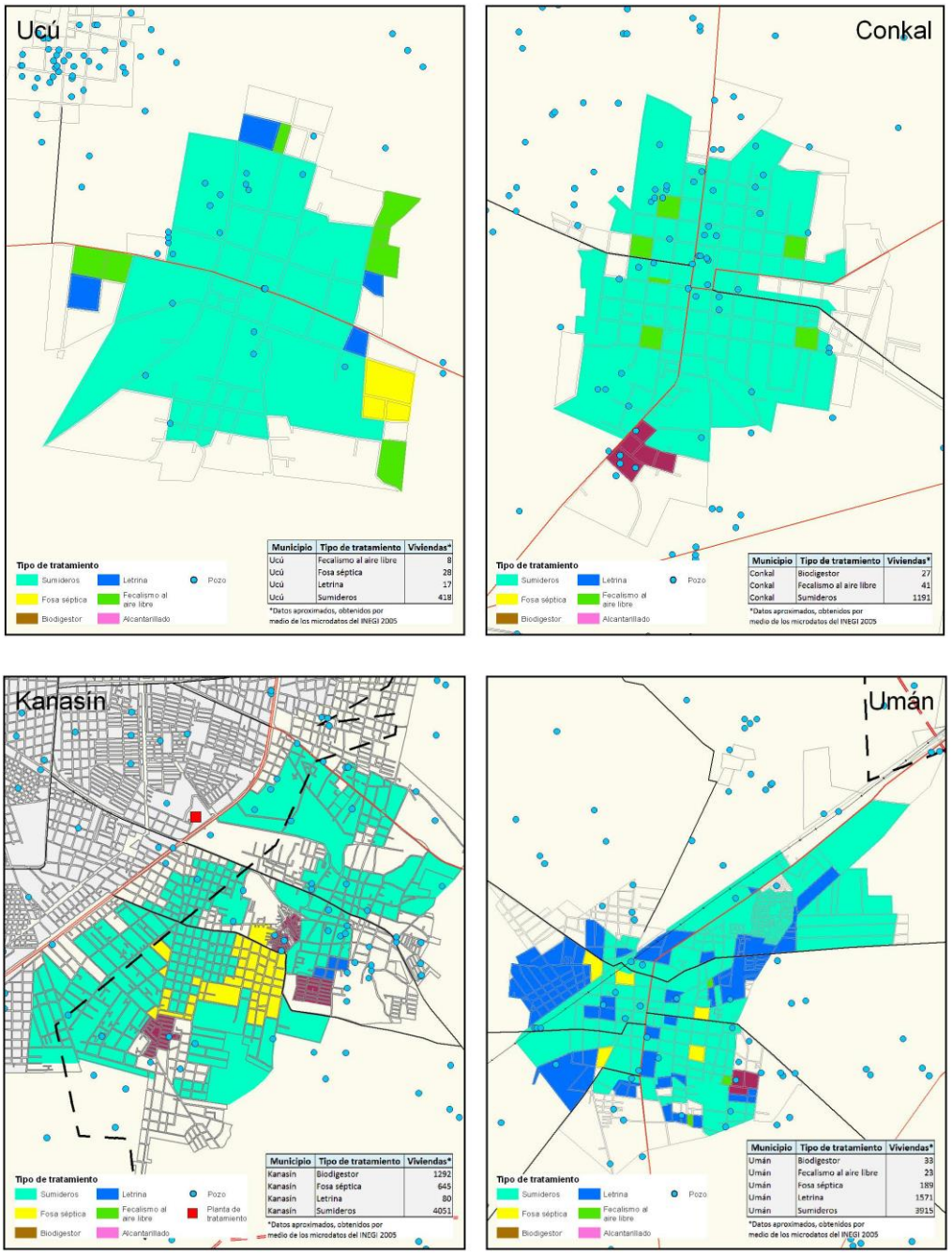
Seccion	Vivienda con Fosa séptica	Vivienda con otro tipo de tratamiento de aguas residuales	Total de Viviendas
1	27	953	980
2	792	3337	4129
3	133	3701	3834
4	551	1123	1674
5	2018	3035	5053
6	3613	2127	5740
7	1229	4997	6226
8	1057	4274	5331
9	1302	7077	8379
10	249	6096	6345
11	981	4781	5762
12	583	5813	6396
13	1971	4858	6829
14	2224	5154	7378
15	1424	296	1720
16	2230	1363	3593
17	3553	7132	10685
18	925	3458	4383
19	347	3247	3594
20	4134	3977	8111
21	674	3182	3856
22	158	2508	2666
23	15945	2491	18436
24	5639	4612	10251
25	11681	3949	15630
26	2671	430	3101
27	5635	1423	7058
28	5263	1816	7079
29	5008	3242	8250
30	27	1199	1226
Total	82,044	101,651	183,695

En la ciudad de Mérida la mayor parte del agua residual está siendo dispuesta directamente al subsuelo, a través de tanques sépticos, sumideros, letrinas y en algunos fraccionamientos existen redes de alcantarillado sanitario conectadas a pozos profundos, a través de los cuales se inyecta el agua residual al manto salino, que subyace al agua dulce.

En la ciudad de Mérida, 107,065 viviendas disponen sus aguas residuales mediante fosas sépticas, esto representa un 40 % del total de 267,663 viviendas registradas. De igual manera, se indica que de las 107,065 viviendas que cuentan con fosa séptica, el muestreo realizado señala que el 60% nunca se ha efectuado acciones de mantenimiento

o limpieza de estas; es decir, 64,239 viviendas no cumplen con este proceso. Cabe señalar, que de acuerdo con la fuente del organismo operador (JAPAY), solamente 28,187 viviendas disponen de sistema de tratamiento colectivo, donde las aguas residuales son colectadas a través de alcantarillado sanitario y destinadas para su depuración a una planta de tratamiento. Estas viviendas están en su mayoría ubicadas en nuevos desarrollos habitacionales.

Figura VI.32).- Sistemas de tratamiento de aguas residuales en los Muncipios de la Zona Metropolitana de Mérida.



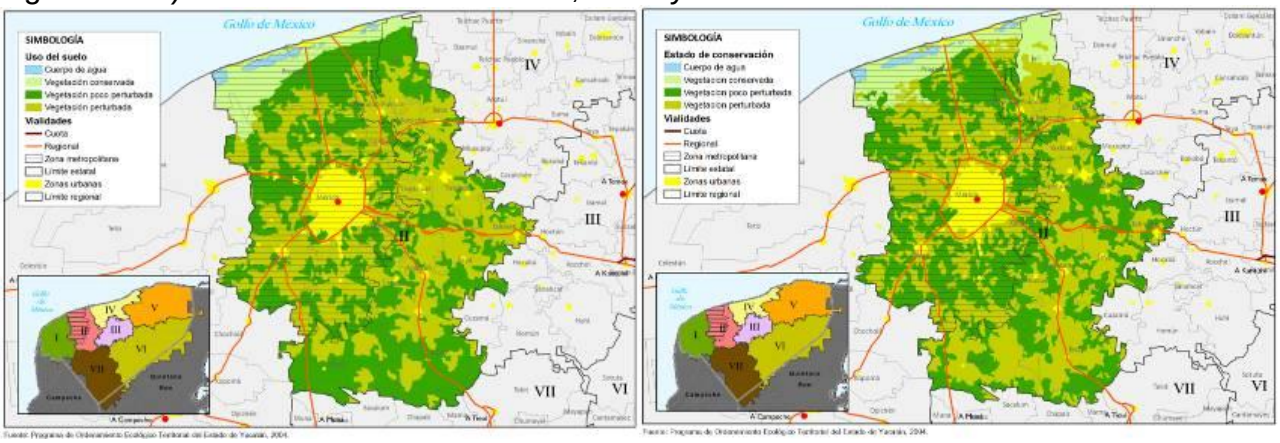
A largo plazo, la acumulación de lodo y espuma hace que se reduzca la capacidad volumétrica efectiva del tanque; por tanto, es conveniente realizar bombeos periódicos del contenido del tanque a manera de mantenimiento programado. El volumen final de lodo producido dependerá de la naturaleza de los sólidos contenidos en el agua residual,

además de la temperatura y el tiempo. En los Municipios de la zona metropolitana, el principal sistema es el sumidero, como se muestra en las siguientes figuras.

Cambios de uso del suelo en la Región II

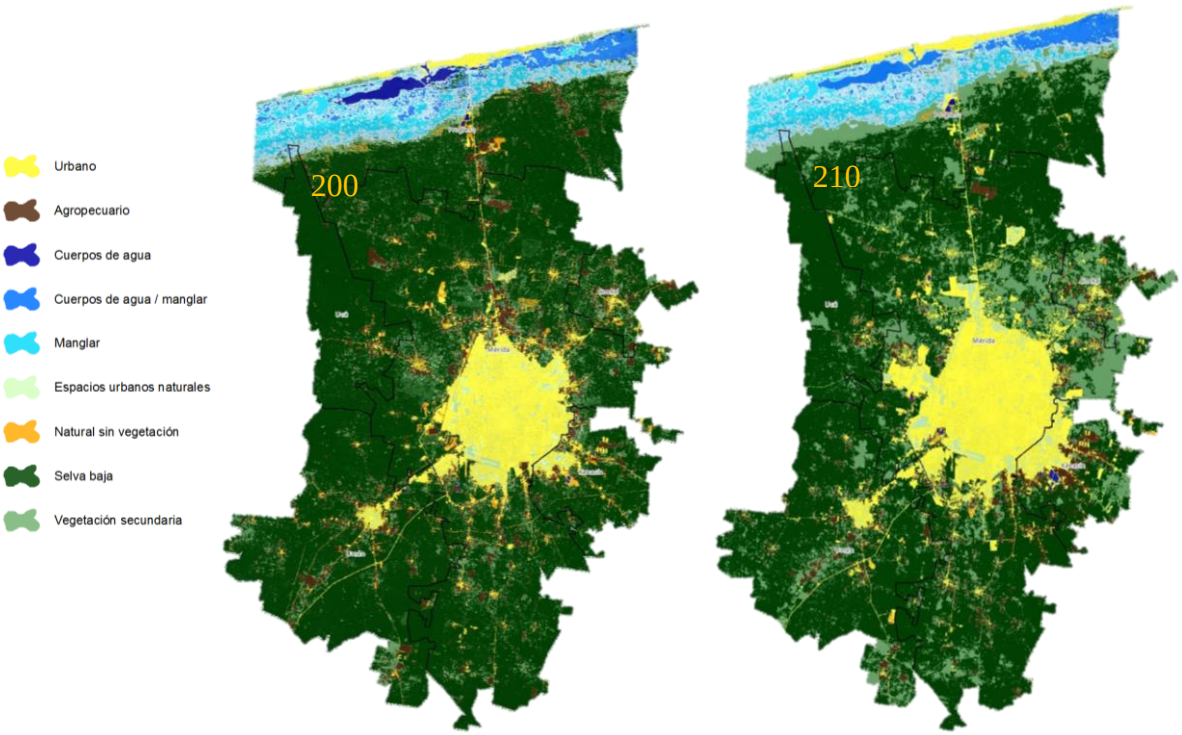
Durante los últimos 20 años, más de la mitad de la vegetación del estado ha sufrido un severo deterioro y cambios relevantes a causa de las actividades humanas. (PED, 2007). La deforestación es uno de los principales problemas que enfrenta el territorio, la explotación forestal de maderas preciosas, la agricultura temporal itinerante y las quemas.

Figura VI.33).- Cambios de uso de suelo, 1976 y 2000



El Programa Regional de la Zona Metropolitana de Mérida (2014), da cuenta de los cambios en el uso de suelo de la Zona Metropolitana entre el año 2000 y 2014, documentando una pérdida de 32,072 hectáreas de selva, es decir 6.27 hectáreas al día.

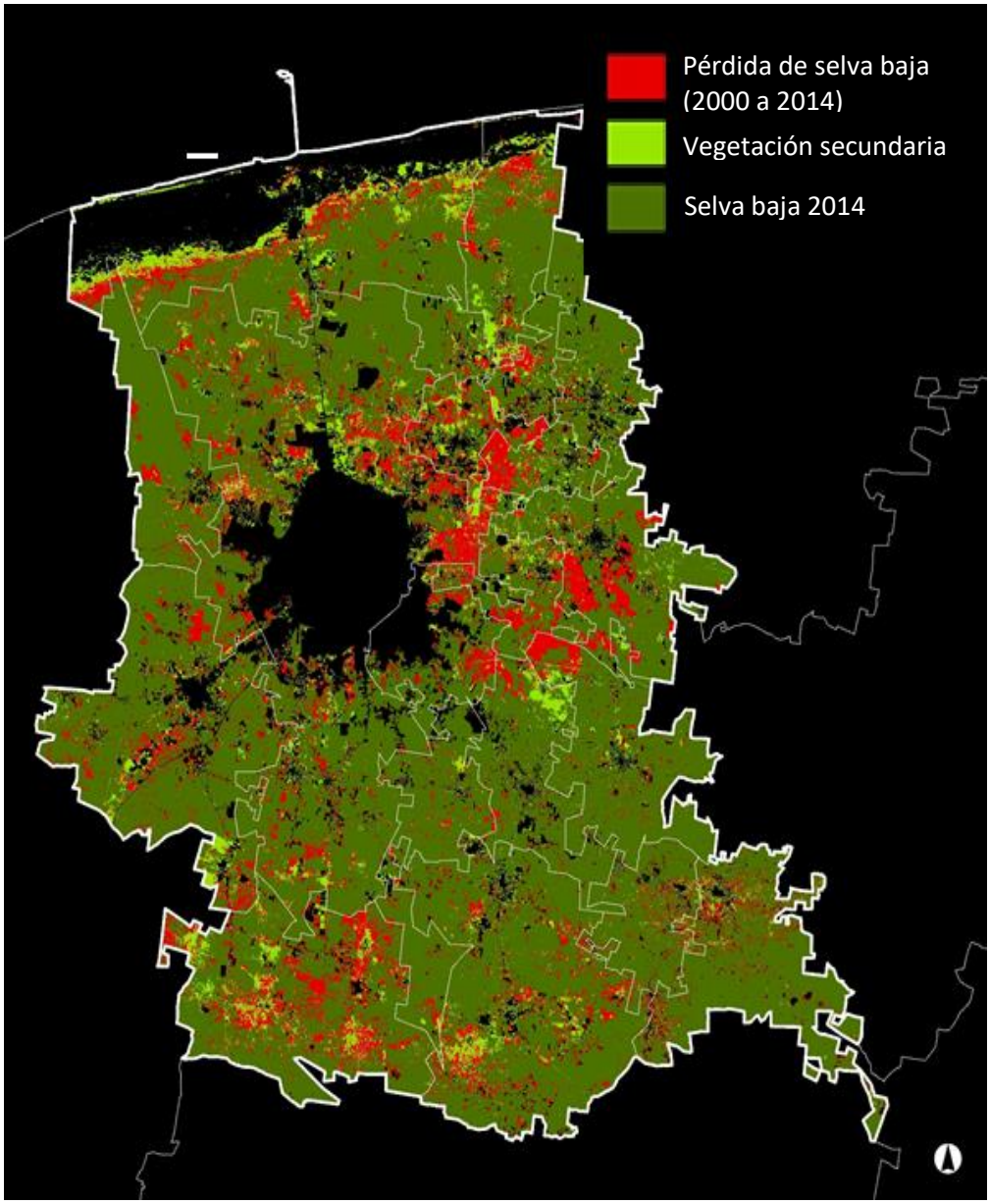
Figura VI.34).- Comparativa del uso del suelo entre el año 2000 y 2014 en la Zona Metropolitana de Mérida.



En la región se observa la perdida de vegetación en la zona cercana en la costa y en el

área cercana a la zona metropolitana, esta región es la que ha destinado una mayor proporción de suelo a la urbanización. Según se muestra en el siguiente mapa, la vegetación perturbada ha cobrado significativa presencia, al norte de la región, así como en el sur de esta. El crecimiento desordenado del estado ha traído como resultado la pérdida de casi el 40% de ecosistema costero. (PED, 2007)

Figura VI.35).- Perdidas de selva baja caducifolia en la Zona Metropolitana de Mérida entre los años 2000 y 2014.



Infraestructura de Comunicaciones y Transportes

Uno de los elementos estructuradores del territorio de la entidad es el sistema carretero. El estado está estructurado básicamente con tres ejes carreteros: la carretera 261 que une Mérida con **Puerto Progreso**, y la 180 en dos partes, el tramo de carretera que una a Mérida con Campeche y corre a lo largo del suroeste de Yucatán y el tramo que va hacia Cancún y cruza longitudinalmente a la entidad. Este sistema carretero le permite al estado

conectividad nacional con los estados de Campeche y Quintana Roo y hacia fuera del país con el Caribe y EUA de manera inmediata. Otras carreteras de menor jerarquía comunican el norte y sur del estado, y hacia la costa solo destacan algunos accesos a puntos específicos, no existiendo un eje carretero que recorra toda la costa yucateca. La Región II Noroeste está limitada en conectividad y accesibilidad carretera. En 2006 la región contaba con un total de 1,862 kilómetros de longitud de la red carretera y caminos rurales. Del total, 262 kilómetros corresponden a carreteras federales y 345 kilómetros de carreteras estatales. La mayor parte 1 mil 256 kilómetros corresponden a caminos rurales.

VI.6).- Incremento de la productividad y competitividad

Vocación económica regional

El tamaño de la población económicamente activa de la región, representa el 60.9% del total estatal, y la económicamente inactiva el 55.9%. Mérida es el municipio con mayor número de habitantes en edad de trabajar, junto con los municipios de **Progreso**, Umán y Kanasín. La sinergia entre las actividades económicas del corredor Mérida-**Progreso** requiere definir una política regional que por un lado controle las expectativas de urbanización sobre el citado corredor, y por otro, potencie el papel de **Puerto Progreso** en la economía regional.

Sector primario

El Estado de Yucatán se ha especializado en la actividad ganadera, enfocada principalmente a producir carne de cerdo, pollo y ganado bovino. La ganadería en 1993 representaba 82.4% del valor de la producción agropecuaria y la agricultura sólo 17.5%; de la primera, 32.04% lo proporcionaba la porcicultura, 31.3% la avicultura y 19.1% la ganadería bovina. Esta última ocupa, sin embargo, 59.3% de la superficie cultivada, y posteriormente dedicada a pastizales. La actividad agrícola ha dejado de ser una de las principales en la región debido a que ha asumido un rol urbano predominante que enfoca la ocupación de la PEA hacia actividades terciarias, sin embargo, aún persiste la actividad agrícola en: Ucú, Baca, Mocochá, Conkal, Tahmek, Timucuy, Tekom, Tixmehuac y Abalá. Algunos cultivos que se cosechan en la región son: coco, frutales, aguacate, henequén, hortalizas, calabacita, tomate rojo, sandia y chile habanero. De la producción agrícola destaca el crecimiento de la horticultura, que en 1992 representa 4% del valor de la producción agropecuaria, superior ya al de la fruticultura (3.8%). Ella reportó mayor tecnificación (invernaderos), pero fue una producción limitada a pocos municipios.

Sector secundario

La industria de Yucatán es principalmente agroindustrial, ha pasado por varias transformaciones en los últimos 25 años, y actualmente presenta un crecimiento significativo del empleo, que pasó de 32 mil ocupados en 1988 a 55 mil en 1993, superior al del empleo en el comercio (principal fuente de ocupación en el estado). Sin embargo, la participación en los ingresos generados por las empresas industriales disminuyó; de representar un 60% del valor de los ingresos del comercio bajó a 44.76% en el periodo anterior, su participación en el PIB empezó a recuperarse muy lentamente hasta después de 1993 y en 1996 apenas representa 14.1%. La Región II al albergar a la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM) y también concentra gran parte de la industria maquiladora, y es la que ocupa el mayor número de PEA en el sector secundario. Del la

PEA que se ocupa en el sector secundario, el 67.5% se emplea en la industria manufacturera.

El Programa Regional de la Zona Metropolitana, se menciona que en el municipio de Progreso se cuenta con 5 bancos de materiales (éstos son extensiones relativamente amplias para la explotación de materiales terrestres por extracción, estas prácticas industriales de extracción de materiales se toman como un elemento separado a las industrias regulares por el impacto que tienen sobre su entorno) 2 de gran tamaño y 3 con menor área, en su territorio también hay 5 granjas porcícolas, 3 de ellas superando las 1000 unidades, 2 granjas avícolas, industrias de distintos tipos y 2 parque industriales, alojándose 1 en el puerto de abrigo de Yucalpetén dedicado al comercio al por mayor de Pescados y Mariscos y 1 en la carretera Mérida-Progreso con giros dedicados a la metalurgia y extracción de canteras. Pasando al municipio de **Tixpéhual** se hallan 7 bancos de materiales, 2 de tamaño considerable y el resto pequeños, 5 granjas porcícolas, pero solo 1 superando el millar de unidades y 2 granjas avícolas.

En **Ucú** se halla la menor concentración de industria y agroindustria, este municipio cuenta con 2 bancos de materiales de mediano tamaño, 2 granjas porcícolas, 7 granjas avícolas y 1 calera (áreas para el tratamiento de los materiales extraídos por canteras). Para el municipio de **Conkal** encontramos que cuenta con 5 bancos de materiales 1 de gran tamaño ubicado al norte de la cabecera del municipio, 36 granjas porcícolas, 7 de ellas superando las 1000 unidades, dentro de la Zona Metropolitana, este municipio concentra la mayor cantidad de granjas porcícolas así como las de mayor tamaño, en este territorio se encuentran 13 granjas avícolas e industria de diversos tipos.

El municipio de **Kanasín** alberga 18 bancos de materiales, 3 ocupan un gran área, 4 son medianos y el resto son pequeños, se hallan 6 granjas porcícolas, 4 de los cuales la piara supera los 1000 cerdos y 13 avícolas, asimismo cuenta en el límite entre su territorio y la de Mérida (anillo periférico) una zona importante de industria.

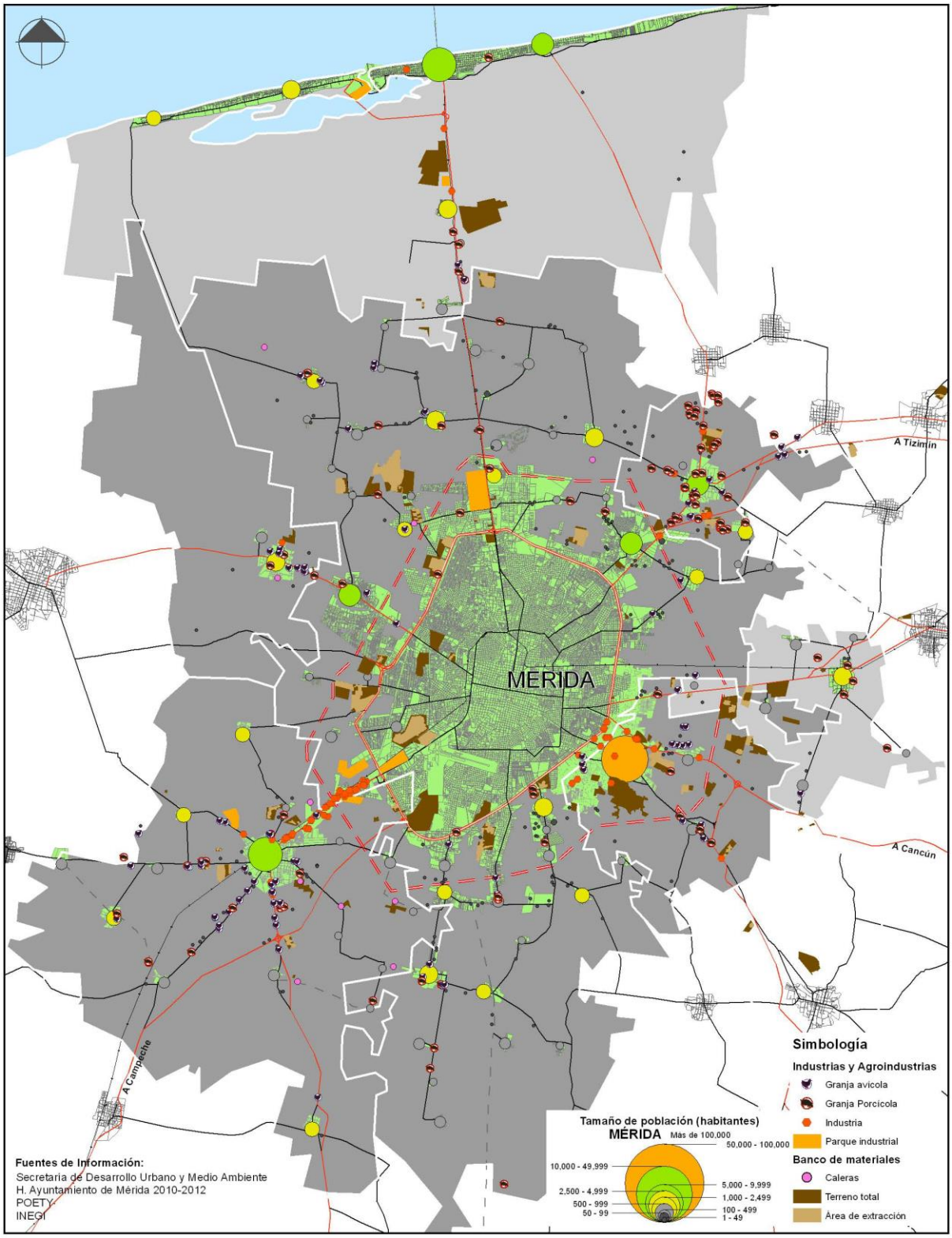
Umán cuenta con 16 bancos de materiales, 15 granjas porcícolas, 36 avícolas, un corredor muy importante de industrias (llegando al medio centenar) en la carretera Umán-Mérida, así como 3 parque industriales, 1 de ellos ubicado al noroeste de la localidad de Umán, dedicado a la industria mueblera, contando con 6 importantes empresas y otros 2 en el traslape del territorio del municipio con Mérida, siendo el giro principal de estás últimas, el mueblero y de construcción, alberga también 7 caleras.

Como último municipio se encuentra **Mérida,** en ella existen aproximadamente 45 bancos de materiales, 8 se encuentran dentro de su anillo periférico, 5 de son de gran magnitud y 3 de tamaño mediano, los 37 restantes se ubican fuera del anillo periférico, en el territorio de Mérida existen 26 granjas porcícolas y 22 avícolas, de nuevo el municipio de Mérida concentra la mayor parte de la industria, no sólo de la Zona Metropolitana sino de todo el Estado, cuenta con 3 sitios de caleras y 2 parques industriales, 1 ubicado en la colonia de Ciudad Industrial con industrias de diversos giros y otra en el norte de la ciudad conocido como el “Parque de Industrias no Contaminantes”.

En resumen, en la Zona Metropolitana, en el rubro industrial, el municipio de Mérida es indiscutiblemente el primer lugar, seguido por los municipios de Umán y Kanasín, en lo que se refiere a la sección de agroindustrias, el municipio de Conkal encabeza la lista, con más granjas en su territorio y las de mayor tamaño, después el municipio de Mérida. Por último, con los datos que se tienen, se observa que el municipio de Mérida es el que

cuenta con más área dedicado al rubro de bancos de materiales, seguido por el municipio de Kanasín.

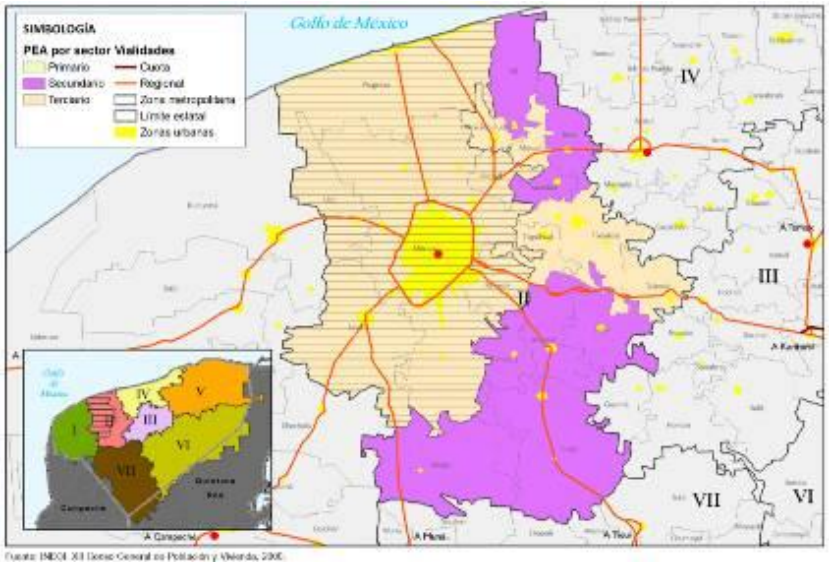
Figura VI.36).- Industria, agroindustria y extracción de materiales pétreos en la Zona Metroplitana (2014).



Sector servicios

El sector servicios es el más dinámico en los municipios con mayor influencia metropolitana, en Mérida el 70.6% de su PEA se ocupa en actividades terciarias, siendo el comercio la principal actividad económica del municipio. Kanasín y **Progreso** concentrar al 60% de su PEA en el sector terciario, teniendo igualmente al comercio como actividad clave. Los municipios que cuentan con importante actividad turística son: Mérida, Kanasín, **Progreso** y Umán. La terciarización de las actividades económicas de la región es un fenómeno evidente e inevitable al ir creciendo día con día las relaciones funcionales de los municipios periféricos de la ZMM.

Figura VI.37).- Población Económicamente Activa por sector de actividad, 2000



Productividad

La renta per cápita o PIB (producto interno bruto) per cápita del Estado de Yucatán por regiones, se obtienen a partir del PIB municipal. En este caso el PIB percápita es la relación que hay entre el PIB del municipio y su cantidad de habitantes. Para conseguirlo, hay que dividir el PIB del municipio entre la población de éste. Es un indicador comúnmente usado para estimar la riqueza económica de un territorio; la renta per cápita está positivamente correlacionada con la calidad de vida de los habitantes de un lugar. En la Región II los municipios con mayor ingreso percápita anual son Mérida y **Progreso** con 16,234 y 11,185 dólares PPC respectivamente. Por su parte el municipio de Espita cuenta con el menor PIB percápita (4,942 dólares PPC).

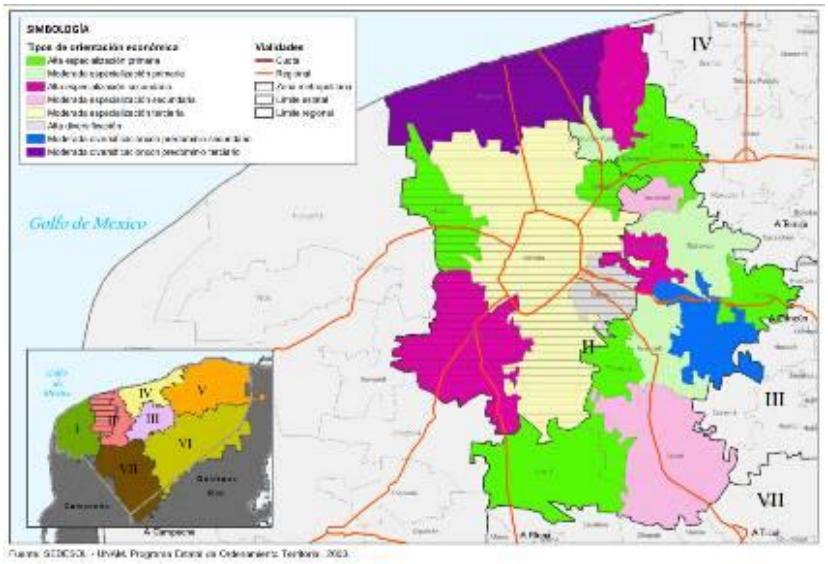
Especialización y diversificación económica

Conocer el índice de especialización permite conocer la importancia de las actividades económicas en una región. Es un cociente que permite identificar proporciones con el fin de medir una estructura regional en función de un patrón de comparación, que en este caso será el estatal.

Desde hace dos décadas la Zona Metropolitana de Mérida ha sido sometida a un acelerado proceso de expansión urbana y de especialización económica, que ha provocado impactos desiguales en el resto de la entidad. La especialización de los

municipios de la región permite observar la gran diversidad que existe al interior, aún conserva municipios especializados en actividades primarias, sin embargo, las secundarias y terciarias paulatinamente se han expandido hasta prácticamente cubrir al 80% de la región.

Figura VI.38).- Índice de especialización económica regional, 2000.



VI.7).- Fomento Económico y Empleo

Empleo e ingreso

En lo que respecta al nivel de ingreso, predomina la población que percibe hasta dos salarios mínimos, más del 50% de la población de los municipios que integran la región II. se encuentran en este rubro, dicha población no puede tener acceso a créditos de vivienda debido a su bajo poder adquisitivo. Al sumar la población que gana hasta dos salarios mínimos y la que no percibe ingresos se tiene que el 71% de la población de la región se ubica en los rangos más bajos de ingreso. Los niveles de ingreso de la población que radica en Mérida no están exentos del patrón que muestra el estado, ya que el 51% de su PEA percibe de 1 a 3 salarios mínimos, así mismo este municipio es el que tiene el porcentaje más alto de población que no percibe ingresos por su trabajo.

Diversificación y Fomento del Sector Pesquero

La infraestructura relacionada a este sector cuenta con mas de 235 centros de recepción, 49 congeladoras y 14 fábricas de hielo. La mayor parte de esta infraestructura y de la flota se concentra en el puerto de Yucalpetén en Progreso, donde se ubica el 40% de los centros de recepción, el 71% de las congeladoras y el 36% de las fábricas de hielo. Le sigue Celestún y Dzilam; la infraestructura industrial en el resto de los puertos es mínima. Posé mas de 600 embarcaciones de la flota mayor (entre 12 y 22 m de eslora), que ejercen su esfuerzo de pesca hasta los 200 metros de profundidad, y tienen autonomía de entre 15-18 días); más de 4,500 embarcaciones de la flota menor (entre 7 y 10 m), con poca transferencia hacia áreas de pesca lejanas y viajes máximos de 4 días, predominando los diarios. Además, cuenta con mas de 8,500 embarcaciones auxiliares o alijos que son embarcaciones pequeñas (de tres metros de eslora), y sin motor, que permiten extender el área de pesca de la flota mayor y menor).

La población pesquera registrada en el Estado de Yucatán es mayor a los 16,000 pescadores. Progreso registro el 35% de esta población, Dzilam el 15%, Celestún el 14% y Telchac y San Felipe el 9% cada uno. La explotación de los recursos pesqueros pulpo, mero y rubia aportaron más del 90% del volumen explotado. La langosta es otro recurso importante por el valor económico que representa, a pesar de su escaso volumen.

Acuacultura

Esta es una actividad que no ha podido repuntar, en la zona costera de Yucatán se ubican 17 granjas acuícolas registradas ante la SAGARPA, de las cuales cuatro cultivan camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*), cuatro más cultivan camarón nativo, tres cultivan artemia, y las seis restantes cultivan tilapia nilótica. Las dos del sector privado pertenecen a una misma empresa, Industrias Pecis, que acaba de cerrar la planta de Sisal. En Sisal permanece una planta del sector social, y en Celestún se ubican 10, la mayor parte sin operar; una en Progreso, y en Dzilam de Bravo, las cuatro restantes. De las granjas camaroneras, solamente las que cultivan camarón blanco operaban de manera regular con buenos resultados en sistemas intensivos y semi intensivos; sin embargo, la más grande, en Sisal, cerró por invasión de una enfermedad y no piensa volver a operar. Estas granjas mejoraron las características de permeabilidad del terreno adicionando mezclas de arcillas al sustrato arenoso o cárstico donde se construyeron, mientras que las que trabajan con camarón nativo funcionan parcialmente y de manera esporádica debido principalmente a problemas en la permeabilidad del terreno el cual no tuvo ningún tipo de acondicionamiento; adicionalmente, estas granjas están sujetas a presiones normativas por encontrarse ubicadas dentro de la reserva de la biosfera. Por otra parte, las granjas de artemia salina que actualmente existen en el territorio costero, las cuales tienen una productividad muy baja. Las unidades de producción de tilapia poseen tanques de concreto o película plástica, por lo que su operación no está influida por el tipo de sustrato donde se ubican, sin embargo, las dos granjas de Celestún están en terrenos que se inundan en época de lluvias, lo que ha dificultado su puesta en marcha. Adicionalmente, a estas granjas por ubicarse en las cercanías de la reserva de la biosfera se les han impuesto fuertes regulaciones normativas que también afectan su viabilidad operativa. Todas las granjas de tilapia presentan además problemas económicos que han limitado su operación.

Turismo

El turismo en la entidad es fundamentalmente de tipo cultural, donde los sitios preferentes son las áreas arqueológicas como Chichén Itzá, Uxmal y Dzibilchaltun, además de la Ciudad de Mérida y su Centro Histórico. En estos 2 últimos sitios es donde se desarrolla la mayor derrama económica en la región II, junto con los atractivos de la zona costera en sus modalidades de sol y playa, el cual hasta hace relativamente poco se limitaba a dos breves temporadas: la Semana Santa y los meses de verano (julio y agosto) y se dividía en tres corrientes: a) visitantes por el día (pasadía), principalmente los fines de semana de esas dos temporadas, cuya derrama se centraba en el transporte y consumo de alimentos y bebidas; b) veraneantes que se alojan en hoteles y consumen en restaurantes, cuya estadía es de una semana o menos y c) turismo de segunda residencia, que corresponde a los dueños de casas veraniegas, así como a los inquilinos que las rentan, ya que un porcentaje de los propietarios las alquila parcialmente para compensar los gastos de su mantenimiento. Este turismo era de carácter local, centrado en la población urbana de las regiones inmediatas a cada puerto. Recientemente se inicia

una corriente de residentes y veraneantes procedentes de países del norte, Canadá principalmente, que rentan las casas para la temporada de invierno, o empiezan a comprar casas como segunda residencia; este proceso a su vez está incidiendo en que las corrientes tradicionales amplíen el periodo de estancias en la playa, lo que incide en la apertura permanente de restaurantes y otros servicios y en la ampliación del área de origen del turista. Los principales sitios son Sisal, Progreso y Telchac Puerto, en donde se encuentra más del 80% de las viviendas de segunda residencia, las cuales suman más de 5000. Y es esta zona donde se recibe la mayor cantidad de turistas de pasadía, únicamente en el municipio de Progreso se han contabilizado hasta 300,000 visitantes en un solo día, por lo que los torneos de pesca, música y diversión también se concentran en esta zona. La situación restaurantera y hotelera no es distinta, el 80% de los 194 restaurantes registrados en la costa, se asientan en esta zona. Así como el 60% de los 60 hoteles, los cuales tienen un total de 1070 cuartos disponibles, de los cuales más del 70% esta en este corredor. Cerca de Telchac se localiza en corredor nuevo Yucatán y que en su momento se anunció como el detonante de los hoteles de gran turismo del estado, pero que hasta el momento solo esta funcionando uno de los 3 hoteles construidos, el Reef Yucatán, con categoría de 5 estrellas.

Este tipo de turismo también demanda durante su estancia otros servicios, como los médicos, ya sea para operaciones, prótesis, oculares, etc. Así como trasporte para diferentes lugares del estado o de la península. Actualmente existen varias agencias de viajes que ofrecen sus servicios para estos turistas.

El turismo de Cruceros es relativamente reciente y en proceso de consolidación, con una derrama en la costa, aún muy restringida, pero que está repercutiendo en la venta ambulante de artesanías “externas y poco artesanales”. Se concentra en Progreso. Este tipo de turismo inicia en 1998 con la ampliación del puerto de altura y la construcción del muelle para cruceros que tiene la capacidad de recibir embarcaciones de hasta 32 pies de calado. Del 98 al 2001 tiene una captación muy baja, alrededor de 2000 turistas por año, es a partir del año 2003 cuando se empieza a dar el turismo masivo, en este año se captan más de 128,000 turistas y en el 2004 llegan más de 250,000 visitantes, a causa de los huracanes en el 2005 se recibieron alrededor de 190,000 turistas. Otra cuestión para considerarse es el porcentaje de pasajeros que desembarcan, para el 2001 únicamente desembarcaron alrededor del 55% de los pasajeros que llegaron, para el 2003 fue alrededor del 87% y para el 2005 desembarcó el 93% de los pasajeros. Cada crucero permanece entre 8 y 12 horas en el estado para luego continuar su viaje. De los pasajeros que desembarcan entre un 60% y 65% se quedan en el puerto de Progreso y sus alrededores y el resto prefiere otros destinos como son la ciudad de Mérida, las zonas arqueológicas de Chichén Itzá, Uxmal o alguna ciudad colonial como Izamal o Valladolid. La derrama económica per cápita fluctúa entre $51 y $52 dlls.

Otro tipo de turismo es el tipo alternativo o ecológico, su desarrollo relativamente reciente se vincula a las políticas estatales, federales e internacionales relacionadas con la importancia de los humedales costeros en el cual el Estado se inserta, y la necesidad de conservarlos. Hoy en día a lo largo de la costa podemos encontrar aproximadamente 529 socios en 45 grupos dedicados a la actividad ecoturística con una oferta amplia, entre las que podemos mencionar, paseos en lancha para observación de flora y fauna, observación de aves en miradores construidos para tal fin, pesca de sábalo en cenotes, pesca deportiva en el mar, buceo y snorkel, renta de kayaks y bicicletas acuáticas, visitas a petenes, renta de bicicletas, caminatas por senderos, baños de arena, observación de manantiales en el mar, paseos nocturnos para la observación de cocodrilos, visitas a

vestigios arqueológicos, acampado, etc. Estas actividades de bajo impacto, pueden contribuir de manera fundamental a la conservación de toda la zona costera del estado.

Muy ligada a la actividad ecoturística tenemos a los grupos que elaboran artesanías a base de concha, caracol y materiales de la región. Hoy en día, sin considerar a Progreso, podemos encontrar a lo largo de la costa cerca de 30 grupos que se dedican a esta actividad, los cuales emplean a más de 120 personas. El hecho de excluir a Progreso es que aquí llega una gran cantidad de vendedores de artesanías que vienen de muchas partes del país e incluso "no artesanías" de China y Taiwán principalmente. En esta ciudad entre tiendas, puestos semifijos y vendedores ambulantes se han identificado 191 grupos. Otra actividad importante ligada al turismo son las familias que se dedican a la elaboración de dulces tradicionales a base de coco, estos dulces los podemos encontrar a lo largo de toda la costa, pero existen comunidades que a lo largo de los años han ganado fama como son Chelem, San Crisanto y Telchac.

Otra actividad, sobre la cual se discute su carácter de alternativa, es la actividad cinegética, particularmente la cacería de patos. A las comunidades únicamente les deja la derrama por contratación de guías, pero por otro lado, les deja sus ciénagas cada vez más contaminadas por el plomo que utilizan. En las zonas donde se da esta actividad de manera más intensiva se ha detectado plumbismo en aves como el flamenco, son muchas las comunidades que están en contra de esta actividad, pero hay un intereses por de continuar expandiendo esta actividad, pues hace relativamente poco tiempo que se decreto una UMA (Unidad de manejo y conservación de la vida silvestre) cinegética, denominada la extensión del Palmar y que va de donde finaliza la Reserva del Palmar, en Sisal a Mina de Oro, en Dzilam de Bravo, dejando algunas zonas fuera como el mirador de Uaymitún, una zona en Telchac y San Crisanto y esto se debió a la presión que estas comunidades ejercieron en contra de este decreto.

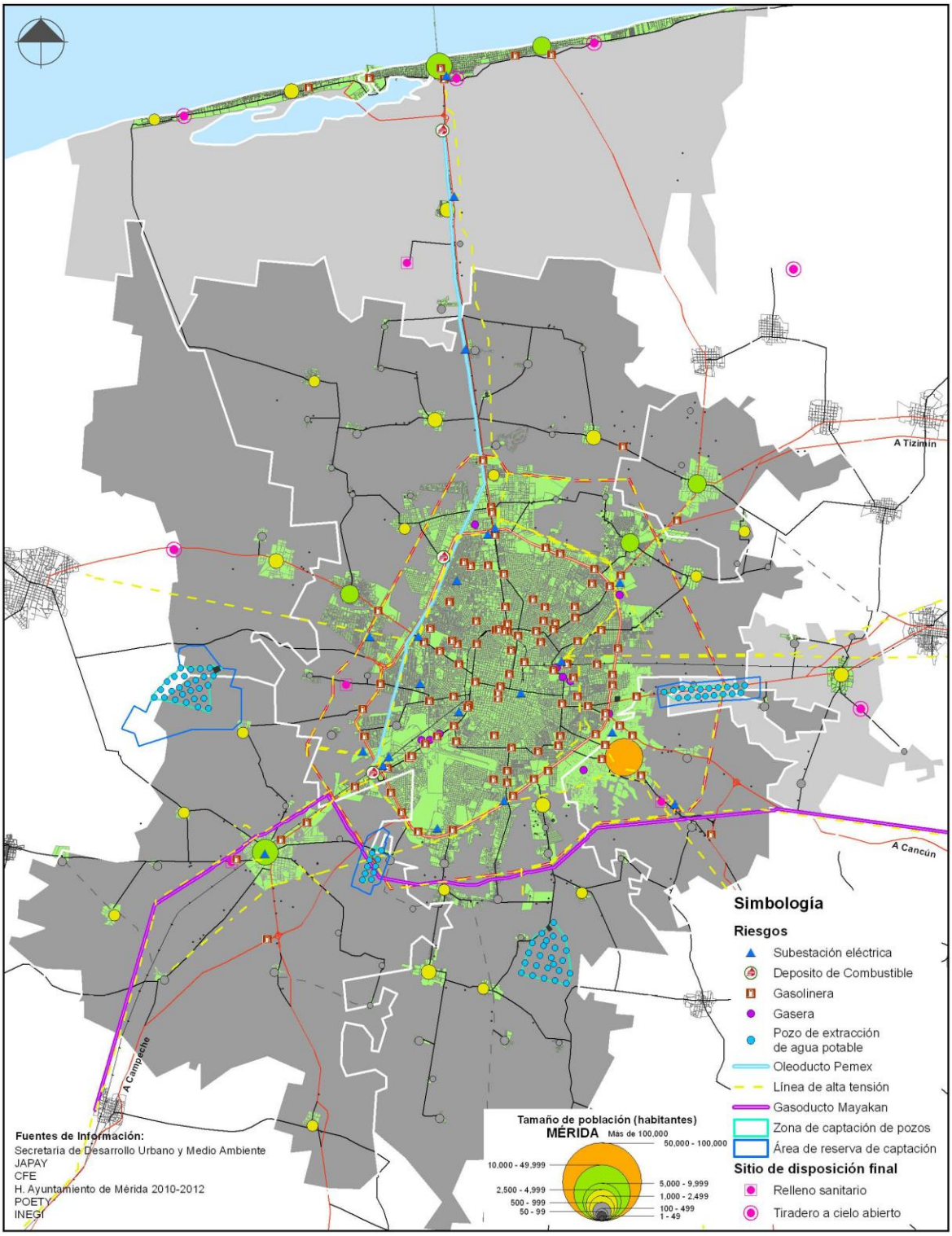
VI.8).- Riesgos y limitantes para el desarrollo en la Zona Metropolitana de Mérida.

En el documento de la Zona Metropolitana de Mérida (2010), de la SEDUMA, se hace evidente que existen actividades antropogénicas que, por su grado de importancia, el peligro que representan para las personas y su impacto sobre el medio ambiente, pueden clasificarse como de alto riesgo, por ello se hace de mucha relevancia su identificación, manejo y control adecuado; en el presente trabajo se recaba la infraestructura y equipamiento considerados de este género.

En la figura siguiente se destacan las 21 diferentes subestaciones eléctricas que existen, de éstas sólo 5 se hallan fuera del municipio de Mérida, 2 en Progreso, 2 en Kanasín y 1 en Umán, se plasma de igual forma la infraestructura de trasmisión de éstos por cables de alta tensión.

En la región existen 3 depósitos de combustibles de gran magnitud 2 de ellos manejados por PEMEX, ubicados el primero a 2.8km de la ciudad de Progreso sobre la carretera Mérida - Progreso, contando con 9 almacenes de distintas capacidades para combustibles y derivados, el segundo se ubica en la carretera Mérida-Umán a 300m después del periférico en la zona suroeste, esta instalación cuenta con 11 contenedores para combustible y existe 1 administrado por una empresa privada (Hidrosur) ubicado en la carretera Periférico – San Antonio Ool al noroeste del periférico de Mérida, la instalación cuenta con 2 depósitos de combustible.

Figura VI.39).- Riesgos por actividades antropogénica. Electricidad, combustibles, gaseras, sitios de disposición, pozos de extracción de agua potable, oleoductos y gasoductos.



El crecimiento de las gasolineras en la Zona Conurbada es impresionante, en el mapa se tiene un aproximado de 115 ubicadas, 7 en el municipio de Umán, 8 en Kanasín, 2 en Conkal, 6 en Progreso y los restantes 92 en Mérida, sin embargo, es de reconocer que

hoy este número ya haya aumentado. También se representan 10 centros de almacenamiento y distribución de Gas LP tanto para automóviles como para uso doméstico, estos están ubicados 2 en Kanasín y los restantes 8 en Mérida. La distribución de agua potable a la Zona Metropolitana es un tema vital, por ello la Junta de Agua Potable y Alcantarillado deYucatán (JAPAY) tiene 4 plantas de extracción de agua en los alrededores, la planta Mérida I se ubica al sur del municipio de Mérida, cercano a la localidad de San Ignacio Tesip, la planta cuenta con 24 pozos; la segunda planta llamada Mérida II se encuentra en el municipio de Umán al noreste y al suroeste de la localidad de Ticimul, este cuenta con 10 pozos; la planta Mérida III se halla a un costado de la carretera Mérida – Tixpéhual al sur de la localidad e Techoh, esta instalación cuenta con 18 pozos y por último la de más reciente creación la planta Mérida IV que tiene la extensión más grande y la que cuenta con la mayor batería de pozos, con 26 y se ubica al oeste del municipio de Mérida, al noroeste de la localidad de Oxcum, en total se tienen 78 pozos para suplir la demanda de agua en la zona metropolitana. En cuanto la disposición de residuos, Mérida, Kanasín, Progrogreso y Umán cuentan con rellenos sanitarios, los demás municipios tienen tiraderos a cielo abierto. En la región metropolitana existe 1 oleoducto y 1 gasoducto. El oleoducto es administrado por PEMEX que corre del puerto de Progreso hasta sus depósitos en el municipio de Umán, a un costado de la carretera Mérida-Umán, después del periférico, el oleoducto parte del puerto de Progreso y se dirige hacia Mérida a un costado de la carretera Mérida – Progreso, entrando por el norte de la Ciudad bordeándolo al poniente por el interior del periférico hasta llegar a sus almacenes en el municipio de Umán. El gasoducto es manejado por la empresa privada Mayakan que va de Ciudad Pemex en Campeche hasta Valladolid en Yucatán, ésta pasa por el territorio de los municipios de Umán, Kanasín y Mérida, entrando por el suroeste de Umán, saliendo del municipio por el noreste, a partir de allí sigue el anillo metropolitano pasando por el sur del municipio de Mérida y Kanasín hasta encontrar la carretera Mérida – Cancún, siguiéndola en paralelo. El paso de más riesgo de este gasoducto se ubica en la localidad de Umán al atravesar una zona habitada por el oeste de la localidad.

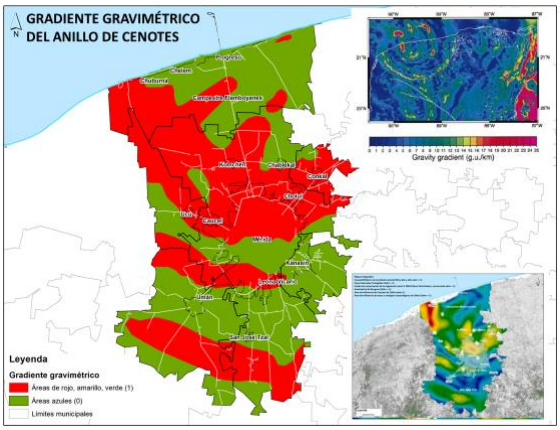
En el Programa Regional de la Zona Metropolitana se realizo un ejercicio para definir las áreas no urbanizables o que requieren de consideraciones especiales dadas sus características particulares. Asi, se realizó una sobreposición de mapas con diferentes temas que se muestran en la tabla siguiente:

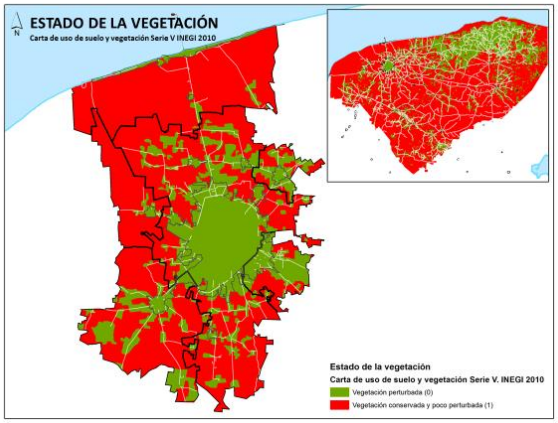
Tabla VI.7).- Lista de variables integradas considerando las regulaciones en materia ambiental.

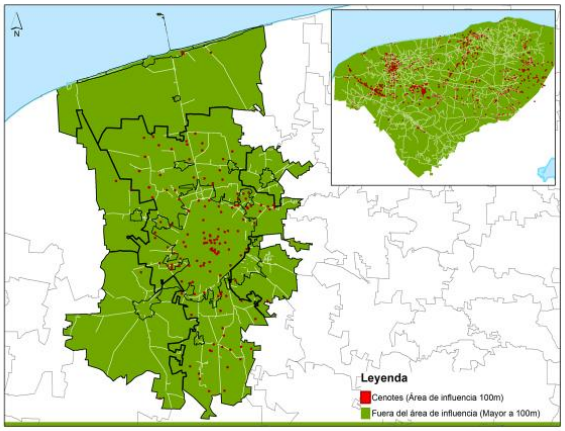
COBERTURAS	FUENTE	CLASE/TIPO	VALOR
Susceptibilidad a la inundación pluvial	Atlas de Peligros. SGM. Protección Civil.	Muy alta y alta	1
		Media, Baja y Muy Baja	0
Áreas Naturales Protegidas	Decretos vigentes de las Reservas Estatales y Federales	Al interior de una ANP	1
		Áreas no decretadas	0
Estado de conservación de la vegetación (Versión POETY 2007) / Carta de Uso de Suelo y Vegetación INEGI 2010 (Versión INEGI 2010)	POETY 2007 / INEGI	Vegetación conservada y poco perturbada	1
		Vegetación perturbada	0
Gradiente de gravimetría	Estudio gravimétrico del sector sur del cráter de Chicxulub, Yucatán, México. Análisis de Posibles trayectorias de impacto y estructuras pre-existentes. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México.	Áreas Rojo, amarillo, verde	1
		Áreas Azules	0
Área de Influencia de Cenotes de 100m (valor 1)	Seduma, censo de cenotes	Área de influencia del cenote (100 metros)	1
		Fuera del área de influencia	0
Zonas y vestigios arqueológicos	The Electronic Atlas of Ancient Maya Sites	Área de influencia de las zonas y vestigios arqueológicos	1
		Fuera del área de influencia	0

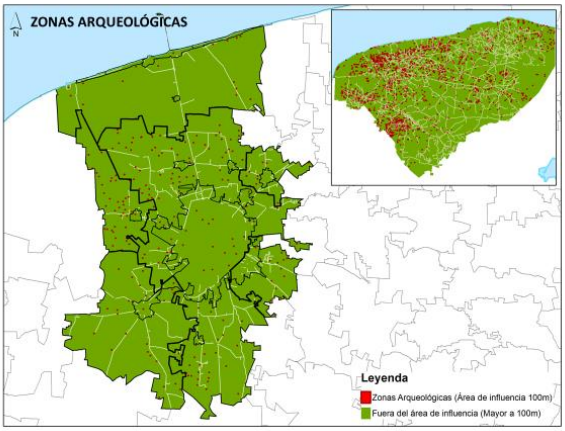
Los mapas que se integran tienen que ver con la suceptibilidad a la inundación pluvial, las áreas naturales protegiadas, el estado de conservación de la selva baja caducifolia, gradiente gravimétrico de las anomalías de Bouguier, el área de influencia de los cenotes de hasta 100 m de radio y los vestigios y zonas arqueológicas. Los resultados obtenidos muestran áreas de restricción al potencial desarrollo debiendo considerar acciones específicas para su puesta en marcha.

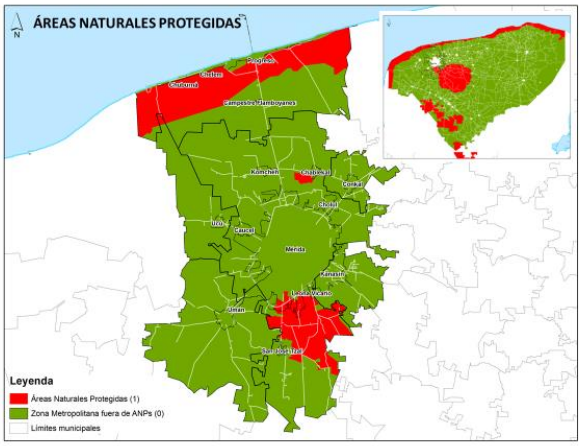
Figura VI.40).- Variables seleccionadas para la selección de áreas no urbanizables.

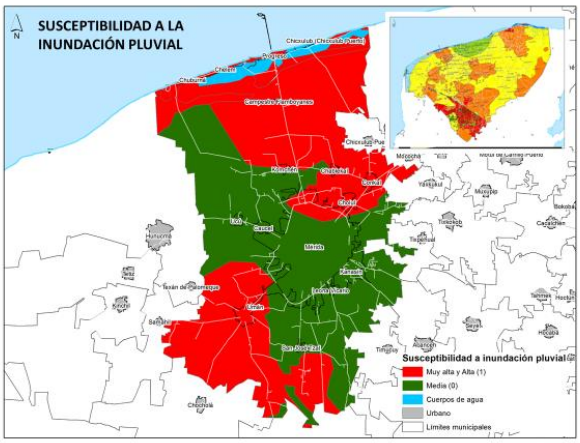






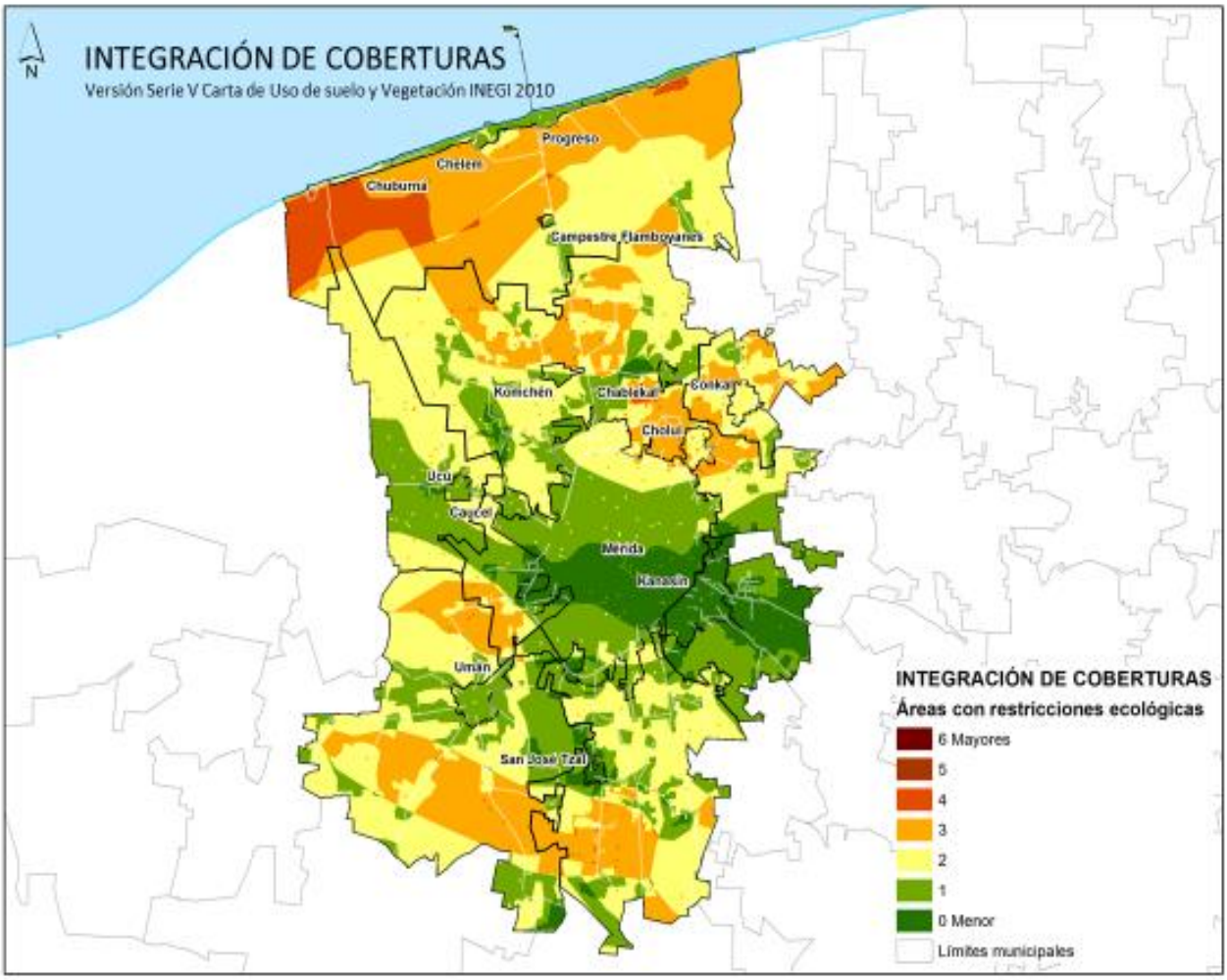


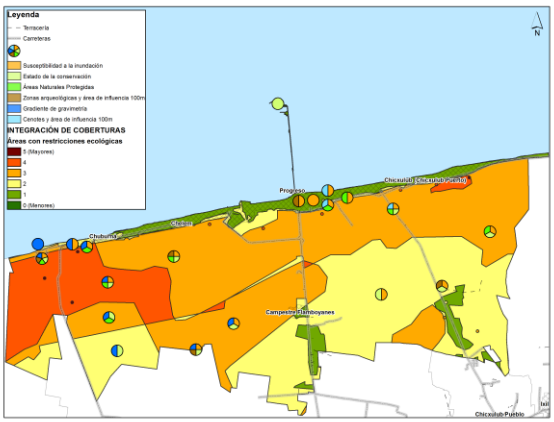


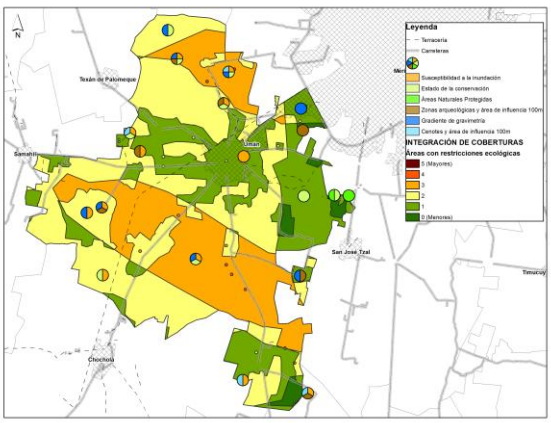


Los valores con menores criterios de restricción se muestran a continuación en colores verde y los de más alta restricción se presentan en colo rojo y marrón. Estas últimas áreas sería recomendable evitar su desarrollo o urbanización. La figura siguiente muestra el resultado del ejerecicio.

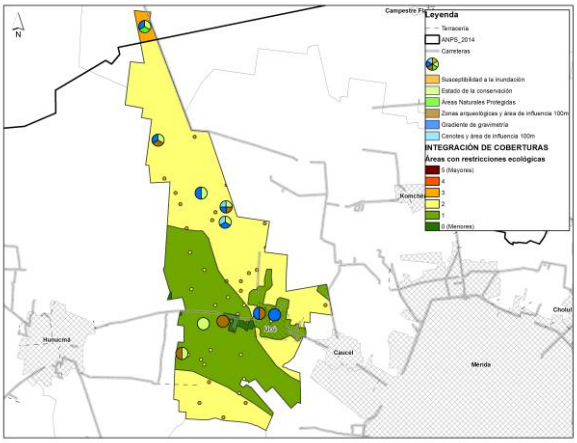
Figura VI.41).- Integración de coberturas a nivel de la Zona Metropolitana y por cada municipio que la integra. Identificación de suelo que no debiera urbanizarse

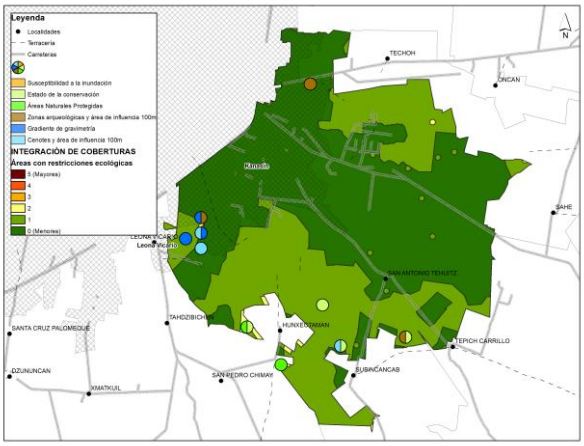




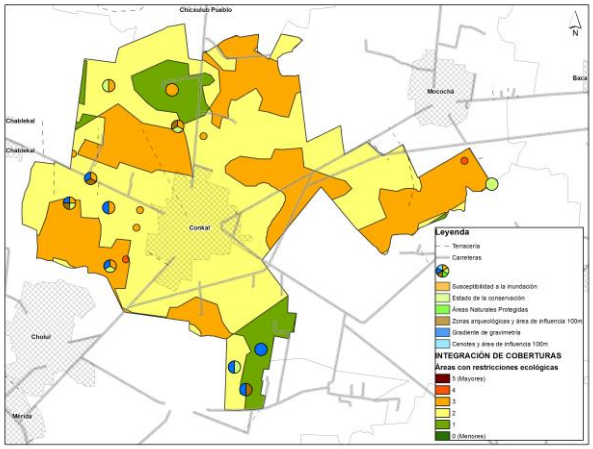


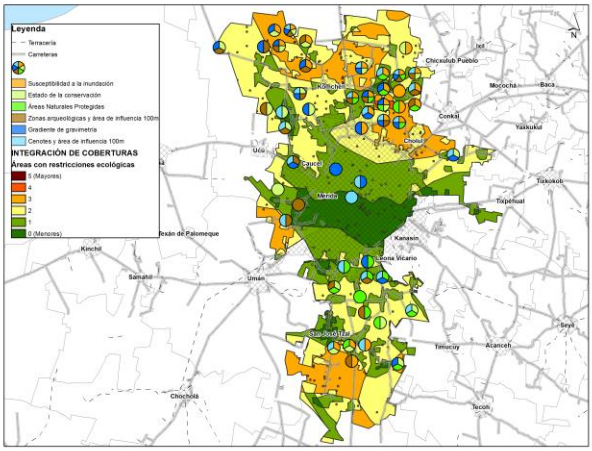
Progreso presenta valores de 5 en cenotes y 4 en áreas de humedales y Umán tiene 2 franjas con valores de 3, y presenta 3 áreas con valores de 1 al oriente y sur





Ucú tiene valores menores, entre 1 y 2, y al norte tiene una franja ubicada dentro de la Reserva Ciénagas y Manglares de la Costa Norte de Yucatán con valor de 3. Kanasín presenta áreas con valores de 1 y 0 principalmente y en menor superficie valores de 2 atributos.





Conkal presenta valores de 2 y 3 atributos. Presenta también 2 áreas con valores de 1 atributo. Mérdia tiene una gran diversidad de atributos.

VII).- PASIVOS HIDROLÓGICO-AMBIENTALES GENERADOS POR EL DESARROLLO EN LA ZONA GEOHIDROLÓGICA DEL ANILLO DE CENOTES.

En general la problemática de contaminación de las diversas zonas geohidrológicas del Estado de Yucatán (anillo de cenotes, planicie interior y cerros y valles), está asociada con causas de origen natural y antropogénico (Tabla VII.1) que constituye una problemática compleja y dinámica, donde intervienen diversos actores que demandan su aprovechamiento para la satisfacción tanto de necesidades básicas de las personas, como para el impulso de las actividades productivas y el desarrollo económico. Desafortunadamente, el uso excesivo del agua, la falta de saneamiento, los efectos de las obras y de los procesos productivos que se realizan, alteran el ciclo de agua, evitan su renovación natural y ponen en riesgo a todos los componentes del sistema hidrológico; con afectaciones a los recursos naturales, muchas veces irreversibles (CNA, 2008). Como ya se señalo, la constitución geológica del acuífero que consta de calizas fracturadas, con conductos y oquedades de disolución, muy poroso y permeable, determinan una alta vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y por donde los contaminantes penetran fácilmente y en forma casi inmediata al manto freático, sin permitir que se lleven a cabo procesos de atenuación como reacciones fisicoquímicas, antes de su ingreso al acuífero.

Tabla VII.1).- Factores que afectan la calidad del agua en el Estado de Yucatán.

Fuente de contaminación	Descripción del impacto
Desarrollo urbano	El acelerado crecimiento urbano de las grandes ciudades de la Región, que amenaza con invadir los campos de pozos de abasto de agua potable y su posible contaminación por la falta de saneamiento de las aguas residuales municipales. En el mejor de los casos, las viviendas solo cuentan con fosas sépticas. Así también se tienen las aguas del drenaje pluvial que se infiltran al acuífero. La mala disposición de los lodos de fosas sépticas derivados de su limpieza es también otra fuente de contaminación.
Actividades económicas	Dentro de las principales actividades contaminantes, se tienen las descargas de aguas residuales de la actividad industrial, porcícola, pecuaria y avícola, así como por las aguas residuales de la nixtamalización para la producción de masa y tortilla, donde se utilizan pipas para trasladar los residuos líquidos sin tratamiento a sitios donde se disponen sin tratamiento adecuado, con alta contaminación orgánica y alta alcalinidad.
Nutrientes o pesticidas agrícolas	Residuos de fertilizantes y pesticidas aplicados en el medio rural amenazan la salud humana.
Fugas de hidrocarburos y mal manejo de residuos de aceites	La falta de medidas apropiadas de seguridad y control en talleres mecánicos, industrias, gasolineras y empresas, propicia la ocurrencia de fugas o derrames deliberados con afectaciones al acuífero con efectos irreversibles.
Residuos sólidos	Falta de un manejo adecuado residuos sólidos, donde la disposición se realiza en tiraderos a cielo abierto y en algunos casos, muy próximos a fuentes de suministro de agua potable, utilizando para ello sahcaberas abandonadas y las márgenes de los principales caminos de acceso a las poblaciones.
Falta de protección de fuentes de abasto de Agua	Riesgo de brotes de cólera, debido a que se recurre a los pozos a cielo abierto para el abastecimiento de agua, que casi siempre se ubican en el centro del pueblo y carecen de protección.

VII.1).- Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación en el Estado de Yucatán.

Como se mencionó anteriormente, el Estado de Yucatán es una región conformada por rocas calcáreas y carece de corrientes superficiales debido a la carstificación extensa, la

cual da lugar a fracturas y fisuras y procesos de disolución, por donde se filtra rápidamente el agua. La baja profundidad de los niveles freáticos y la falta de suelo, hacen que los solutos se infiltren al agua subterránea, haciéndola vulnerable a la contaminación (Doerfliger et al., 1999).

Es por eso que la importancia del agua subterránea es incuestionable ya que este recurso hídrico proporciona más de la mitad del agua para el abastecimiento humano. Sin embargo, es frecuente no tomar en cuenta que para una administración ambientalmente segura, la mejor práctica es proteger este recurso de la contaminación, porque la descontaminación de un acuífero suele ser un proceso muy largo, costoso y a veces prácticamente irreversible o irrealizable.

La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea, depende de la sensibilidad de éstos a impactos humanos y naturales. Es función de factores hidrológicos que determinan la inaccesibilidad de la zona saturada a los contaminantes, la capacidad de atenuación de esta y los estratos por encima de ella. Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace variable el potencial de un acuífero para protegerse, razón por la que algunas áreas son más vulnerables que otras.

Por consiguiente, la vulnerabilidad se define como el riesgo de que las aguas subterráneas se contaminen con alguna sustancia en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991).

Se distinguen dos tipos de vulnerabilidad del agua subterránea:

Vulnerabilidad intrínseca, que es un término usado para definir la vulnerabilidad del agua subterránea frente a los contaminantes generados por actividades humanas. Toma en cuenta las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área, pero es independiente de la naturaleza de los contaminantes.

Vulnerabilidad específica, el cual es el término utilizado para definir la vulnerabilidad del agua subterránea frente a un contaminante particular o a un grupo de contaminantes. Toma en cuenta las propiedades de los contaminantes y su relación con los diversos componentes de la vulnerabilidad intrínseca (Morrell y Tuñón, 2001).

El grado de vulnerabilidad intrínseca se puede expresar mediante un índice y para determinarlo existen diversas metodologías como son: el Índice de vulnerabilidad de acuíferos (AVI), la metodología DRASTIC y la metodología GOD, así como la metodología EPIK. Pérez (2003), aplico la metodología DRASTIC, recopilando los valores para cada una de las variables relacionadas (profundidad al nivel estático, recarga, tipo de acuífero, tipo de suelo, zona vadosa y conductividad hidráulica) correspondientes a cada uno de los municipios del estado de Yucatán (Figura VII.1). Para el cálculo de la pendiente (%) se consideraron los variables “X” como la distancia de cada municipio hasta la costa (m), y “Y” como la altura sobre el nivel del mar (m).

Los resultados de la metodología DRASTIC para cada uno de los municipios del estado de Yucatán mostraron que los municipios de Kinchil y Tetiz son los más vulnerables con un índice de 217 y el menos vulnerable es el municipio de Santa Elena con un índice de 175 (Figura VII.2). Los valores se consideran altos en la escala de DRASTIC y corresponden a la vulnerabilidad alta, muy alta y extrema.

Para elaborar el mapa de riesgo se utiliza la información sobre uso de suelo, el cual se presenta en la Figura VII.3. Se consideró la carga contaminante aplicada a la superficie, la cual tiene un gran impacto en la contaminación del agua subterránea. Posteriormente para evaluar y reasignar pesos a los cinco usos de suelo con mayor potencial de contaminación utilizando el método de las Jerarquías Analíticas (Pérez, 2003), obteniendo al final el mapa de riesgo a la contaminación (Figura VII.4).

De esta manera, la vulnerabilidad intrínseca (natural) del estado de Yucatán aplicando el método DRASTIC, mostró valores moderados (3%), altos (58%) y extremos (39%). Donde se explica el 74% de la variación del índice DRASTIC, mediante el análisis de regresión múltiple por los factores: profundidad al agua subterránea, tipo de suelo, topografía e impacto en la zona vadosa (Pérez, 2003).

De esta manera, con el mapa de vulnerabilidad intrínseca y el mapa de uso de suelo, se obtuvo el mapa de riesgo para el estado de Yucatán, obteniendo cuatro de cinco categorías: bajo (17.2%), moderado (38.4%), alto (19.5%), y extremo (24.7%).

Figura VII.1).- Factores considerados para el cálculo de vulnerabilidad con el método DRASTIC

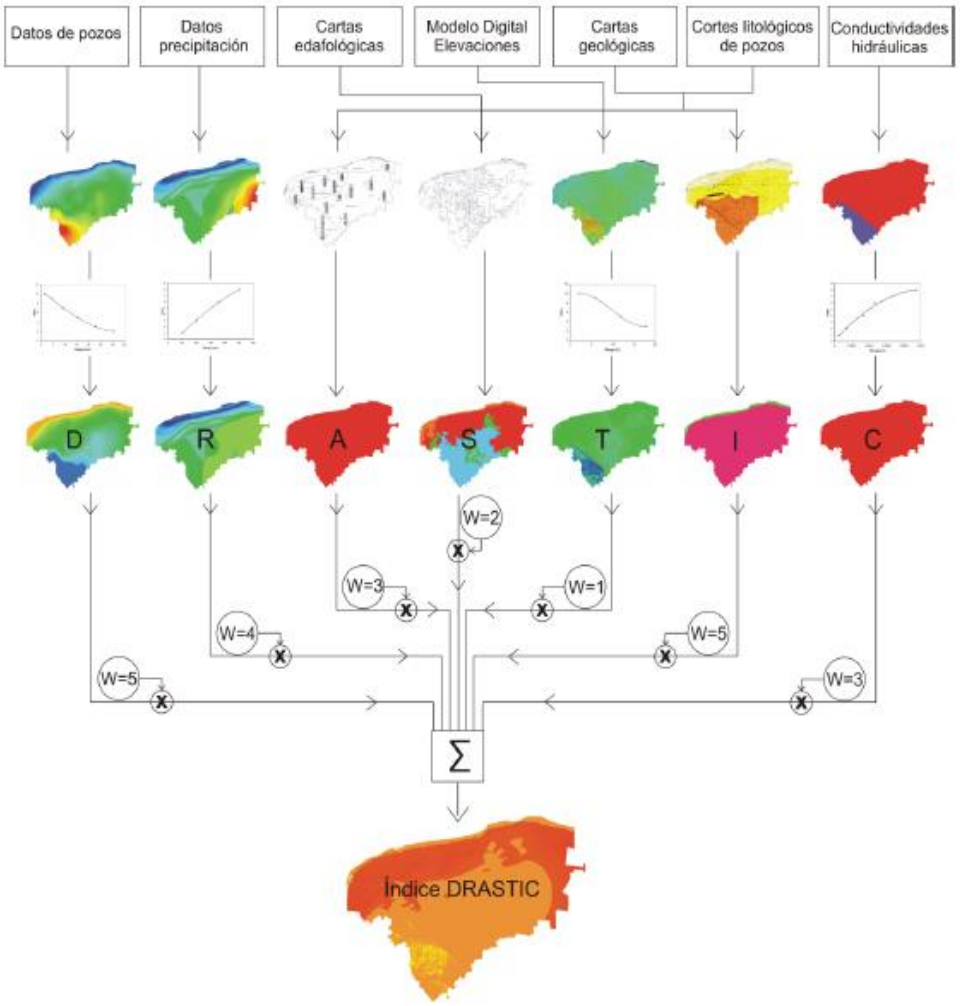
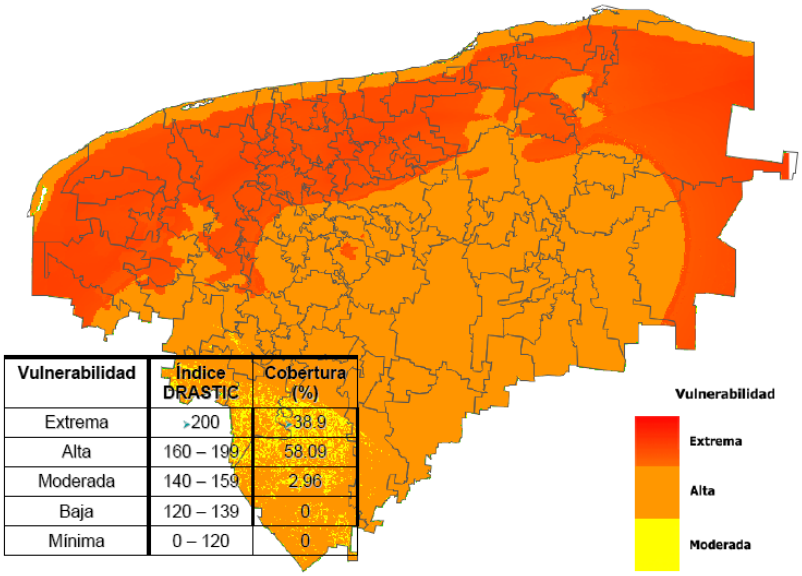


Figura VII.2).- Índice DRASTIC para los Municipios del Estado de Yucatán. Vulnerabilidad y cobertura espacial.



Vulnerabilidad	Índice DRASTIC	Cobertura (%)
Extrema	>200	38.9
Alta	160 – 199	58.09
Moderada	140 – 159	2.96
Baja	120 – 139	0
Mínima	0 – 120	0

Figura 3.- Mapa de usos de suelo en el Estado de Yucatán.

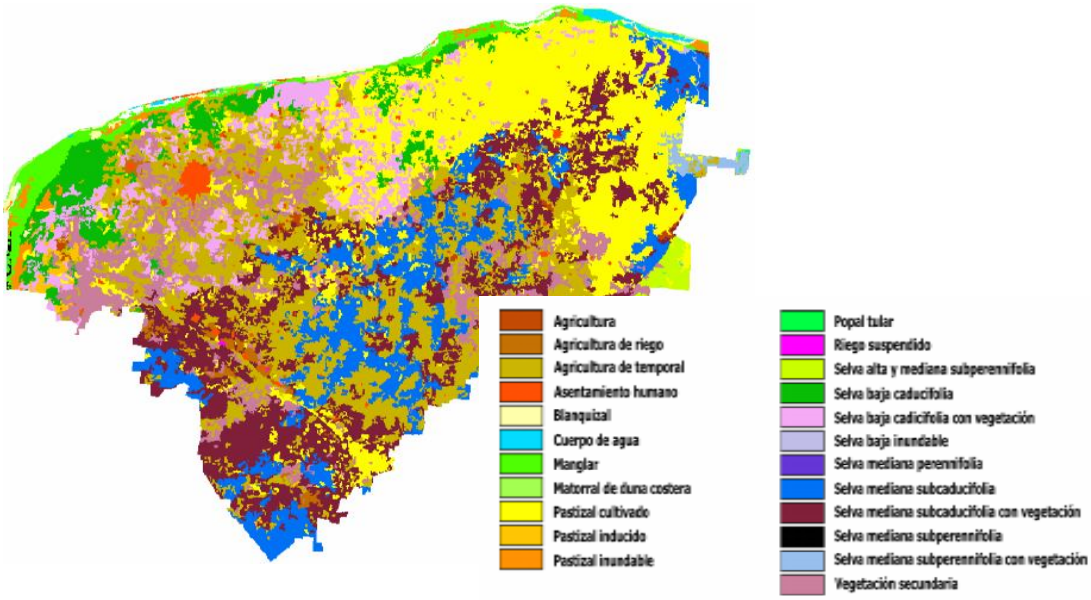
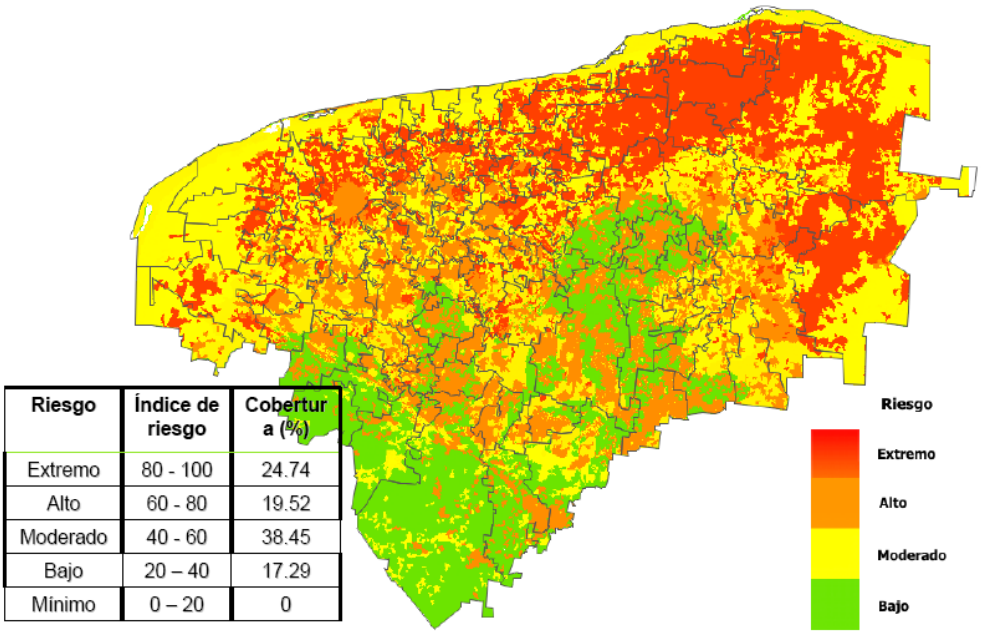


Figura VII.4).- Mapa de riesgo a la contaminación del agua subterránea



Riesgo	Índice de riesgo	Cobertura (%)
Extremo	80 - 100	24.74
Alto	60 - 80	19.52
Moderado	40 - 60	38.45
Bajo	20 – 40	17.29
Mínimo	0 – 20	0

VII.2).- Contaminación derivada del Desarrollo Urbano.

En el Estado de Yucatán, la mayor parte del agua residual está siendo dispuesta directamente al subsuelo a través de sumideros, sólo en la Ciudad de Mérida y algunas otras ciudades donde se impulsa el desarrollo de fraccionamientos se utilizan tanques sépticos, letrinas, biodigestores y en algunos nuevos fraccionamientos, particularmente en Mérida, existen redes de alcantarillado sanitario conectadas a plantas de tratamiento y pozos profundos a través de los cuales se inyecta el agua residual al manto salino, que subyace al agua dulce.

Hasta el 2005 según información de la JAPAY la ciudad de Mérida cuenta con 316,162 tomas de agua potable registrada y con 10,907 tomas registradas en las Comisarías, teniendo un padrón de 224,519 usuarios domésticos, 13,212 usuarios comerciales, 618 usuarios públicos y 101 usuarios hoteleros. El promedio diario de uso de agua potable es de 195,000 metros cúbicos. Sin embargo, en Mérida se presenta una polarización en cuanto a la dotación de este servicio, ya que mientras que en el norte de la ciudad el servicio es de buena calidad y cantidad, en el sur existen grandes carencias en cuanto a la cantidad así como de infraestructura, aunado a la necesidad de cerrar circuitos de distribución para incrementar la presión.

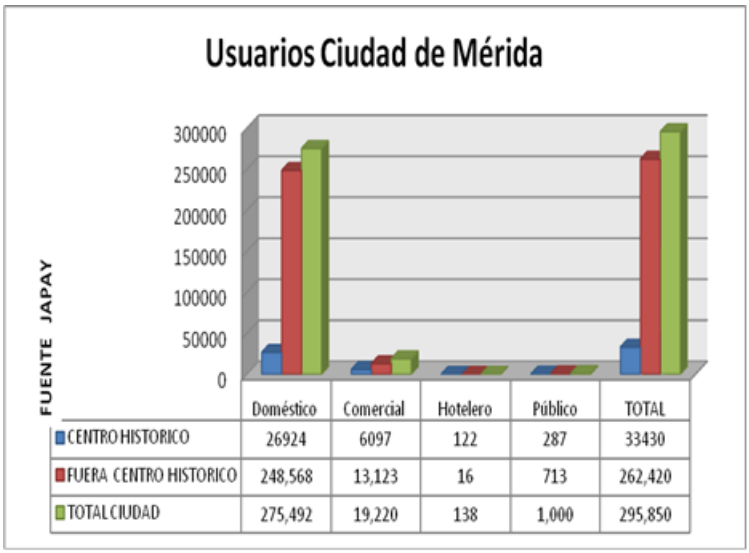
Solo en el caso de Mérida, la JAPAY durante el año 2009, surtía agua a 267,217 viviendas, con un consumo medido de 35,776,761 m^3 anuales, de los cuales 20,314 viviendas están conectadas a sistemas de tratamiento y alcantarillado con un volumen tratado de 2,509,313 m^3. Esto quiere decir que 246,903 viviendas disponen de sus aguas residuales a través de fosas sépticas (en el mejor de los casos) con un volumen de 24,950,586 m^3 al año, considerando que el 75 % del agua entregada se convierte en agua residual vertida.

A lo anterior se debe sumar más de 29,000 viviendas que existen en Progreso, Conkal, Kanasín y Uman, con un consumo de casi 4,000,000 m^3 al año, y que vierten como agua residual un aproximado de 2,900,000 m^3 al año a través de sumideros y en algunos casos fosas sépticas.

Para el año 2011, de acuerdo con los datos de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY), en la ciudad de Mérida se incrementaron a 295,850 las tomas domésticas instaladas (casi 30,000 más que en el 2009) en la zona urbana con una cobertura del 97% (Figura VII.5). En las comisarías hay 10,907 tomas y 56 sistemas de los cuales el municipio atiende 55, y la JAPAY atiende 1. Los sistemas potabilizadores de la ciudad de Mérida son administrados por la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY), organismo perteneciente al gobierno del estado de Yucatán, por lo que el municipio actualmente no es el responsable de la administración del agua a la población de área metropolitana de la ciudad de Mérida.

Se cuenta con cuatro zonas de captación en las plantas potabilizadoras, 23 cárcamos de rebombeo y 55 sistemas independientes. Conforme a lo indicado en la proyección al 2012, para el crecimiento urbano de la Ciudad, fuera del límite del Anillo Periférico, la infraestructura hidráulica urbana es autónoma en su operación. Los actuales desarrollos inmobiliarios de Ciudad Caucel, Real Montejo, Las Américas y Héroes, así lo vienen realizando, lo que representa la dotación del servicio autónomo a 39,200 viviendas unifamiliares y multifamiliares.

Figura VII.5).- Fuentes de captación de agua, por cantidad y por usuarios.



	Doméstico	Comercial	Hotelero	Público	TOTAL
CENTRO HISTORICO	26924	6097	122	287	33430
FUERA CENTRO HISTORICO	248,568	13,123	16	713	262,420
TOTAL CIUDAD	275,492	19,220	138	1,000	295,850

Vale la pena mencionar que, en la actualidad, aquellas viviendas que están conectadas a sistemas colectivos de tratamiento de aguas residuales deben pagar un 50 % del costo del agua potable suministrada. Es decir, si el consumo de agua en una vivienda es de 16 a 20 m^3 bimestrales, el pago por agua potable sería de $72.00 bimestrales, y si estuviera conectada a una planta colectiva de tratamiento de agua debe pagar $36.00 por bimestre para disponer de un agua que cumple con las normas oficiales para su disposición en los cuerpos receptores. En total, aquellas viviendas con un vertido responsable pagan $108.00 por bimestre.

Sin embargo, aquellas viviendas que tienen sumideros y/o fosas sépticas para el tratamiento individual de las aguas residuales que consuman la misma cantidad, sólo pagan $72.00 en total por bimestre, contaminando las aguas subterráneas. Esto representa un problema de equidad y es una señal equivocada en donde se premia al que contamina y se castiga al que hace un uso responsable del agua.

Planta Potabilizadora Mérida I: Se ubica aproximadamente a 23 kilómetros de las inmediaciones de la ciudad, en el extremo sureste dentro de la zona sujeta a conservación ecológica Reserva Cuxtal; ocupa una superficie de 625 hectáreas en terrenos del ejido de San Ignacio Tesip. Está constituida por 24 pozos profundos equipados con bombas tipo turbina que extraen un gasto medio de 1,200 litros/seg. Estos pozos tienen una profundidad promedio de 40 metros, están separados a 600 metros y todos están conectados a un acueducto que lleva el agua hacia la planta para potabilizarla.

Planta Potabilizadora Mérida II: Se localiza al suroeste de la ciudad, ocupa 772 hectáreas, y está constituida por 10 pozos profundos que aportan 500 litros/seg. Se encuentra en el municipio de Umán, por lo que sus acciones responden a una actividad intermunicipal.

Planta Potabilizadora Mérida III: Se ubica al oriente de la ciudad, en la carretera Mérida-Tixkokob donde ocupa 316 hectáreas. Está constituida por 18 pozos, de los cuales 14 están en funcionamiento y aportan 850 litros/seg. Surte de agua potable a todo el norte de la ciudad. Este sistema se encuentra en Mérida, pero los pozos se localizan en otro municipio.

La Planta Potabilizadora Mérida IV, inició la construcción de la segunda etapa en septiembre del año 2008. Actualmente se encuentra en operación total. La primera etapa comprendió la perforación de 26 pozos, construcción de 26 casetas anti-huracanes y 3,000 metros de canal de mampostería, techumbre del canal y edificación de casetas de vigilancia y cloración.

Dicha planta da agua potable a un amplio sector de la población de las zonas poniente y noroeste de la ciudad de Mérida; se amplió el canal colector en 370 metros más de longitud, construcción y equipamiento electromecánico y distribución eléctrica de la zona de captación y del cárcamo de rebombeo, obra civil del edificio operativo y laboratorio. Esta planta tendrá una capacidad para suministrar 1,300 litros/seg. del vital líquido. Es la más reciente y tiene la extensión más grande, y se ubica al oeste del municipio de Mérida y al noroeste de la localidad de Oxcum.

En total se tienen 78 pozos para suplir la demanda de agua en Mérida y parte de la zona metropolitana

Por otra parte, el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Progreso tiene la concesión para explotar, usar o aprovechar aguas nacionales del subsuelo que amparan 23 pozos públicos urbanos en el municipio de Mérida en las localidades de: Temozón Norte, con 10 pozos; Sierra Papacal, también con 10, y Hacienda Tamanché, con tres.

Existen dentro de la ciudad de Mérida 33 pozos de aprovechamiento reportados a la CONAGUA, que son utilizados en su mayoría para las plantas embotelladoras de agua potable y refrescos.

Por todo lo anterior, las plantas potabilizadoras Mérida I, II y III necesitan de un buen mantenimiento para poder proporcionar un óptimo servicio a las colonias o fraccionamientos que abastecen, ya que dichas plantas son antiguas y requieren mejoramiento para proporcionar un adecuado servicio.

Marín (1990), reporta la presencia de un domo de agua subterránea al norte de Mérida basado en la construcción de mapas de tabla de agua y Morris (1994) sugiere que es el resultado del agua que se importa de la periferia de Mérida en las plantas potabilizadoras mencionadas anteriormente. Asimismo, Steinich y Marín (1997) han reportado la presencia de una zona de alta variabilidad hidráulica al sureste de Mérida, donde comúnmente existe una rápida reversión de los gradientes hidráulicos.

Varios de los factores que favorecen esta reversión de gradientes hidráulicos que fuerza al agua a ir en sentido contrario son:

a) El domo de la tabla de agua como resultado del agua importada de la periferia para uso doméstico,

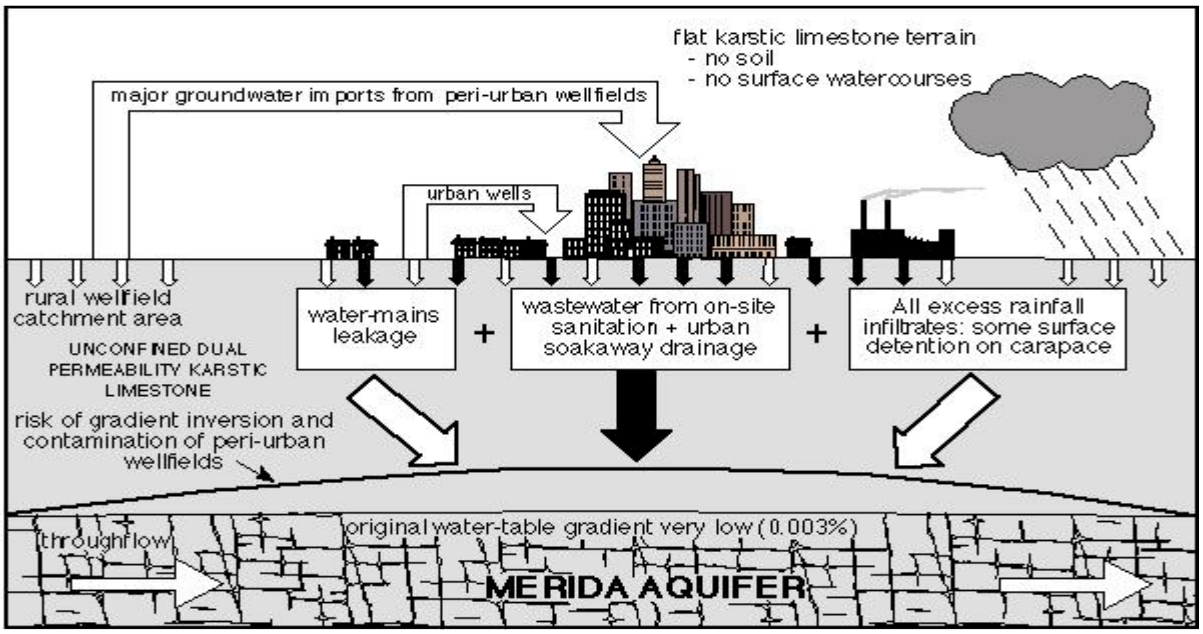
b) El cono de depresión formado por la extracción de agua en el campo de pozos de la planta JAPAY I en Cuxtal,

c) Los cambios en los gradientes hidráulicos en la zona de alta variabilidad al sureste de Mérida (la zona de Homún, Cuzamá, Huhí, Tecoh), y

d) La presencia del anillo de cenotes que forma un parteaguas en las aguas subterráneas.

Chávez y Guillén (1989), han reportado caídas de la tabla de agua para 10 pozos del campo JAPAY I, con una variación de 3 cm a 92 cm, con un promedio de 25 cm, lo que puede generar gradientes de más de 40 mm por Km en dirección sureste. Este valor es de 4 a 6 veces más grande que el gradiente regional ((7 a 10 mm/km).

Figura VII.6).- Modelo conceptual del ciclo hidrológico en la Ciudad de Mérida.



Esto quiere decir que el agua subterránea en la porción sureste de la Ciudad de Mérida se mueve a contracorriente con respecto a los flujos regionales, a través de los campos de la JAPAY I, particularmente en temporada de secas. Esta situación puede generar que los contaminantes que se vierten a través de fosas sépticas, pozos pluviales y otros puedan ser captados por los campos de la JAPAY I debido a las contracorrientes que se forman, lo cual es un riesgo serio que debe ser tomado en cuenta en cuanto a que es el agua que se dispone para usos domésticos.

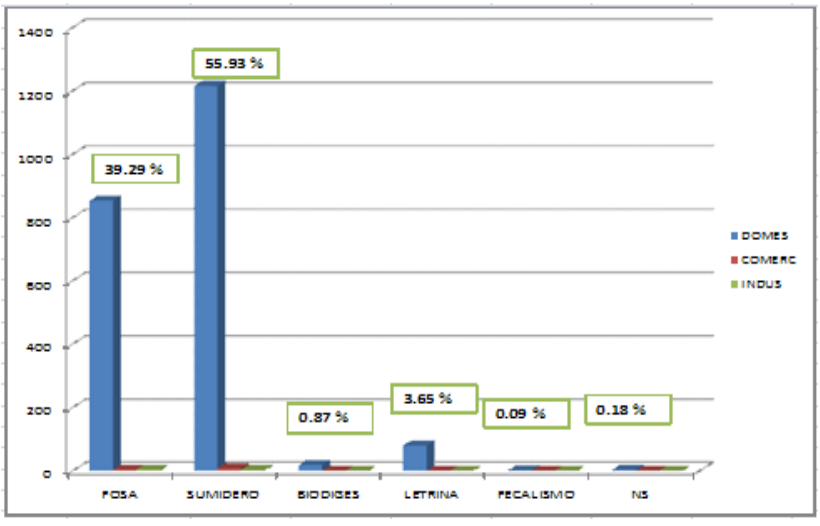
Conforme a lo indicado en la proyección al 2012, para el crecimiento urbano de la Ciudad, fuera del límite del Anillo Periférico, la infraestructura hidráulica urbana es autónoma en su operación. Los actuales desarrollos inmobiliarios de Ciudad Caucel, Real Montejo, Las Américas y Héroes, así lo vienen realizando, lo que representa la dotación del servicio autónomo a 39,200 viviendas unifamiliares y multifamiliares.

El resultado de encuestas efectuadas por DAICOS SA de CV (2011), registra que en la ciudad de Mérida, 107,065 viviendas disponen sus aguas residuales mediante fosas sépticas, esto representa un 40 % del total de 267,663 viviendas registradas.

De igual manera, se indica que de las 107,065 viviendas que cuentan con fosa séptica, el muestreo realizado señala que el 60% nunca se ha efectuado acciones de mantenimiento o limpieza de las mismas; es decir, 64,239 viviendas no cumplen con este proceso. Implantando una cultura de saneamiento y de limpieza de las fosas, este 60 % que nunca han sido limpiados generarían, si se limpiaran una vez al año (en promedio 1.3 m^3/vivienda) 83,510.7 m^3/año y que en promedio representarían 230 m^3/día.

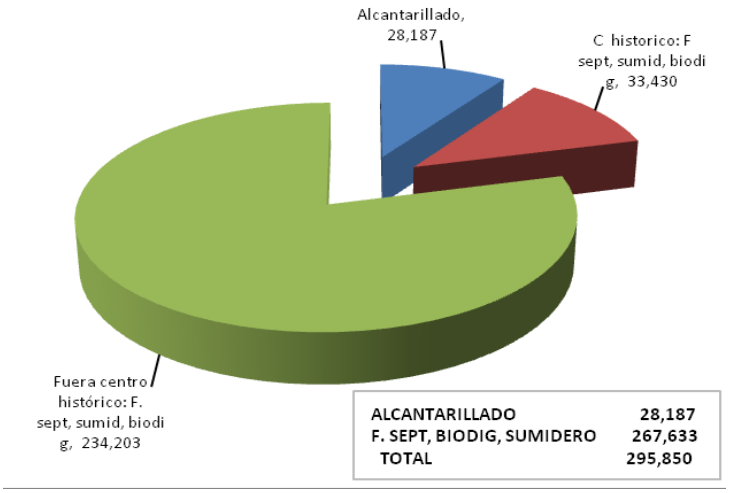
En la ciudad de Mérida existen 23 colonias y fraccionamientos que cuentan con sistemas de drenaje sanitario y plantas de tratamiento de aguas residuales que benefician a 28,187 viviendas con una cobertura del 9.5% del total de viviendas de la ciudad de Mérida, que dan tratamiento al día a 5,628 m^3 de agua residual y tienen una capacidad instalada para tratar 34,481 m^3/día, lo que nos lleva a que únicamente el 9.5 % de las viviendas cuentan con dicho servicio (Figura VII.6).

Figura VII.7).- Sistemas de drenaje sanitario en la Ciudad de Mérida.



Cuando las fosas sépticas son diseñadas sin considerar el volumen de agua a tratar, los procesos involucrados en ella y los criterios validos de diseño, y sobre todo si no tienen un mantenimiento y supervisión adecuados una vez que son construidas, pueden llegar a ser una fuente considerable de contaminación de aguas subterráneas. Al ser las fosas sépticas el método de disposición más utilizado en el Estado es necesario que se asegure el buen funcionamiento de ellas. Una práctica recurrente por parte de los usuarios de fosas sépticas es darles “mantenimiento” únicamente, cuando el lodo de la fosa llega a obstruir las salidas provocando malos olores y una interrupción del flujo en el sistema sanitario.

Figura VII.8).- Usuarios con servicio de agua potable de la Ciudad de Mérida y su saneamiento (2010).



Los tanques sépticos generalmente son diseñados para retener el agua de desecho por un periodo lo suficientemente largo para permitir que las partículas suspendidas en el líquido sean separadas. Las partículas flotarán o sedimentarán dependiendo si son más densas o menos densas que el fluido que las transporta. La materia orgánica retenida en el fondo del tanque se somete a un proceso de descomposición anaerobia y facultativa, transformándose en compuestos y gases más estables como dióxido de carbono (CO2), metano (CH4) y sulfuro de hidrogeno (H2S). El lodo que se acumula en el fondo del tanque séptico está compuesto sobre todo de hilachas provenientes del lavado de prendas y de lignina, la cual forma parte de la composición del papel higiénico; aunque estos materiales lleguen a degradarse biológicamente, la velocidad de descomposición es tan baja que se acumulan.

A pesar de que la descomposición anaerobia reduce el volumen del material sólido depositado en el fondo del tanque, existe siempre una acumulación neta del lodo. Parte del lodo alimentado se adhiere a las burbujas de gas generadas en el proceso de descomposición del material sólido del fondo del tanque, y asciende junto con ellas aumentando el espesor de la capa de espuma formada en la superficie del tanque.

A largo plazo, la acumulación de lodo y espuma hace que se reduzca la capacidad volumétrica efectiva del tanque; por tanto, es conveniente realizar bombeos periódicos del contenido del tanque a manera de mantenimiento programado.

El volumen final de lodo producido dependerá de la naturaleza de los sólidos contenidos en el agua residual, además de la temperatura y el tiempo. Experimentos bajo condiciones controladas con aguas residuales domesticas, indican que la concentración de natas de un tanque sin siembras, (un tanque limpio), requiere un número de meses antes de que la acumulación efectiva de lodo y natas se presenten.

El tiempo entre periodos de drenado de lodos puede ser de 3 ó 4 años o bajo condiciones inusuales, donde el tanque puede ser drenado sólo después de intervalos muy largos. Los datos indican que algunos deterioros en la calidad del efluente pueden ocurrir si el drenado del lodo no se realiza.

Un periodo conveniente puede ser entre 9 y 12 meses, sin embargo, es más importante dejar una porción (1/16) del lodo para sembrar el proceso en el primer compartimiento. El segundo compartimiento puede ser vaciado completamente.

Para llevar a cabo un adecuado mantenimiento es necesario realizar inspecciones. La inspección rutinaria de tanques sépticos debe ser realizada una o dos veces al año y contemplar:

1) revisión de la hermeticidad del tanque,
2) revisión del ingreso de sustancia toxicas y desinfectantes al tanque,
3) revisión de empaques en las conducciones que conectan el tanque séptico con el sistema de disposición en campos de infiltración, y
4) revisión de la cantidad de lodo y espuma acumulados.

La calidad del efluente de las fosas sépticas domiciliarias es difícil de determinar. Los problemas asociados con la obtención de análisis estadísticos significativos en la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y Sólidos suspendidos (SS) en un sistema que sufre grandes variaciones diurnas en el flujo de entrada con súbitos aumentos en la concentración de sólidos suspendidos y dependiendo en parte del sistema de digestión la cual es sensible a las fluctuaciones de temperatura diaria, son enormes. Algunos investigadores, sugieren que la reducción promedio de DBO5 y SS están dentro de los rangos del 30 al 50 % y del 50 al 70 % respectivamente.

Una inspección de tanques sépticos reportó que la concentración promedio en el efluente de DBO5 en tanques sépticos de dos compartimentos está entre 150 y 254 mg/l, mientras que para un tanque con un solo compartimiento es de 300 a 450 mg/l. En ambos casos, el mejor resultado que se menciona es para tanques que han sido drenados en un periodo de 1 a 3 años. Los resultados obtenidos en este estudio se encuentran entre los valores límites presentados por la USEPA, tan solo para los parámetros de Sólidos totales.

El Nitrógeno total Kjeldahl y el Nitrógeno amoniacal sobrepasan los máximos presentados por la USEPA para lodos de fosas sépticas. Es recomendable, la separación de las aguas negras y aguas grises en el proceso de la depuración de las aguas residuales domésticas, ya que permitiría un aumento en la eficiencia de la remoción hasta de un 70%, respecto del valor actual de la materia orgánica.

En la siguiente tabla (Tabla VII.2) se muestran los resultados de la caracterización de los lodos de las fosas sépticas y bio-digestores (DAICOS SA de CV, 2011).

Tabla VII.2).- Resultados de la caracterización de los lodos de las fosas sépticas, bio-digestores y plantas de tratamiento (DAICOS SA de CV, 2011).

FECHA	LUGAR	TIPO	PH	TEMP	MAT. FLOTANTE	DBO	% DE REMOCIÓN	DQO	GRASAS Y ACEITES	SST	% DE REMOCIÓN	(N) TOTAL	(P) TOTAL	SS ((-) = (<), (+)=(>)
12-Abr-11	SERAPIO RENDON	FOSA	7.09	29.00	PRESENTE	247.00		669.00	103.00	345.00		63.00	14.54	+250
12-Abr-11	SERAPIO RENDON 2	FOSA	7.11	30.00	PRESENTE	185.00		327.00	60.58	228.15		48.45	17.30	+500
12-Abr-11	SERAPIO RENDON 3	FOSA	7.33	30.00	PRESENTE	263.22		457.20	84.10	256.00		74.20	12.50	50
14-Mar-11	AZCORRA	FOSA	6.85	ND	AUSENTE	254.00		512.56	40.00	215.00		45.00	14.54	+300
14-Mar-11	AZCORRA 1	POZO	6.94	ND	PRESENTE	168.70	33.58	340.09	28.39	153.31	28.69	98.17	10.26	1
16-Mar-11	AZCORRA 2	SUMIDERO	7.55	24.00	AUSENTE	1,574.18		23,544.84	2,175.41	24,400.00		777.12	441.98	+250
16-Mar-11	FCO. DE MONTEJO 1	FOSA	7.05	28.00	PRESENTE	260.00		744.00	120.00	273.00		63.00	8.49	+600
16-Mar-11	FCO. DE MONTEJO 1	POZO	7.58	29.00	AUSENTE	33.50	87.12	115.54	3.98	32.00	88.28	89.16	9.12	0
22-Mar-11	PTAR COM MEGABALCONES	INF PTAR	6.82	26.00	PRESENTE	1,199.71		3,681.33	461.30	1,860.00		161.43	9.90	27
22-Mar-11	PTAR COM MEGABALCONES	EFLU PTAR	8.23	25.00	AUSENTE	6.51	99.46	47.04	3.98	26.00	98.60	2.17	4.00	0
17-Mar-11	FCO. DE MONTEJO 2	FOSA	7.06	28.00	PRESENTE	267.90		559.26	77.13	231.57		76.00	17.26	+250
17-Mar-11	FCO. DE MONTEJO 2	POZO	7.14	24.00	AUSENTE	216.33	19.25	558.72	36.06	221.15	4.50	156.56	14.23	0.10
17-Mar-11	JUAN PABLO II	FOSA	7.74	28.00	PRESENTE	140.00		502.00	27.74	332.67		44.80	8.47	+100
17-Mar-11	JUAN PABLO II 1	POZO	8.06	28.00	AUSENTE	137.68	1.66	317.53	19.46	156.82	52.86	137.67	10.29	0.20
17-Mar-11	JUAN PABLO MAGISTERIO	FOSA	7.25	28.00	PRESENTE	154.00		306.00	40.00	115.00		63.00	14.54	+150
17-Mar-11	JUAN PABLO MAGISTERIO	POZO	7.58	28.00	AUSENTE	101.96	33.79	336.99	4.51	43.00	62.61	227.22	14.14	0.20
25-Feb-11	TIXCACAL-OPICHEN	BIODIGEST	7.28	ND	PRESENTE	670.14		2,028.61	334.80	2,190.00		292.87	23.76	48

Graniel et al (1999), reporta los cambios que han sufrido algunos constituyentes del agua subterránea de la Ciudad de Mérida, comparando datos de los años 1970 y 1991. Los resultados revelan una contaminación extensiva de la parte superior del acuífero. Las concentraciones de Cloro y Sólidos Totales Disueltos se han incrementado significativamente en áreas que subyacen distritos fuertemente urbanizados.

Las mediciones realizadas en pozos someros confirman que las concentraciones de oxígeno se han reducido también significativamente. Se observan valores muy elevados de sales de nitratos que se extienden ampliamente en la zona central de la ciudad, así como los valores de coliformes fecales, indicador de escaso saneamiento **(figura VII.9)**.

Figura VII.9).- Valores de cloro, sales de nitratos, valores de coliformes fecales y oxigeno disuelto en el agua subterrénea debajo de la Cd. de Mérida.

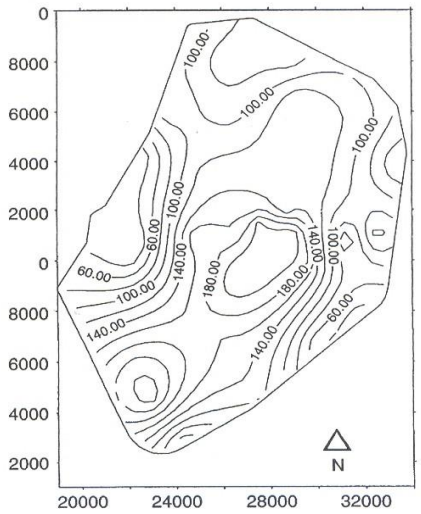


Fig. 5
Chloride (mg/l) upper part of the Merida aquifer

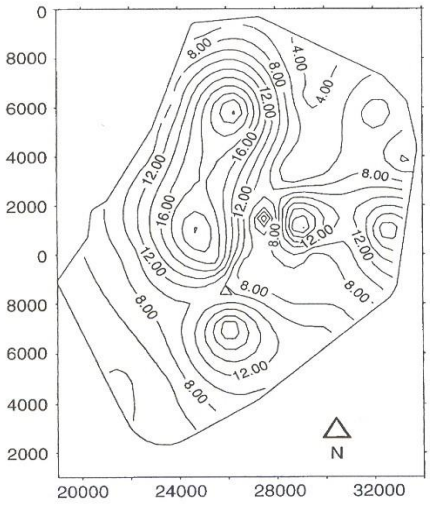


Fig. 7
Nitrogen of nitrates (mg/l) upper part of the Merida aquifer

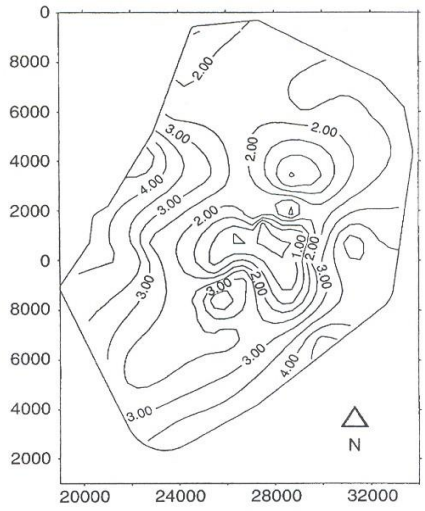


Fig. 6
Dissolved oxygen (mg/l) upper part of the Merida aquifer

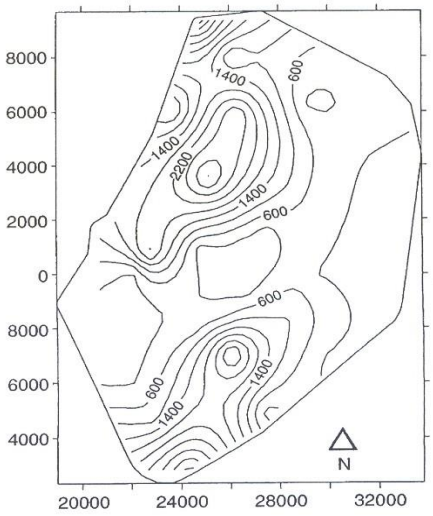


Fig. 8
Faecal coliform (NC × 100 ml) upper part of aquifer the Merida

En lo concerniente al drenaje pluvial, no existen los sistemas de alcantarillado apropiados para desalojar las aguas provenientes de las lluvias. El subsuelo está constituido por capas y estratos con diversos grados de permeabilidad, y que en su estado natural, son propicios para absorber los caudales de agua generados por las precipitaciones pluviales, sin embargo, la impermeabilización derivado del asfalto y cemento en calles y banquetas impide que el agua se infiltre formando severas inundaciones en la mancha urbana. La metodología empleada para la captación y desalojo de las aguas pluviales en la ciudad se hace mediante pozos construidos sin la adecuada protección a profundidades que de manera directa transportan todos los contaminantes y residuos que se encuentran en las calles, como pueden ser aceites de los automotores, detergentes, plásticos, residuos sólidos, baterías, excretas de animales, por mencionar algunos. Los pozos por lo general carecen de sellos de protección adecuados que eviten la migración del agua de inyección

por la pared del pozo, alcanzando las profundidades de flujos preferenciales de agua dulce y contaminando el agua a estas profundidades, que luego captan los pozos de abastecimiento que se tienen dentro de la ciudad. Actualmente no se tiene un proyecto concreto para darle solución a esta problemática. Las lluvias representan épocas de limpieza urbana donde las aguas arrastran consigo todo lo que va encontrando en su camino. La ciudad, al no contar con un sistema de drenaje, emplea el uso de rejillas para el desahogo pluvial que se genera en las calles especialmente del centro, pero estas concurridamente se le debe dar mantenimiento, ya que al drenar el agua acumulada, arrastran con ella todos los residuos sólidos que se encuentran tirados y crean un tapón, obstruyendo el paso del agua y las consecuentes inundaciones del sector, de tal forma que los lodos generados deben ser dispuestos en diversos sitios, entre ellos el relleno sanitario o las lagunas de oxidación del exbasurero.

El sistema de drenaje pluvial cuenta con 66,857 pozos, de los cuales 33,567 son colectores y areneros, 33,290 profundos, a los que se les suman 133,821 metros lineales de zanjas colectoras con rejillas. El primer cuadro de Mérida dispone de 700 pozos colectores y areneros y 1,500 metros de zanjas de rejillas. Desde el 2007 a 2011 se han construido 4,605 metros de zanjas con rejillas y 1,139 pozos profundos de 10 pulgadas de diámetro. También se desazolvaron 2,599 pozos colectores y 89,515 metros de zanjas.

Figura VII.10).- Sistemas de drenaje pluvial en la Ciudad de Mérida.

Para dar mantenimiento al sistema colector se cuenta con 5 pipas, 55 bombas de desagüe, 5 compresores, 3 desazolvadoras hidroneumáticas de succión y una

perforadora de pozos. El ritmo constante de construcción de pozos profundos, con sus respectivas rejillas colectoras, ha originado que las calles se desagüen en el menor tiempo posible, tardando en los casos más críticos entre 2 y 4 horas.

La ciudad no cuenta con una red que defina el sistema de drenaje pluvial, sino que las aguas pluviales captadas en el sitio, deben ser ahí mismo desalojadas a través de su filtrado en cajas areneras, a pozos profundos, hasta el manto freático dinámico. Lo anterior significa que antes de la temporada de lluvias es necesario desazolvar los pozos y limpiar las cajas areneras. De igual manera es preciso mantener en buen estado las zanjas colectoras de absorción. Éste es uno de los temas al que hay que darle mayor importancia en el área de infraestructura, ya que como se mencionó anteriormente no se cuenta con un sistema de drenaje integral.

Hoogesteijn Reul, et al (2015), mencionan que, en un inventario de más de 2,000 cenotes en el estado de Yucatán, se determinó que sólo un porcentaje mínimo se encuentra aprovechado para fines de explotación turística debido a diversas razones. El Programa Estatal de Turismo de Yucatán, 2001-2007, consideró que los cenotes, sobre todo aquellos ubicados en las cercanías de las zonas arqueológicas y sitios turísticos, podían generar beneficios socioeconómicos a las comunidades locales o a aquellas en las que ya existían grupos organizados de ejidatarios, comuneros o particulares a través del turismo. (Diario Oficial 2003).

Dicha tendencia político-económica continúa en el Programa Sectorial de Fomento Turístico 2007-2012 con la promoción de los cenotes como atractivo turístico (Diario Oficial 2011) y en el Plan Estatal de Desarrollo 2012-2018 donde menciona la necesidad de "promover infraestructura turística en instalaciones y servicios en los cenotes de Yucatán" (Diario Oficial 2013).

Adicionalmente, el Gobierno del Estado de Yucatán, a través de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, realizó el proyecto “Saneamiento y manejo integral de cenotes” en el que se analiza la posibilidad de utilizar mecanismos de pago por servicios ambientales para habilitar los cenotes como lugares de turismo (SEDUMA 2011).

Hoogesteijn Reul, et al (2015), menciona que existe en la literatura suficiente evidencia epidemiológica que sugiere que el contacto con agua para uso recreacional contaminada es un factor de riesgo para el desarrollo de infecciones oculares, de oído, nariz y garganta, irritaciones cutáneas, enfermedades respiratorias y enfermedades gastrointestinales. La relación entre la frecuencia de enfermedades relacionadas con el nado y las concentraciones de Coliformes totales y de *Escherichia coli* en cuerpos de agua dulce de uso recreacional es estadísticamente significativa. El grupo de mayor riesgo en estas situaciones son los niños, debido a que suelen permanecer por mayor tiempo en las aguas y son propensos a tragar, intencional o accidentalmente agua. Otro grupo vulnerable son los turistas, quienes carecen de inmunidad ante los patógenos endémicos de la localidad. Así, en los cenotes se ha podido identificar la presencia de desechos fecales, nitratos, plaguicidas y productos de consumo humano como fármacos y estupefacientes (Hoogesteijn Reul, et al 2015). Adicionalmente, apoyando los hallazgos de los autores anteriormente mencionados, la Secretaría de Salud afirma que “el estado de Yucatán presenta la incidencia más alta de enfermedades gastrointestinales a escala nacional; las enfermedades parasitarias son el principal problema de salud pública de

origen hídrico, a causa de altos niveles de contaminación bacteriana…" (Diario Oficial 2013).

Por un período de 5 meses (Julio a Noviembre de 2013), los autores colectaron muestras de 48 cenotes distribuidos principalmente en la zona del anillo de cenotes y al oriente del estado de Yucatán (Figura VII.11). Los cenotes fueron escogidos de la lista producida por la Secretaria de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (N=103) (SEDUMA 2013a), que adicionalmente tuvieran promoción a través de páginas web. El agua (100 mL) fue colectada a 30 cm de profundidad desde el espejo de agua, en el lugar de acceso que usan los bañistas para entrar al cenote, en botellas de plástico asépticas que forman parte del *kit* de muestreo, siguiendo los protocolos sugeridos (US EPA 2004). Los 48 cenotes muestreados presentaron contaminación fecal, ya que los medios de cultivo fueron positivos a coliformes totales y fecales (Tabla VII.3). La presencia de coliformes totales y fecales indica que las aguas de todos los cenotes muestreados están contaminadas con materia fecal.

Dado que México carece de normas que determinen los niveles permisibles de unidades formadoras de colonias (UFC) y del número más probable (NMP) para agua dulce de uso recreacional, no se puede determinar si se está violando alguna Norma. En todo caso se están violando las especificaciones sanitarias del Proyecto de Norma PROY-NOM-201-SSA1-2013 de agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel (Diario Oficial 2014) que establece que los límites máximos permisibles son de < 1.1 NMP/100 mL y de 0 UFC/100 mL. Si las políticas gubernamentales contemplan el uso de cenotes como centros turístico-recreacionales, estos programas deberían venir acompañados de una política de saneamiento, los cenotes no son piscinas y no deben ser usados como tal, sin sistemas de saneamiento adaptados a la ecología del carst.

Figura VII.11).- Ubicación de los cenotes muestrados en la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes.

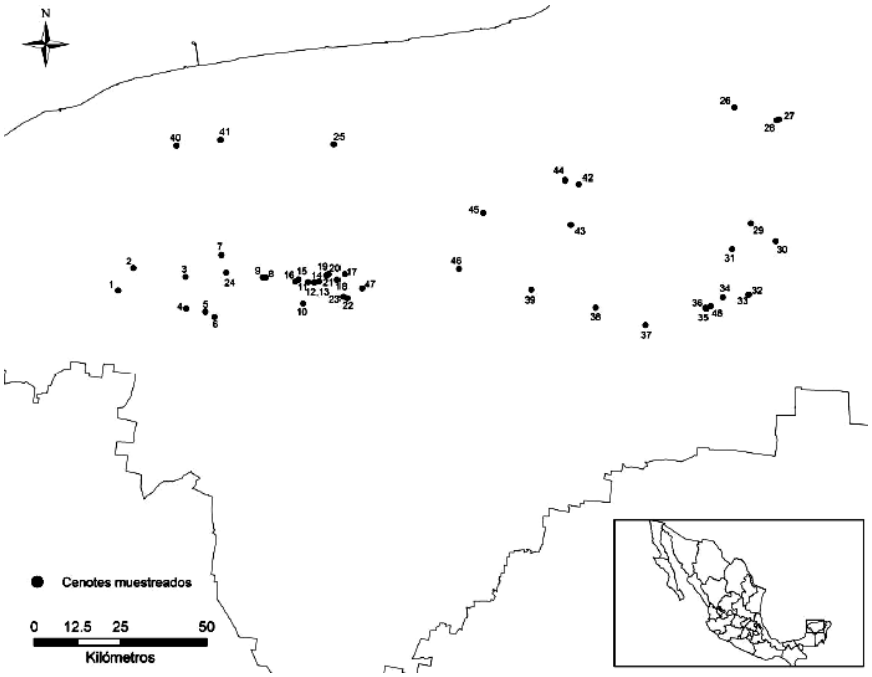


Tabla VII.3).- Lista de los cenotes incluidos en el monitoreo de contaminación fecal.

Cenote	Municipio	Uso	Latitud	Longitud	Coliformes totales	*E. Coli*
1	Kopomá	Recreacional	20.68955	-89.87610	+	+
2	Chocholá	Turistico	20.74994	-89.83427	+	+
3	Abalá	Turistico	20.72868	-89.68951	+	+
4	Abalá	Recreacional	20.64467	-89.68551	+	+
5	Abalá	Turistico	20.63736	-89.63279	+	+
6	Abalá	Turistico	20.62384	-89.60665	+	+
7	Mérida	Reserva	20.78826	-89.59047	+	+
8	Tecoh	Recreacional	20.73033	-89.46583	+	+
9	Tecoh	Turistico	20.73048	-89.47474	+	+
10	Tecoh	Turistico	20.66281	-89.36104	+	+
11	Cuzamá	Turistico	20.71972	-89.34750	+	+
12	Cuzamá	Turistico	20.71925	-89.33086	+	+
13	Cuzamá	Turistico	20.71935	-89.33141	+	+
14	Cuzamá	Turistico	20.72157	-89.31817	+	+
15	Cuzamá	Turistico	20.72583	-89.37500	+	+
16	Cuzamá	Turistico	20.72040	-89.38333	+	+
17	Homún	Turistico	20.72699	-89.26813	+	+
18	Homún	Turistico	20.74206	-89.24958	+	+
19	Homún	Turistico	20.73948	-89.29689	+	+
Cenote	**Municipio**	**Uso**	**Latitud**	**Longitud**	**Coliformes totales**	***E. Coli***
20	Homún	Turistico	20.74159	-89.29129	+	+
21	Homún	Turistico	20.73740	-89.29696	+	+
22	Homún	Turistico	20.67820	-89.24167	+	+
23	Homún	Turistico	20.68222	-89.25250	+	+
24	Tecoh	Turistico	20.74193	-89.57592	+	+
25	Motul	Turistico	21.08378	-89.28271	+	+
26	Tizimin	Recreacional	21.19335	-88.16944	+	+
27	Tizimin	Sin acceso	21.16216	-88.04427	+	+
28	Tizimin	Recreacional	21.15974	-88.05051	+	+
29	Temozón	Turistico	20.88820	-88.12050	+	+
30	Temozón	Turistico	20.84130	-88.05109	+	+
31	Temozón	Turistico	20.81947	-88.17199	+	+
32	Valladolid	Turistico	20.69870	-88.12432	+	+
33	Valladolid	Turistico	20.69819	-88.12602	+	+
34	Valladolid	Turistico	20.69154	-88.19776	+	+
35	Valladolid	Turistico	20.66087	-88.24277	+	+
36	Valladolid	Turistico	20.66272	-88.24479	+	+
37	Kaua	Recreacional	20.61583	-88.41194	+	+
38	Tinum	Turistico	20.66092	-88.55100	+	+
39	Yaxcabá	Turistico	20.70698	-88.73047	+	+
40	Mérida	Turistico	21.12500	-89.62500	+	+
41	Mérida	Turistico	21.09098	-89.59798	+	+
42	Cenotillo	Recreacional	20.98823	-88.60099	+	+
43	Quintana	Recreacional	20.88023	-88.62214	+	+
44	Cenotillo	Turistico	20.99710	-88.63953	+	+
45	Izamal	Recreacional	20.90955	-88.86696	+	+
46	Kantunil	Turistico	20.76038	-88.93228	+	+
47	Huhí	Recreacional	20.70556	-89.20082	+	+
48	Valladolid	Turistico	20.66770	-88.23018	+	+

Arcega-Cabrera et al (2014), menciona que la contaminación de origen antropocéntrica se ha incrementado en las últimas décadas. Las aguas residuales domesticas e industriales se descargan directo al manto freático mediante sumideros o mediante fosas sépticas, lo que resulta en una contaminación multipuntual hacia el acuífero yucateco. Varios estudios demuestran que los contaminantes migran de la superficie del suelo de forma vertical al manto freatico y de ahí hacia las aguas costeras. En el caso del Anillo de Cenotes, una gran cantidad de actividades económicas y urbanas generan un volumen substancial de material fecal hacia el ambiente. Debido a que estas aguas residuales no son tratadas, grandes cantidades de compuestos orgánicos antropogénicos (como heces fecales) están dispersándose por el agua subterranea hacia los cenotes y contaminando el acuífero.

Ante estas condiciones, es de esperar que la determinación de esteroles fecales pueda ser una herramienta efectiva para detectar la contaminación fecal en los sistemas naturales.

Los trabajos de Morgane Derrien et al (2015), muestra que la contaminación antropogénica puede ser caracterizada por la presencia de 5β-estanol C27 esteroles (e.g., coprostanol y epicoprostanol). Estos compuestos son subproductos del colesterol vía la reducción anaeróbica intestinal del sistema digestivo de los animales superiores y se asocian comúnmente con la contaminación doméstica urbana y animal.

Tanto Arcega-Cabrera et al (2014), como Morgane Derrien et al (2015) trabajaron en la zona del anillo de cenotes obteniendo muestras de 30 cenotes la primera y de 23 cenotes la segunda, distribuidos a lo largo del anillo de cenotes como se muestra en la figura VII.12 y tabla VII.4.

Los sitios de muestreo se seleccionaron de acuerdo con el uso de suelo (formas de extracción local de agua, sitios de disposición de residuos, áreas turísticas, urbanas actividades genaderas, etc.), incluyendo cenotes de interés turístico. Los cenotes seleccionados presentaban características morfométricas distintivas: manatiales submarinos, cenotes (abiertos, semiabierto, en cuavas y cavernas) y pozos de agua, durante dos temporadas: la temporada de lluvias (septiembre 2011) y la estación seca (mayo 2012).

Los autores afirman que hay un cambio significativo en el flujo de las aguas subterráneas de 7 a 10 mm/día durante la temporada seca, a 3 cm/s durante la temporada de lluvias, debido a la recarga.

Figura VII.12).- mapa del área de estudio con los sitios de muestreo y algunos detalles del uso de suelo.

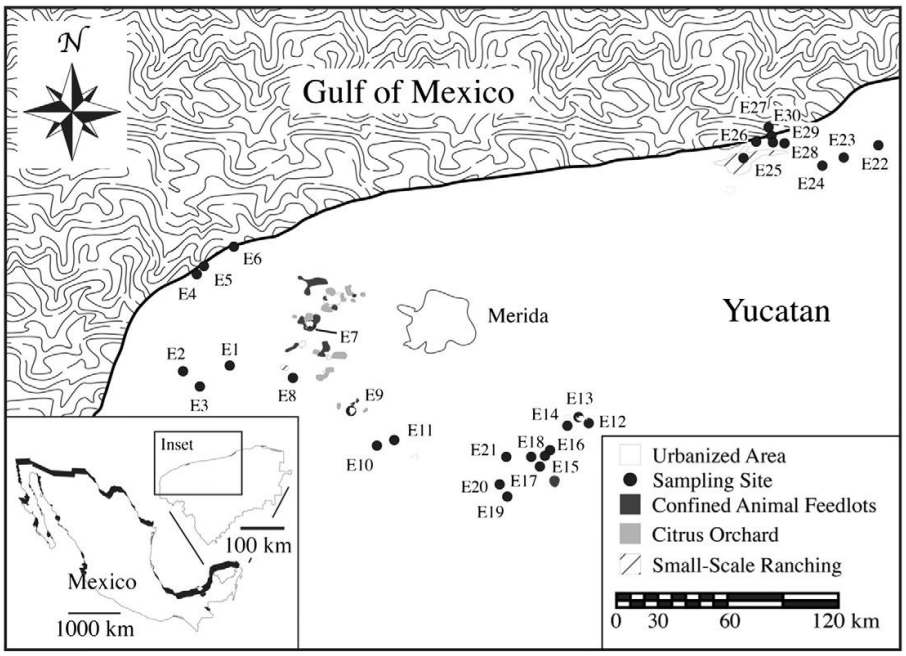


Tabla VII.4).- Descripción de las áreas de muestreo a lo largo del Anillo de Cenotes, Yucatan,Mexico. Uso del suelo como el reportado por Arcega-Cabrera et al. (2014).

Sitio	Tipo	Uso de suelo
Zona Nororiental (Dzilam de Bravo) (N 21° 20′ 21.3″–21° 24′ 24.5″/W 88° 34′ 31.3″–88° 53′ 55.7″)		
1	Xbuya manantial submarino	área urbana
2	Manantial submarino	área urbana
3	Elepeten cenote	área urbana y turística
4	Manantial submarino	área urbana
5	Manantial submarino	área urbana
6	Cenote	área urbana
7	Pozo	área ganadera
8	Pozo	área ganadera
Zona Central (Cuzama) (N 20° 33′ 07.3″–20° 44′ 29.5″/W 89° 16′ 05.3″–89° 28′ 52.4″)		
9	Telchaquillo cenote	área forestal y turistica
10	Nahyah cenote	área agrícola y turística
11	Noh-Mozon cenote	área forestal y turística
12	Kalcuch cenote	área forestal y turística
13	Tanimax cenote	área forestal y turística
14	Santa Maria cueva	área turística
15	Yaxpakaltun cenote	área agrícola y turística
Zona Noroccidental (Celestun) (N 20° 40′ 25.1″–21° 08′ 54.2″/W 89° 43′ 55.4″–90° 14′ 08.0″)		
16	Yaxcopoil cenote	área forestal y turística
17	X'batun cenote	área forestal y turística
18	San Ignacio cenote	área turística
19	Cenote	área forestal
20	Doña Lucy cenote	área urbana
21	Ba'as manatial submarino	/
22	Pozo	área de cultivo
23	Pozo	área de cultivo

Los asentamientos urbanos y las actividades antropogénicas que se llevan a cabo alrededor de los sitios de muestreo seleccionados a lo largo del anillo de cenotes, basado en los censos agropecuarios (INEGI 2013) se muestran en la tabla 2.

Los autores encontraron diferencias espaciales significativas, las ciuales están presentes para esteroles y esteroles fecales, pero las diferencias temporales sólo están presentes para los esteroles fecales. Los esteroles fecales en sedimentos son más altos durante la temporada lluviosa. Este patrón sugiere una entrada al acuífero y un proceso de transporte promovido por el cambio de flujo de agua entre temporadas.

Tabla VII.5).- Actividades antropogénicas en las áreas cercanas al anillo de cenotes. (INEGI, 2013) y estimaciones de generación de residuos.

Sampling station	Nearest town	Humans*	Crops (ha)	Cattle*	Swine*	Poultry*	Estimated wet feces production (Mg)**/year
E1,E2, E3	Celestun	6831	229	725	171	3297	4097
E4, E5, E6	Sisal	1837					117
E7	Tetiz and Hunucma	4725	1944.4	2578	15,773	18,342	24,584
E8	Kinchil, Samahil and Tedzil	12,191	3245.09	5642	1426	16,183	29,063
E9, E10	San Antonio Mulix	36	22				2
E11	Cacao and Abala	6617	831	1130	166	3467	6006
E12, E13	Homun	7257	925	1228	3777	7272	9259
E14	Cuzama	4966	269	582	1457	9517	4420
E15, E16, E17	Sabacche	160		80			389
E18	Poccheina	4825					308
E19, E20, E21	Xcanchacan	1241					79
E22, E23, E24	Dzonot -lu	2280					145
E25	Dzilam González	5905	20,672	10,254	899	5143	49,838
E26, E27, E28, E29, E30	Dzilam de Bravo	2463	6731	3913	241	944	18,928

* Number of individuals.

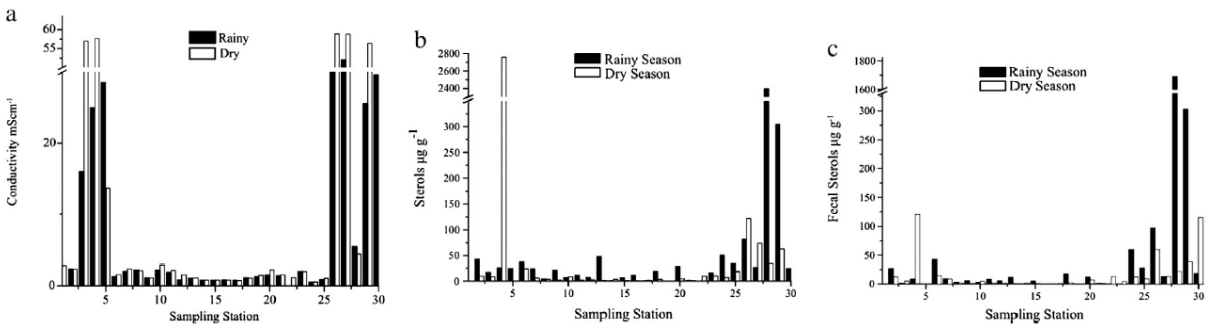
Fuente: Arcega-Cabrera et al (2014)

La variabilidad espacial y temporal de la conductividad de oeste a este (figura VII.13, a) identifica los sitios donde el agua dulce se mezcla con el agua de mar, así como un incremento de conductividad durante la temporada seca. El cambio en la conductividad es relevante para entender el proceso de sedimentación de la materia orgánica particulada, ya que podría afectar la concentración en sedimentos de esteroles y esteroles fecales por:

1) Incremento de la concentración a través de la co-sedimentación; o
2) Liberando esteroles de partículas orgánicas/inorgánicas por competencia con iones importantes.

Las concentraciones totales de esteroles (Figura VII.13, b) y esteroles fecales (Figura VII.13, c) fueron más altas en el área de Dzilam durante la temporada lluviosa, indicando una descarga sin fenómenos de dilución asociados con los incrementos de la cabeza hidráulica regional y posterior sedimentación en el sitio de muestreo. Los esteroles fecales encontrados en el área de Dzilam están en la categoría de alta concentración, pero para el resto del anillo de cenotes están en la categoría de baja concentración, indicando un transporte significativo hacia el exterior en la parte noreste del anillo de cenotes.

Figura VII.13).- Variaciones espaciales y temporales de a). Conductividad eléctrica, b). Esteroles y, c). Esteroles fecales a lo largo del anillo de cenotes.



Arcega-Cabrera et al (2014), menciona que en un entorno cárstico donde las capas de piedra caliza subsuperficial y los espesores de suelo no son restrictivas, que pueden tener importantes cantidades de agua y en donde se presenta una red de fracturas interconectadas, grietas, estratos, fallas, canales, cavidades y cavernas que se encuentran a diferentes profundidades en el lecho de roca, los compuestos orgánicos, como los esteroles fecales, podrían conservarse en el matriz sedimentaria y sólo se libera a la columna de agua bajo los eventos de lluvia intensa, como se observa en las muestras de la temporada lluviosa de la Zona Dzilam.

Además, los óxidos de aluminio y hierro presentes en el matriz cárstica podría tener un efecto sobre la retención de compuestos orgánicos en el suelo debido a su gran superficie específica y capacidad de retención capilar, la mayoría de los microcontaminantes depositados en el material cárstico se conservan o se retienen dentro de los primeros 2 m por debajo de la superficie (zona vadosa).

Para que los contaminantes lleguen al agua subterránea (zona freática), necesitan un impacto directo y sustancial de la entrada de precipitación y transporte efectivo por conductos de flujo preferencial, no por flujo difuso.

A pesar de que numerosas actividades productivas y domésticas (habitacionales) se desarrollan alrededor del anillo de cenotes, y aunado a que no hay tratamiento de aguas residuales o sistemas de tratamiento de aguas residuales, se encontraron concentraciones de bajas a medias de esteroles (0.5 – 122.21 µg/g) y de esteroles fecales (0.3 – 115.35 µg/g).

La mayoría de las concentraciones a lo largo del anillo de cenotes son comparables con otros sitios a nivel mundial con presencia de materia fecal. Sin embargo, una excepción notable es la presencia temporal de esteroles fecales en el lado noreste del anillo de cenotes. En zona de Dzilam de Bravo, las concentraciones de esteroles y esteroles fecales durante la temporada de lluvias fueron altos (2396.42 µg/g y 1690.18 µg/g respectivamente).

El análisis exploratorio multivariado demostró que los esteroles fecales son transportados y depositados con el material cárstico lixiviado, y su variación está fuertemente relacionado con el incremento de flujo durante la temporada lluviosa. Las bajas concentraciones y la falta de relación entre los esteroles fecales y las fuentes probables podrían ser el resultado de:

1) adsorción o migración limitada a través de intrincados conductos, grietas o dentro del sistema fracturado cárstico y
2) Co-transporte dependiente de flujo estacional con lixiviados cársticos.

En términos más sencillos, parece que los esteroles fecales se acumulan en el matriz cárstica por encima de la tabla de agua (zona vadosa) durante los nortes y la temporada de secas y luego fluyen rápidamente a través del anillo de cenotes durante los episodios de fuertes lluvias durante la temporada lluviosa. Este proceso hace que sea muy difícil vincular los niveles de esteroles fecales medidos con múltiples fuentes puntuales situados cerca del anillo de cenotes. En consecuencia, se requiere más investigación al respecto (Arcega-Cabrera et al 2014).

Por su parte, Morgane Derrien et al (2015), mediante análisis de componentes principales identifica tres grupos muy definidos en el anillo de cenotes y los reconoce temporalmente como temporada de lluvias (a), y de secas (b). El grupo A (representadas por los sitios de muestreo 2a, 4a–8a, 10a, 15a, 20b y 23b) se define por coprostanol y epicoprostanol, que caracterizan a las aguas residuales humanas o animales, indicando que la principal fuente de materia orgánica para este grupo es antropogénica. Todas estas muestras son de tipo urbano (2a, 4a–6a), turistico (10a, 15a, 20b), áreas de ganadería (7b y 8A), o cerca de áreas de cultivo (23b). Las muestras 2a y 4a–6a provienen de manantiales submarinos, que ocurren a lo largo de toda la costa y en alta densidad donde el anillo intersecta con la costa (por ejemplo, Dzilam de Bravo y Celestún. Estos manantiales descargan agua dulce del sistema hidrológico regional del anillo de cenotes hacia el Golgo de México y se espera que presenten concentraciones importantes de estos materiales (coprostanol y epicoprostanol).

Para el caso de los sitios 10a, 15a y 20b, muestran importantes concentraciones de coprostanol y epicoprostanol durante ambas temporadas, lluvias y secas. Estos cenotes son visitados regularmente por los turistas y/o tienen una extensa actividad agrícola a su alrededor. Durante la temporada de lluvias (los sitios de 10a y 15a), estos compuestos antropogénicos resultan de la entrada de escorrentías de residuos humanos y animales.

Por el contrario, en la estación seca (el sitio 20b), la ocurrencia de estos compuestos antropogénicos podrían ser el resultado de una descarga directa recurrente o infiltración de aguas residuales domésticas por sumideros o de fosas sépticas. Para las areas ganaderas (7b y 8a), la escorrentía recurrente relacionada con estas actividades conduce a una presencia persistente de estos compuestos en los sedimentos de los cenotes, independientemente de la temporada.

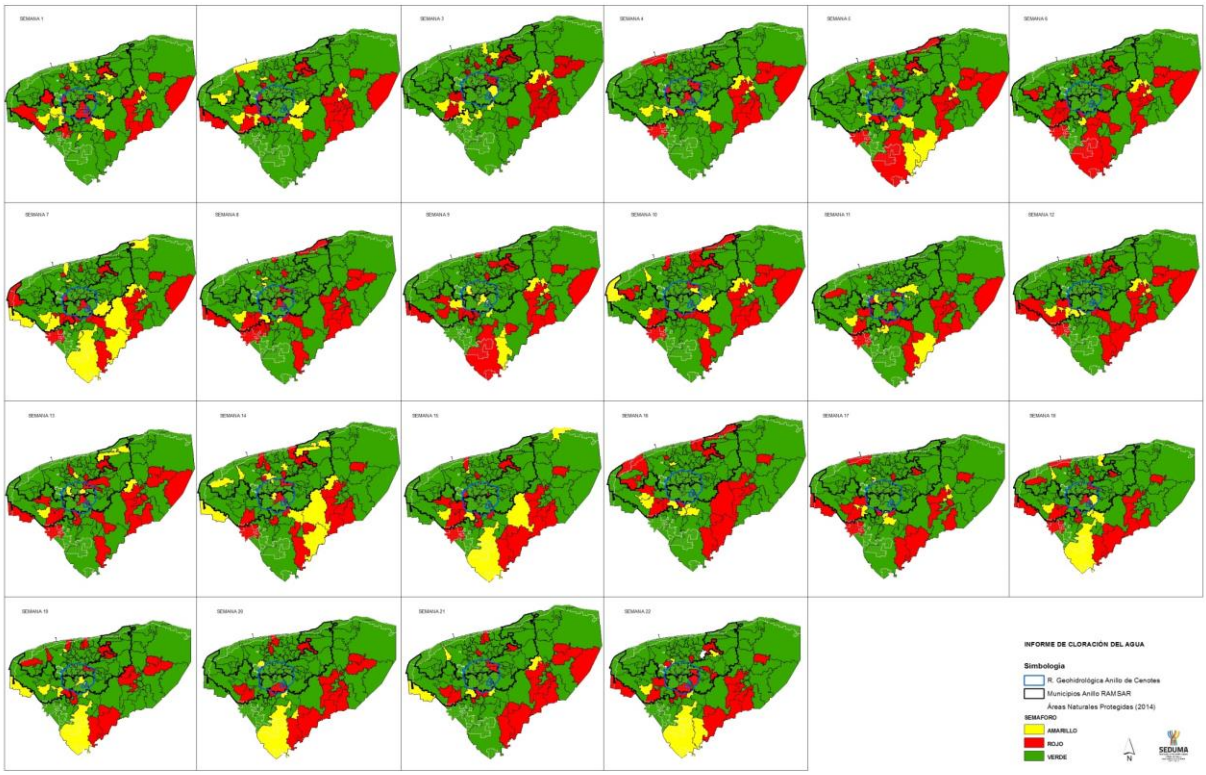
La última muestra que presenta compuestos antropogénicos es el 23b, un pozo para la extracción de agua utilizado para proveer de agua potable a la localidad de Celestún. Parte del agua que llega a la zona noroccidental del anillo de cenotes proviene del sur, del acuífero de la Sierrita de Ticul, que incorpora agua de tierras muy lejanas.

Por lo tanto, es probable que los compuestos encontrados en el sitio 23b se originen de ella, pero en condiciones cambiantes de flujo, pero que en los cenotes con bajas velocidades de flujo coprecipitan y se acumulan los sólidos orgánicos e inorgánicos quedando atrapados en el sedimento.

Ante tal situación en el manejo de aguas residuales, es por demás preocupante que en muchos Municipios en el Estado de Yucatán y particularmente en la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes, la cloración del agua que se extrae del subsuelo para el consumo humano no se realiza adecuada o simplemente no se clora, poniendo en riesgo a la población de contraer enfermedades, particularmente gastrointestinales.

En la figura siguiente se muestra un monitoreo de 22 semanas a los sistemas municipales de agua potable en cuanto a presencia de cloro en el vital liquido, realizado por el Laboratorio Estatal de Salud en el año 2014, y se observa que en algunos municipios la dosificación es intermitente o simplemente no se dosifica (la ausencia de cloro en el agua potable se marca en rojo y por debajo de los niveles que marca la norma en color amarillo).

Figura VII.14).- Monitoreo a la cloración en los sistemas municipales de agua potable.



VII.3).- Contaminación derivada de la Actividad Industrial.

Por otro lado, Vázquez et al (1997), identificaron compuestos orgánicos disueltos en el acuífero por debajo de la Ciudad de Mérida, en concentraciones superiores en algunos casos a 10 microgramos por litro de 1,1,1 – tricloroetano, tricloroeteno y tetracloruro de carbono, en donde las mayores concentraciones se presentaron en pozos someros y profundos de la zona sureste de la ciudad, donde la mayor parte de la industria se ubica.

Las concentraciones de solventes se incrementan durante la temporada de lluvias y puede ser un indicador de que la mayor parte de los solventes residuales se encuentran en la zona insaturada del acuífero y los cuales son lavados por la recarga del acuífero debido a la lluvia. El carbón orgánico es altamente variable, sin embargo, alcanza valores superiores a los 40 mg/litro y los solventes clorinados se encuentran ampliamente distribuidos contaminando los pozos en la zona industrial.

Del mismo modo, Marín et al (2000) menciona que en 12 pozos seleccionados al sur de Mérida, de los cuales 2 son de JAPAY (pozos 36 y 58) y 2 más corresponden a compañías embotelladoras (pozos 23 y 24), 4 más de la extinta empresa cervecera y otros más ubicados en varias industrias, presentan concentraciones significativas de metales como Arsénico, Cadmio, Plomo y Cromo, como se observa en la Tabla VII.6).

Tabla VII.6).- Concentraciones de elementos potencialmente peligrosas de algunos pozos localizados al sureste de Mérida.

	Plomo		Cromo		Cadmio		Hierro		Arsénico	
Pozo #	**Dic-91**	**Mar-92**	**Dic-91**	**Mar-92**	**Dic-91**	**Mar-92**	**Dic-91**	**Mar-92**	**Dic-91**	**Mar-92**
61	0.51		0.37		0.04		nd		12.80	
18	0.34	0.21	0.19	0.20	0.01	0.04	3.26	2.88	0.67	6.75
15	0.26	0.16	0.09	0.26	nd	0.02	0.69	0.55	2.36	1.68
23	0.34	0.30	0.26	0.11	0.02	0.03	4.24	3.02	1.68	2.03
24	0.26	0.10	0.19	0.24	0.01	0.03	0.98	0.78	9.12	11.40
1	0.34	0.10	0.10	0.11	0.01	0.02	0.88	0.65	1.01	1.35
4	0.34	0.26	0.01	0.10	0.03	0.05	1.03	0.92	2.70	2.30
7	0.34	0.10	0.10	0.11	0.03	0.05	3.02	2.99	1.35	1.67
11		0.51		0.10		0.02		0.89	nd	
36	0.42	0.20	0.19	0.20	0.01	0.10	3.57	2.99	2.36	1.66
58		0.10		0.18		0.06		3.00		4.00

Los resultados muestran que todos los pozos contenían plomo, cromo (excepto el pozo 4) y cadmio por encima de 0.05 mg/litro, que es el valor máximo permisible de acuerdo con las normas emitidas por el sector salud. En al menos 2 casos las concentraciones de plomo superaron valores de 1 mg/l, el cual es 100 veces más que el valor máximo permisible para el consumo humano. Los valores de cromo superaron 2 a 7 veces el límite permisible, así como el cadmio supero por arriba de 10 veces la norma. Las concentraciones de arsénico por su lado siempre se presentaron por debajo de los límites permisibles de 50 microgramos/litro. Todos estos metales en el acuífero representan un problema de salud y no se conoce ninguna fuente natural de estos elementos en Yucatán. De igual forma, Castillo et al (1995), también reportó en las aguas subterráneas de la Ciudad de Mérida en la zona industrial concentraciones de cadmio (17.6 microgramos/litro), plomo (87.5 microgramos/litro), y zinc (6,690 microgramos/litro).

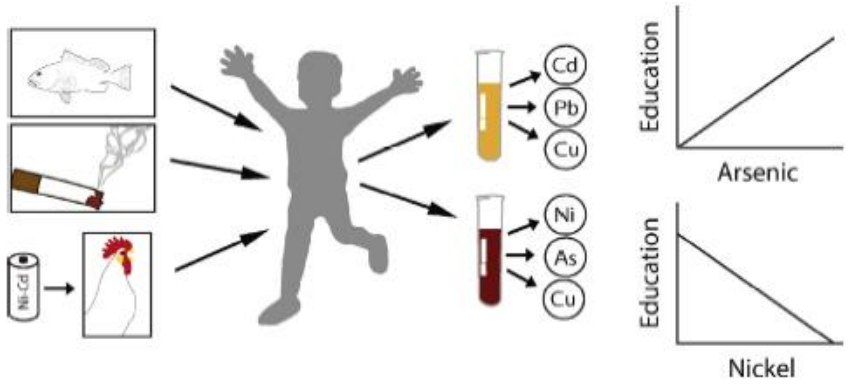
Los trabajos de Arcega-Cabrera et al, 2017, en la zona metropolitana (Mérida y Progreso), mostraron la correlación que existe entre las concentraciones de metales, como arsénico, cromo, y mercurio y las concentraciones en el agua para beber y cocinar y en la sangre y orina de más de 100 niños en condiciones de pobreza y no pobres o de clase media.

El mercurio se observó en concentraciones que rebasan los valores recomendandos por la Organización Mundial de la Salud para agua de consumo humano, tanto para beber como para cocinar, así como en la orina y en la sangre, más del 25 % de los niños presentaron mercurio en las muestras de orina con valores por encima de lo recomendado por la OMS. Si bien el mecurio puede tener un proceso de desintoxicación por medio de la orina, el caso del arsénico muestra una exposición crónica.

Arcega-Cabrera y Lane F. Fargher (2016), mencionan que las familias están expuestas a estos peligrosos metales y resultan en niveles detectables en sangre y orina en niños. Sin embargo, la naturaleza de la exposición y su distribución espacial se correlaciona con los niveles de ingresos económicos de las familias y de sus practicas socioculturales. Aquellas que se encuentran en condiciones de pobreza tienden a cocinar con leña, utilizan agua de pozo y tienen animales de traspatio para el consumo doméstico. Al parecer, todas estas actividades generan exposición a los miembros de la familia, incluyendo a los niños, a ciertas formas de cobre, plomo y niquel. Mientras que, aquellas familias que no se encuentran en condiciones de pobreza, incluyendo sus niños, están más expuestos al cadmio, arsénico y a cobre inorgánico (más parecido al sulfato de cobre). Todos estos metales y el arsénico se encuentran en diversos productos que estas

familias consumen, incluyendo cigarros, pescado fresco comprado en supermercado y carnes blancas (como pollo y huevo) engordados con alimento balanceado.

Figura VII.15).- Incidencia de metales pesados en niños según estrato económico.



En la industria maquiladora de textiles, por lo regular se utilizan colorantes para el teñido de la tela. Para el tipo poliéster se utilizan colorantes azoicos, los cuales forman parte de una familia de sustancias químicas orgánicas caracterizadas por la presencia de un grupo peculiar que contiene nitrógeno unido a anillos aromáticos. Los colorantes azoicos constituyen el grupo más extenso de todos los colorantes orgánicos disponibles en el mercado. La estructura química de este tipo de colorantes se caracteriza por la presencia del grupo azo –N=N como cromóforo, asociados a grupos auxocromo de tipo amino o hidroxilo.

La fabricación de los colorantes azo tiene lugar mediante la diazotación de una arilamina primaria, obteniéndose la sal de diazonio. Para la diazotación, se emplea ácido nitroso, que se obtiene por disolución de nitrito sódico en agua y posterior adición de ácido clorhídrico. Esta se hace reaccionar con una amina aromática o un compuesto alcohólico, con objeto de formar el colorante. Esta reacción denominada de “acoplamiento” o “copulación”, se realiza en medio ácido en el caso de las aminas y en medio básico en el caso de alcoholes.

El grupo azo característico de los colorantes azoicos, es susceptible de reducirse, dando lugar a la formación de aminas aromáticas. Algunas de estas arilaminas aromáticas, tienen un potencial cancerígeno demostrable. En el caso de producirse la penetración de estos colorantes en nuestro organismo, supongamos a través de la saliva o el sudor humano, la reducción a aminas aromáticas puede tener lugar en el interior de este (en la microflora intestinal y en las enzimas hepáticas) por acción de algunos de nuestros enzimas. De este modo se podría afirmar que aquellos colorantes azo utilizados en la tintura de artículos textiles que contienen en su estructura una amina cancerígena, susceptible de ser liberada, poseen por sí mismos un potencial cancerígeno. En este punto es importante realizar más estudios específicos sobre este tipo de residuos industriales.

Es importante mencionar que algunos de los pozos que están surtiendo agua para consumo humano están captando estos contaminantes de manera regular (como en el poblado de Baca) y esto debe ser tomado en cuenta en materia de saneamiento ya que el agua subterránea es la única fuente de agua que tiene la población en general para cubrir las necesidades del vital liquido.

VII.4).- Contaminación derivada del proceso de Nixtamalización del maíz

Por otra parte, en la Ciudad de Mérida y su Zona Conurbada, como en el Estado y el resto del país, la industria de la nixtamalización es una de las más importantes, ya que las tortillas constituyen un alimento básico. El proceso conocido como "nixtamalización" consiste en someter al grano de 15 min a 1 hora, a un cocimiento con agua e hidróxido de calcio; dejarlo reposar a temperatura ambiente durante 8 - 19 horas y posteriormente lavarlo con grandes cantidades de agua, obteniéndose el grano de maíz blando y sin cascarilla conocido como "nixtamal" y las aguas residuales como "nejayote", las cuales se encuentran en una proporción, en peso, de 3 a 5 partes de agua por 1 parte de maíz. Por lo que por cada tonelada de maíz nixtamalizado se producen al menos 3 toneladas de nejayote con un pH muy alcalino (10-12). A las aguas residuales generadas durante la nixtamalización se les ha concedido poca importancia ya que son consideradas aguas de desecho y generalmente son arrojadas al drenaje o directamente al entorno, contribuyendo así al problema de contaminación ambiental, ya que poseen una demanda bioquímica de oxígeno del orden de 2700 mg O2/l (Rivera, 1994, citado por DAICOS, SA de CV, 2011). Esta cantidad de aguas residuales que no reciben el tratamiento adecuado coloca a la industria del maíz nixtamalizado para consumo humano dentro de las cinco principales fuentes de contaminantes líquidos que se producen en México. Otro tipo de aguas residuales, que no representan un gran porcentaje en volumen, pero son representativas por el alto grado de contaminantes, son las que contienen sustancias altamente alcalinas y grasas, como las generadas por las industrias hotelera, restaurantera, de elaboración de alimentos, procesamiento de carnes y de los baños portátiles.

Ante la problemática de salud y contaminación ambiental que se generó por la falta de un tratamiento adecuado de las aguas residuales mencionadas, el Ayuntamiento construyó hace mas de 10 años un sistema de lagunas de oxidación, para recibir estas aguas y lodos recolectadas por empresas particulares, a través de pipas. Actualmente las lagunas de oxidación ubicadas al costado norponiente del Anillo Periférico junto al exbasurero y el CRIT Mérida, funcionan como un decantador artificial que no cumple con las normas en materia de salud, por no contar con los tiempos de retención y degradación adecuados; por lo que, como sistema de tratamiento de aguas residuales ha dejado de ser efectivo y se ha convertido en un grave foco de infección, además de generar contaminación por dispersión y malos olores que afectan a los ciudadanos que viven por la zona poniente de la ciudad.

Desafortunadamente estas instalaciones solamente funcionan como lagunas de evaporación y por lo general a la fecha de este estudio se encontraban azolvadas debido a los residuos sólidos, de tal manera que durante períodos de altas precipitaciones rebozaban y era común que se formaran encharcamientos en los alrededores que contenían desechos contaminados. No se encontró ninguna referencia sobre el destino que se daría a estos lodos secos, tampoco se evidenció durante el tiempo del estudio que hubiera existido un manejo coordinado de estos sólidos, sin embargo se observó la presencia de montículos de sólidos cubiertos de vegetación.

En Febrero de 2008, la Facultad de Ingeniería de la UADY observaron en el área de estudio la existencia de 4 lagunas de oxidación adicionales, las que aparentemente tienen una capacidad similar a las anteriores y sus efluentes también descargan directamente al terreno aledaño, con lo que contribuyen a que el pantano y los dos cuerpos de agua

superficiales (en los que habita una gran variedad de fauna, principalmente aves) se mantengan.

Los parámetros que se analizaron en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UADY (2008) para las aguas de la laguna fueron, metales: manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), mercurio (Hg), arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr), físicoquímicos: sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), cloro (Cl), sulfatos (SO_4), bicarbonatos (HCO_3), carbonatos (CO_3), sólidos disueltos (SD), sanitarios: nitratos (NO_3), nitrógeno Kjeldhal total (NKT), amonio (NH_4), nitritos (NO_2), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), así como el de coliformes fecales **(Tabla VII.7 y VII.8)**.

Entre otras conclusiones se puede resaltar que las concentraciones encontradas de coliformes, tanto totales como fecales, hacen ver que las lagunas de oxidación no contribuyen a la eliminación de estos patógenos por lo que, con base en estos resultados, es recomendable que se estudie nuevas formas de tratamiento para este tipo de residuos que son vertidos en las denominadas lagunas de oxidación.

Los parámetros de calidad del agua determinados tanto para los efluentes de las lagunas de oxidación así como para las aguas superficiales de la laguna adyacente a la misma, presentaron condiciones que sobrepasan la norma NOM-001-ECOL-1996, por lo que estas aguas tienen características de agua residual, lo que constituye un riesgo para el manto acuífero, por lo que es importante realizar monitoreo periódico a las lagunas artificiales adyacentes a plantas de tratamiento de aguas y lodos residuales así como de vertederos de basura.

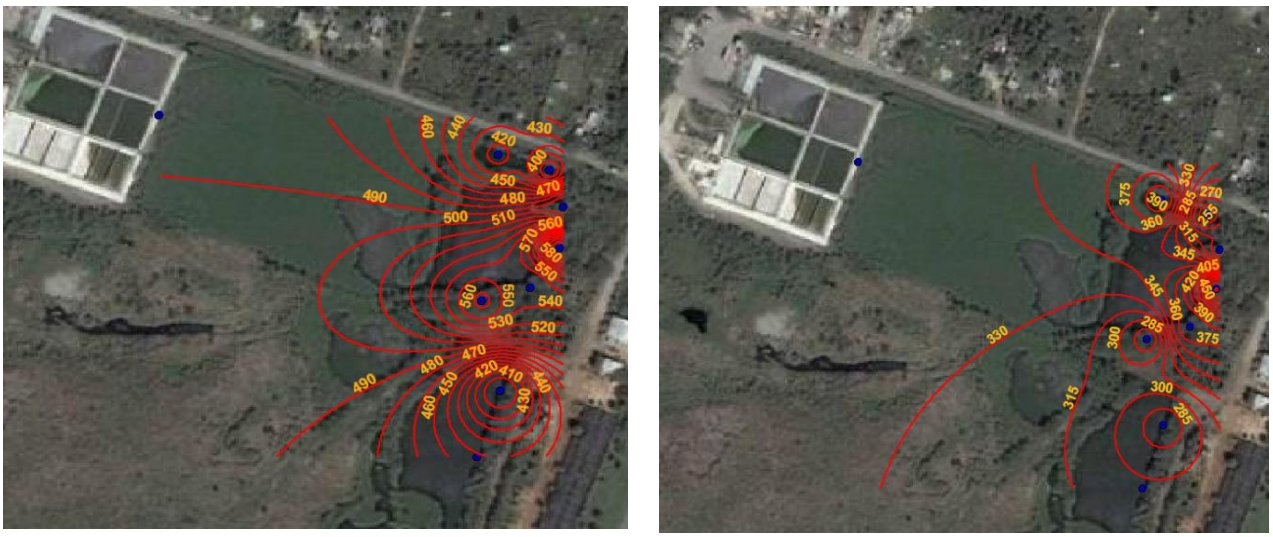
La concentración de carbón orgánico medido en la laguna muestra valores entre 296.00 y 406.60 mg/L, con un valor promedio de 335.51 mg/L. Este parámetro permite corroborar la aún elevada presencia de materia orgánica susceptible de oxidación como contenido de las aguas superficiales. Este parámetro tampoco se encuentra registrada en la NOM-001-ECOL-1996, pero si se encuentra en Normas de países industrializados **(Figura VII.16)**.

Figura VII.16).- Isoconcentraciones para el carbón orgánico total (mg/L).

Las concentraciones de la demanda química oxígeno (DQO) total encontrada en la laguna aledaña a las lagunas de oxidación varían en valores de 392 a 630 mg/L, con un valor promedio de este parámetro de 470 mg/L. La componente soluble de materia orgánica que contribuye a que se de esta demanda en oxígeno registra valores de DQO que varía de 245 a 496 mg/L y una concentración promedio de 239 mg/L. Si bien este parámetro no forma parte de los valores límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, descritos en la NOM-OO1-ECOL-1996, sin embargo es uno de los

parámetros empleados en otros países para referirse a la contaminación. Por lo que comparándolas con ellas estos valores sobrepasan los límites permisibles para descargas directas.

Figura VII.17).- Isoconcentraciones para la DQO total y soluble (mg/L).



DQO Total DQO Soluble

La variación de concentración observada en la DBO_5 se presentó entre los 67.69 y los 176.27 mg/L (Tabla 9), con una concentración promedio de 103.87 mg/L. Estos valores se encuentran todavía por encima de los valores permisibles para descarga de aguas domiciliarias, como se especifica en la NOM-OO1-ECOL-1996. Es también importante mencionar que existen valores de DBO en la laguna que están por arriba de las concentraciones que emanan de las lagunas de oxidación, lo cual implica que existen otras contribuciones a esta laguna. De ahí que existen probablemente aportaciones por lixiviación proveniente del ex basurero.

Figura VII.18).- Isoconcentraciones para la DBO_5 (mg/L).

La cantidad de coliformes totales presentes en las aguas de la laguna variaron entre $1.8*10^5$ NMP/100 mL hasta $5.0*10^6$ NMP/100 mL, con un valor promedio de $1.12*10^5$ NMP/100 mL, presentándose la mayor concentración en el efluente de las lagunas de oxidación y mostrando una distribución prácticamente igual en el resto de la laguna del orden de 10^5 NMP/100 mL.

Estas altas concentraciones sobrepasan los límites permisibles de coliformes para descargas de aguas residuales por lo que representan un alto riesgo de contaminación para las aguas subterráneas.

La cantidad de coliformes fecales detectadas en la laguna variaron entre $2*10^4$ NMP/100 mL hasta $1*10^6$ NMP/100 mL, con un valor promedio de $2.69*10^5$ NMP/100mL. En el caso de los coliformes fecales se da una mayor variación que en el caso de los coliformes totales pero el orden de presencia se sitúa en 10^5 NMP/100 mL; de donde las concentraciones encontradas sobrepasan los límites permisibles por las normas mexicanas, de ahí que representan un alto riesgo de contaminación para las aguas subterráneas, por lo que sería importante tomar en consideración el saneamiento del área de la laguna.

Se puede resaltar que las concentraciones encontradas de coliformes tanto totales como fecales hacen ver que las lagunas de oxidación no contribuyen a la eliminación de estos patógenos por lo que con base en estos resultados es recomendable que se estudie nuevas formas de tratamiento para este tipo de residuos que son vertidos en las denominadas lagunas de oxidación.

Los parámetros de calidad del agua determinados tanto para los efluentes de las lagunas de oxidación así como para las aguas superficiales de la laguna adyacente a la misma, presentaron condiciones que sobrepasan la norma NOM-001-ECOL-1996, por lo que estas aguas tienen características de agua residual, lo que constituye un riesgo para el manto acuífero, por lo que es importante realizar monitoreo periódico a las lagunas artificiales adyacentes a plantas de tratamiento de aguas y lodos residuales así como de vertederos de basura.

En cuanto a metales pesados el plomo, el mercurio y el hierro presentaron valores que sobrepasan la NOM-127-SSA1-1994 lo cual indica que la infiltración de esta agua representa un riesgo ambiental. El plomo, el mercurio y el hierro encontrados en las aguas superficiales de la laguna provienen también de los depósitos de basura, ya que las concentraciones registradas en la laguna son mucho mayores a la de los efluentes de la laguna de oxidación.

Tabla VII.7).- Datos fisicoquímicos, sanitarios y biológicos para las aguas de la laguna derivada de las aguas de nixtamal.

Muestra	Nitrógeno Kjendhal mg/L	Nitrógeno amoniacal mg/L	Nitrógeno orgánico mg/L	NO_2^- mg/L	NO_3^- mg/L	DQO soluble mg/L	DQO total mg/L	DBO 5 días mg/L	PO_4^{3-} mg/L	Na^+ mg/L	K^+ mg/L
ME1	31.92	21.84	10.08	6.04	0.04	402.00	417.00	67.69	0,01	80.86	4.90
ME2	42.00	22.68	19.32	4.32	0.02	245.00	392.00	76.88	0.01	82.98	6.28
ME3	50.96	20.44	30.52	6.97	0.56	275.00	496.00	88.55	0.01	89.84	8.98
ME4	44.80	22.96	21.84	7.39	0.02	496.00	630.00	98.25	0.01	87.16	5.22
ME5	45.58	18.76	26.82	6.82	0.07	385.00	541.00	135.79	0.01	88.17	4.14
ME6	35.50	18.48	17.02	3.98	0.13	276.00	562.00	176.27	0.01	88.90	4.20
ME7	87.36	76.16	11.20	11.51	0.10	278.00	401.00	108.33	0.02	147.05	61.9
ME8	66.08	49.00	17.08	8.09	0.11	369.00	392.00	76.60	0.02	103.80	24.3
EF-Lag	88.70	72.80	15.90	5.02	0.25	325.00	401.00	106.46	0.02	141.97	53.2

Muestra	Carbón orgánico mg/L	Sólidos totales mg/L	Sólidos fijos mg/L	Sólidos volátiles mg/L	Col. totales NMP/	Col. fecales NMP/	SO_4^{2-} mg/L	Cl^- mg/L	HCO^3 mg/L	Ca^{2+} mg/L	Mn^{2+} mg/L
ME1	374.20	2745	2206	539	1.9*10	$6.0*10^4$	142.00	810.95	1164	135.24	86.7
ME2	313.20	2830	2185	645	4.1*10	$1.0*10^5$	133.00	848.67	1125	119.28	95.9
ME3	334.30	2975	2620	355	1.8*10	$2.0*10^4$	148.00	839.24	1081	114.40	99.4
ME4	313.70	2807	2187	620	2.7*10	$8.0*10^4$	120.00	810.95	1152	123.20	100.
ME5	311.70	2829	2124	705	3.5*10	$4.0*10^4$	128.00	848.67	1108	107.36	106.
ME6	314.40	2660	2096	564	4.3*10	$2.8*10^5$	147.00	858.10	1081	109.12	99.9
ME7	296.00	2308	1864	444	2.3*10	$1.2*10^5$	195.00	669.51	1443	165.44	93.0
ME8	406.60	2449	1970	479	3.0*10	$1.0*10^6$	126.00	754.38	1238	146.08	89.8
EF-Lag	356.40	2511	2052	459	5.0*10	$7.2*10^5$	178.00	678.94	1677	235.84	92.4

Tabla VII.8).- Datos de metales traza en la laguna adyacente a las lagunas de oxidación. Fracción (peso/volumen) = (masa analito)/(Volumen de muestra de agua)

Mn mg/L	*Ni mg/L*	*Zn mg/L*	*Pb µg/L*	*Cd mg/L*	*Cr mg/L*	*Cu mg/L*	*Fe mg/L*	*Hg µg/L*	*As µg/L*
0.04	*0.14*	*0.44*	*6.90*	*N.D.*	*N.D.*	*N.D.*	*0.86*	*3.38*	*1.28*
0.06	*0.20*	*0.91*	*3.03*	*N.D.*	*N.D.*	*N.D.*	*0.92*	*1.34*	*1.31*
0.04	*0.12*	*0.82*	*2.59*	*N.D.*	*N.D.*	*N.D.*	*0.95*	*1.42*	*1.75*
0.05	*0.20*	*0.58*	*2.26*	*N.D.*	*N.D.*	*N.D.*	*0.82*	*1.98*	*1.38*
0.05	*0.14*	*0.64*	*198.40*	*N.D.*	*N.D.*	*N.D.*	*0.94*	*2.98*	*1.82*
0.04	*0.12*	*0.66*	*6.67*	*N.D.*	*N.D.*	*N.D.*	*0.58*	*5.12*	*1.70*
0.04	*0.06*	*0.94*	*141.06*	*N.D.*	*N.D.*	*N.D.*	*1.19*	*2.92*	*1.96*
0.04	*0.06*	*0.69*	*53.33*	*N.D.*	*N.D.*	*N.D.*	*1.07*	*2.80*	*1.41*
0.09	*0.19*	*0.46*	*34.02*	*N.D.*	*N.D.*	*N.D.*	*2.52*	*1.84*	*2.41*

N.D: = No detectado

En este sentido, y conforme a los resultados obtenidos en el censo correspondiente a las descargas de aguas residuales en las lagunas de oxidación, se obtuvieron los volúmenes diarios de acuerdo al tipo de agua residual, quedando de la siguiente manera:

a)	Fosas sépticas domésticas, mercados y comercios	516 m^3
b)	Águas de desecho de nixtamal	180 m^3
c)	Servicios públicos municipales	22 m^3
d)	Otros servicios (industriales de proceso)	30 m^3
Total		748 m^3

Si al total de entrada a las lagunas de oxidación le agregamos el volumen de las fosas que actualmente no se les ha dado mantenimiento o limpieza, nos dará un total de:

(748 + 230): 978 m^3

VII.5).- Contaminación derivada de la Actividad Porcícola y Avícola

Las granjas porcícolas y avícolas se ubican preferentemente en la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes, y producen subproductos como son las excretas que al ser dispuestos sin control alguno ocasionan perjuicios al ambiente, estos efectos se pueden clasificar en términos de la contaminación del aire, agua y suelo (Méndez Novelo, 2009).

• **Contaminación del aire.** Las emisiones de amoníaco, sulfuros de hidrógeno, metano y dióxido de carbono producen molestias por los olores desagradables, siendo además precursores de trastornos respiratorios en el hombre y animales, entre otros problemas como es la contribución de la destrucción de la capa de ozono por la producción de óxido nitroso N2O como parte de los gases emitidos durante la degradación microbiana.

• **Contaminación del suelo.** El vertido de un volumen de estiércol excesivo puede ocasionar la acumulación de nutrientes en el suelo y producir su alteración en pH, la infiltración al subsuelo de nitratos, contaminación microbiológica, entre otros. Otro problema relacionado es la acumulación de metales pesados en la capa superficial del suelo, particularmente por la presencia de sales de hierro y cobre.

• **Contaminación del agua.** La contaminación del agua superficial por las excretas se manifiesta por la presencia de amonio y sulfatos, entre otros. El exceso de nutrientes favorece el crecimiento de las algas desencadenando con ello el agotamiento del O2 disuelto, favoreciendo la proliferación de larvas de insectos nocivos, y en casos severos se provoca la eutroficación de los cuerpos de agua. Por su parte el amonio es tóxico para los peces y los invertebrados acuáticos. De igual forma, se produce la contaminación de mantos acuíferos por la actividad porcícola y avícola, debido a la presencia de sólidos suspendidos, coliformes y nitrógeno entre otros, sobre todo en suelo permeable que como ya se había mencionado es el caso del estado de Yucatán.

La actividad porcícola se ha vuelto en el estado de Yucatán una de las más importantes, por su magnitud e importancia, la porcicultura yucateca ocupa actualmente el quinto lugar a nivel nacional en producción y el primero en productividad, representando para el Estado la tercera actividad generadora de ingresos en el sector agropecuario para Yucatán, la cual genera 3,500 empleos rurales directos (UADY, 2009). Así, la actividad porcícola es una de las que generan mayor riqueza y empleo en el Estado, pero también problemas ambientales, debido a que produce grandes cantidades de desechos tanto sólidos como líquidos (Pacheco et al., 1997).

Se calcula que en Yucatán se generan 3,441,220 m^3 anuales de aguas residuales porcinas, de los cuales el 63% recibe parcialmente algún tratamiento, principalmente conformado por granjas grandes (aunque sus aguas no cumplen las normas para riego agrícola, debido a las altas concentraciones de nitrógeno) y 37% no recibe ningún tratamiento.

De este 37% que no recibe ningún tipo de tratamiento, el 90% lo conforman granjas pequeñas y medianas, las cuales vierten sus residuos directamente sobre el suelo y cavernas situadas en los alrededores de las granjas, por lo que al no tener los suelos ningún sistema de protección estos residuos pasan directamente al acuífero subterráneo, única fuente de abastecimiento, aportando un exceso de microorganismos patógenos que contaminan y provocan enfermedades gastrointestinales.

En el año 2007, según el INEGI se tenía una población de 793,702 cerdos, que generaron 83,052 toneladas de carne en canal por año, lo que representaba el 45% de la población ganadera y el 37% de la producción respectivamente. Para el año 2009, según un estudio realizado por la UADY, la población total de cerdos en el Estado disminuyó a 670,174 cerdos, distribuidos en aproximadamente 472 granjas, sin embargo, sólo 168 están registradas en la SAGARPA, con una piara de 61,692 vientres, 175,708 destetes y 290,672 cerdos de engorda, que generan diariamente 3,884 toneladas de excretas y 9,428 m^3/día de aguas residuales altamente contaminadas y una carga orgánica de 443,133.39 kg/d medida como DQO.

La rentabilidad de la actividad, y el crecimiento acelerado de los centros de población ha provocado que muchas granjas se encuentren en zonas urbanas. El 80% de las granjas porcícolas del Estado se ubican en el contorno del Área Metropolitana de la Ciudad de Mérida **(Figura VII.19),** abarcando a un total de 60 municipios, en ellos se concentra el 90% de la población porcina del Estado, ocasionando que esta área sea altamente vulnerable a la contaminación, debido a la escasa profundidad en que se encuentra el manto freático, por las características geohidrológicas del Estado y la presencia de la zona llamada “anillo de cenotes”.

De acuerdo con los resultados del estudio costo beneficio a nivel prefactibilidad del sistema de tratamiento de excretas porcinas en la zona noroeste del estado de Yucatán, efectuado en 2010 por la empresa Ingeniería, Obras y Servicios a la Industria SA de CV, área de mayor afectación por la producción porcícola, al estar concentradas en la región y por tener un bajo nivel del manto freático debido a su cercanía con la costa.

Esta zona como referencia lo conforman los siguientes municipios: Conkal, Muxupip, Tixpehual, Acanceh, Tixkokob, Motul, Kanasín, Seyé, Tahmek, Tekantó, Cacalchén, Hoctún y Hocabá, todos ellos dentro de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes. Estos municipios concentran aproximadamente el 25 % de la totalidad de los cerdos de Yucatán (INEGI 2007), con un total de 196 granjas porcícolas (35 grandes, 25 medianas y 136 pequeñas), y una población de 118,779 cerdos, generando diariamente un volumen de 631.53 toneladas de excreta y 3,309.81 metros cúbicos de agua residual contaminada.

Además de los efectos directos sobre los recursos naturales, también se asocian los efectos indirectos socioeconómicos y políticos (enfermedades, pérdidas de lugares de recreo y turísticos, agua contaminada en cenotes) que son difíciles de cuantificar. Considerando que, en el 2010, según reportes del CONAPO, se tiene una población 177,158 personas en la zona de estudio, lo cual nos indica que la contaminación provocada por la población porcícola es 25 veces mayor que la contaminación que generan los habitantes de dicha zona.

El municipio que genera mayores cantidades de desperdicio en granjas es Conkal con un total de 127,575 Kg de excreta y 661,678 Lts de líquido de manera diaria y el de menor grado Hoctún con 8,450 Kg de excreta y de líquido 44,355 Lts. En Acanceh, cercano a la zona de alta variabilidad hidrológica y cercana a la zona de captación de la JAPAY I, la generación de excretas diaria en el municipio es de 43,999 kg, el volumen de líquido es de 238,329 Lt.

Figura VII.19).- Distribución de granjas porcícolas en el Estado de Yucatán.

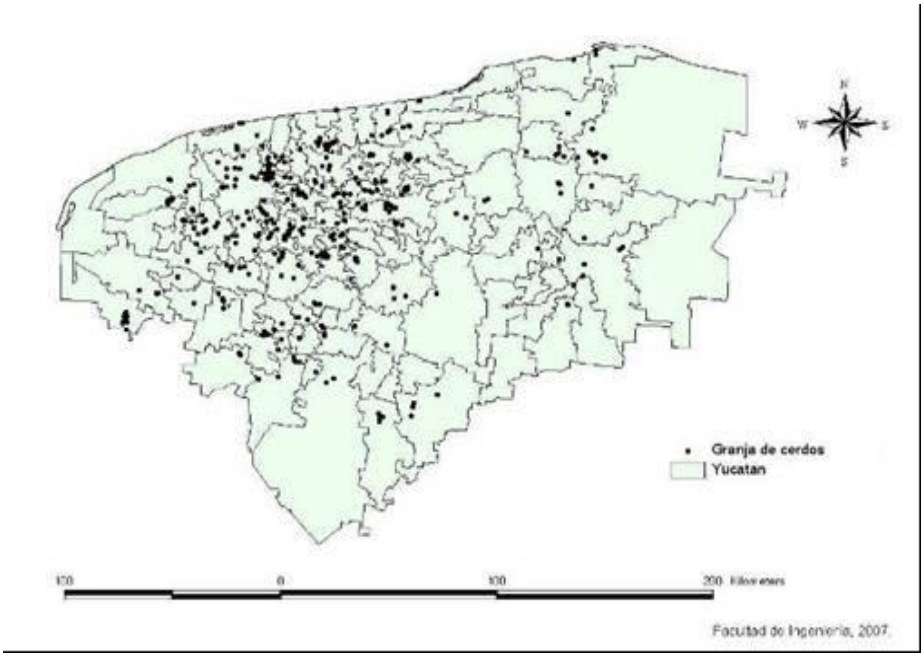


Tabla VII.9).- Concentrado porcícola de las granjas por municipio en la zona de estudio.

Municipio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	totales
Vientres:	185	1,981	1,178	132	125	70	41	276	923	896	90	467	753	7,117
Destetes:	356	6,226	1,271	597	493	183	104	600	1,406	2,118	250	1,158	1,640	16,402
Engorda:	7,398	17,482	7,928	3,515	1,147	6,135	6,087	4,880	2,383	9,184	6,223	13,955	8,677	94,994
Sementales:	18	69	22	14	10	9	7	18	36	28	1	18	16	266
Total:	7,957	25,758	10,399	4,258	1,775	6,397	6,239	5,774	4,748	12,226	6,564	15,598	11,086	118,779
INEGI 2007:	11,000	44,000	35,000	12,500	10,652	12,223	7,207	3,052	7,063	19,530	30,000	13,127	7,945	213,299
Diferencia:	3,043	18,242	24,601	8,242	8,877	5,826	968 -	2,722	2,315	7,304	23,436	-2,471	-3,141	94,520
Total excretas (Diarias en Kg)	43,999	127,575	59,012	21,936	8,450	35,400	34,705	31,192	25,401	63,996	36,145	84,783	58,938	631,532
Volumen Líquido (diario en Lts)	238,329	661,678	289,749	119,182	44,355	194,173	191,041	165,230	113,314	331,102	197,938	457,468	306,252	3,309,811
No. Cerdos	7,957	25,758	10,399	4,258	1,775	6,397	6,239	5,774	4,748	12,226	6,564	15,598	11,086	

Fuente: SEDUMA, 2009.

1 Acanceh 2 Conkal 3 Muxupip 4 Hocabá 5 Hoctún 6 Tekantó 7 Tahmek 8 Seyé 9 Motul 10 Tixkokob 11 Tixpehual 12 Cacalchén 13 Kanasín:

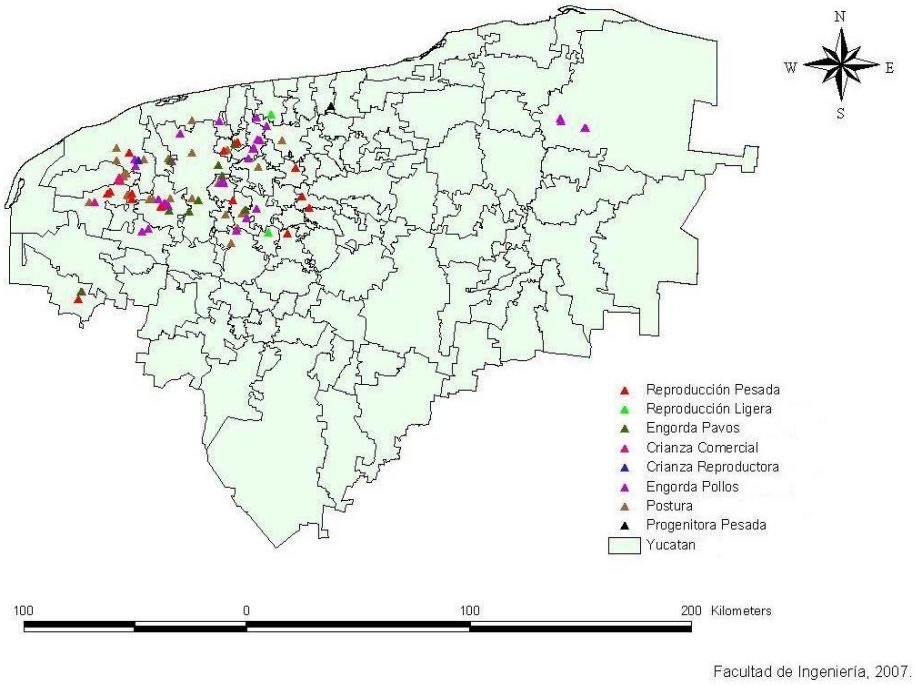
La descomposición del estiércol animal ocasiona consecuencias ambientales graves por la producción de gases como el metano y el óxido nitroso que, en la gran mayoría de las granjas no se recolecta, queda en libertad en la atmósfera, estos gases se liberan a través de la fermentación del estiércol animal, así como la nitrificación y desnitrificación, este último como el proceso asociado con la volatilización de nitrógeno, además que se producen olores desagradables y la contaminación de los recursos del suelo y agua.

Las aguas residuales de desechos porcinos (purines) contienen una serie de elementos que le confieren un gran valor como fertilizante si se aplica adecuadamente al suelo (N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Zn, Fe y Mn, entre otros), pero que si no se manejan adecuadamente, pueden impactar negativamente al medio ambiente, especialmente al acuífero. De acuerdo con Coma y Bonet (2004), un m3 de purines contiene: 7.6 kg de nitrógeno total; 6.5 kg de fosfatos (P2O5); 7.2 kg de potasio (K2O); 47 kg de DQO; 25 kg de DBO5, etc. Por lo que, si no se dispone adecuadamente de él, en vez de elementos fertilizantes, se tienen elementos contaminantes.

Con relación a las granjas avícolas, los desechos orgánicos que generan son de naturaleza sólida (Méndez Novelo, 2009), por lo que comúnmente son manejados de forma aséptica por los propios granjeros, de acuerdo con sus programas de bioseguridad. Los desechos son la gallinaza o pollinaza, los animales muertos o los huevos que no eclosionan y son eliminados; desechos todos que poseen altas concentraciones de materia orgánica por lo que pueden utilizarse para la producción de alimento para cerdos, o bien compostearlo y utilizarlo como abono o mejorador de suelos.

Los Municipios con mayor producción de desechos avícolas son Conkal, con 2,539 kg/km^2, Tekanto con 1,548 kg/km^2, Abalá con 1,471 kg/km^2 y Muxupip con 1,119 kg/km^2

Figura VII.20).- Distribución de granjas avícolas en el Estado de Yucatán, según función zootecnica.



Si los desechos sólidos son depositados directamente al suelo, se produce una alta contaminación orgánica tanto al suelo como al acuífero. La producción de gallinaza, y su descomposición amoniacal puede acumularse a tal grado en el suelo que en vez de ser un abono, mata cualquier forma de vida vegetal. Además percolará a través del suelo cuando sea expuesto al agua y se filtrará a las capas de agua subterránea, donde el nitrógeno se oxidará y permanecerá en forma de nitratos.

Los desechos líquidos en granjas avícolas sólo se generan al finalizar un ciclo productivo, cuando las naves son limpiadas y desinfectadas. Esto ocurre generalmente luego de 7 u 8 semanas para granjas de engorda y de 12 a 14 meses aproximadamente para granjas de postura. El volumen de aguas generadas en estas operaciones de limpieza se debe tratar de minimizar, así como su concentración orgánica.

Tabla VII.10).- Características de las diferentes granjas avícolas del Estado de Yucatán.

Función zootécnica	Población	
	Pavos	Pollos
Granjas registradas en SAGARPA		
Engorda	152,200	10;421,430
Postura	---	4;844,324
Reproducción pesada	---	853,456
Reproducción ligera	---	55,482
Crianza reproducción	---	190,555
Crianza comercial	---	892,700
Progenitora pesada	---	17,500
Total	**152,200**	**17;275,447**
Granjas no registradas en SAGARPA		
Engorda	85,613	5;862,054
Postura	---	2;724,932
Reproducción pesada	---	480,069
Reproducción ligera	---	31,209
Crianza reproducción	---	107,187
Crianza comercial	---	502,144
Progenitora pesada	---	9,844
Total	**85,613**	**9;917,439**
Total de granjas		
Engorda	237,813	16;283,484
Postura	---	7;569,256
Reproducción pesada	---	1;333,525
Reproducción ligera	---	86,691
Crianza reproducción	---	297,742
Crianza comercial	---	1;394,844
Progenitora pesada	---	27,344
Total	**237,813**	**26;992,886**

Por otro lado, en las unidades habitacionales de las áreas rurales se desarrolla una intensa actividad pecuaria en el traspatio del hogar, lo que también representa una fuente puntual de contaminación fecal en las áreas urbanas. Los trabajos de Gutiérrez-Ruiz et al (2012) indican que, en Yucatán, de 60 al 85% de las familias practican la ganadería de traspatio. En algunas comunidades alejadas de la capital del Estado, los porcentajes están por arriba del 80%, por ejemplo, Sucilá, mientras que comunidades cercanas a la capital presentan porcentajes más bajos, como Texan, Tzacala y Noc Ac con 78.4%. Algunos estudios señalan que hasta el 83% de las viviendas en algunas comunidades rurales crían aves.

En un estudio sobre prevalencia de enfermedades, Gutiérrez-Ruiz et al (2012) obtuvieron datos mediante la aplicación de 217 encuestas semi-estructuradas enfocadas a obtener información sobre las características del alojamiento, manejo alimenticio y sanitario de los animales criados en el traspatio de viviendas de 33 comunidades rurales del estado de Yucatán. El Estado se dividió de acuerdo a las cuatro zonas de riego que son: centro, oriente, sureste y sur. Se realizo un muestreo proporcional según el numero de comunidades existentes en cada zona y se incluyeron 14 comunidades de la zona centro, 6 de la oriente, 7 de la sur y 6 de la sureste. Un segundo estudio fue realizado en la comunidad de Molas, localizada a 16 km al sur de la ciudad de Mérida, en el cual se encuestaron 150 casas con el mismo objetivo.

Los autores muestran que la cría de animales de traspatio es una actividad desempeñada principalmente por las mujeres, ya que del 57% a 88% de las veces esta fue su responsabilidad exclusiva, en 4% fue compartida con sus hijos, en 2.8% fue compartida por toda la familia y sólo en 1.8% fue realizada por los hombres exclusivamente. Se observa una tendencia menor en comunidades que se encuentran cerca de la ciudad capital del Estado, lo que influye también en el ingreso económico de la familia y el hecho de que en comunidades más alejadas a los centros urbanos la mujer todavía desempeña la mayor parte de su trabajo en su casa. El tiempo dedicado a esta actividad es en promedio de 0.4 + 0.53 horas a la atención de los animales.

La cría de animales es una práctica común y arraigada, en 192 de 210 (88.5%) de las viviendas se han criado animales siempre, mientras que en 17 (7.8%) era la primera vez y en 8 (3.7%) se práctica de manera ocasional.

Las especies existentes además de pollos fueron los pavos con 71.4% (150/210), los cerdos con 39.5% (83/210), los equinos y ovinos (1.8% de las viviendas) y en menor grado los bovinos con 0.9%.

Tabla VII.11).- Especies mantenidas en los traspatios (n=159) de una comunidad rural del estado de Yucatán, México.

Especie	**Frecuencia**	**Promedio**	**Rango**
Gallinas	47.2	6.9	1-73
Pavos	26.4	6.5	1-25
Patos	8.8	3.8	1-9
Bovinos	9.4	2.7	1-10
Porcinos	6.9	6	1-33
Equinos	6.9	1.25	1-2
Ovinos	2.5	3	1-6

El 88.9% de las casas contaba con gallinero y de estos el 61.6% se encontraba en condiciones regulares, el 24.9% estaba en condiciones buenas y en el 13.5% las condiciones fueron malas.

El uso de estas instalaciones no es del 100% del tiempo, ya que el 87% de los entrevistados respondieron que por lo menos en algún momento del día las aves tenían acceso al exterior, mientras que en muchos casos los gallineros permanecen abiertos todo el tiempo y las aves entran y salen a su preferencia.

Se reporta que los gallineros son higienizados cada 53.6 días +/- 87.81 con un rango de 0 a 365 días.

Los materiales más comunes empleados para la construcción de los gallineros incluyen láminas de cartón (59.6%), huano (23.3%), lámina de zinc (13.0%).

Los principales materiales utilizados para la construcción de las paredes de los gallineros fueron: malla de alambre (28.5%), palos (27.5%), piedras (6.7%), mientras que el resto tenía una mezcla de materiales diversos. El piso de los gallineros fue predominantemente de tierra (94.3%), otros materiales del piso incluyeron cemento, palos y malla de alambre.

Figura VII.21).- Tipos de instalaciones para aves encontrados en el traspatio de comunidades rurales del estado de Yucatán.

En las 33 comunidades del estado de Yucatán, se tiene, con respecto a corrales para cerdos, que en el 43.7% (36) de las viviendas que criaban cerdos, existían corrales, con el 52% de estas en condiciones regulares, 36.8% en condiciones buenas y en 10.5% fueron malas. Veinte de las 36 instalaciones para cerdos no contaban con techo, de las 16 que si tenían techo, 11 fueron de lámina de cartón y 5 de “huano”.

De 47 viviendas que mantenían cerdos y no contaban con corraleta, el 70.0% mantenían a sus animales amarrados, 21.3% los tenían sin amarre y 8.5% los mantenían de ambas formas. De 83 viviendas que criaban cerdos en 86.8% los cerdos no se desamarraban nunca, en el 10.5% si los desamarraban y en el 2.6% los desamarran ocasionalmente.

Los corrales fueron limpiados con una frecuencia de 33.8 +/- 98.91 días con un rango de 0 a 365.

En la mayoría de las viviendas de las comunidades, se utilizaba algún tipo de recipiente para alimentar a los animales (77.8- 86.7%) mientras que en el resto el alimento se proporcionaba en el piso, todas las viviendas proporcionaban agua a sus animales en algún tipo de recipiente.

La mayoría de las aves, 87.0% (pollos y pavos), se mantienen libres en algún momento del día y de estos la mayor parte tienen acceso a la calle o predios adyacentes. En una comunidad cercana a la ciudad de Mérida solamente el 36.7% (22/60) de las gallinas y 33.3% (12/36) de los pavos tienen acceso a la calle de la comunidad y otros patios.

Se reporta que en 13.6% (11/83) de las viviendas, los cerdos tienen acceso a la calle u otras viviendas, mientras que en una comunidad cercana a Mérida, ningún cerdo tiene acceso a la calle u otros predios.

En el caso de las aves, en la mayoría de las comunidades estudiadas, el ingrediente principal de la alimentación es el maíz, el cual se proporciona junto con alguno de sus derivados como masa y tortilla, cerca de la mitad de los entrevistados proporcionaba

alimento comercial al menos ocasionalmente. La alimentación de las aves está basada en alimento comercial mezclado con sobras de la cocina, 68.8% (55/80) de las observaciones.

En comunidades cercanas a Mérida, existe una variación al respecto, probablemente al abandono de la costumbre de sembrar milpa o sembrar bajas extensiones, en estas comunidades, la alimentación de las aves exclusivamente con restos se observo en 17.5% (14/80) de las casas, el alimento comercial solo, se proporciona en 13.7% (11/80) de las viviendas.

Figura VII.22).- Alimentación de aves con derivados de maíz y *Leucaena leucocephala* en el sistema de traspatio de comunidades rurales del estado de Yucatán, México.

En el caso de los cerdos, el 20.0% de los entrevistados indico alimentar a sus animales exclusivamente con alimento comercial, aproximadamente el 40% proporcionaba maíz y sus derivados y un porcentaje bajo de 3.5% indico alimentar a los animales con sobras de cocina y hierba. En una comunidad cercana a Mérida, el 72.7% (8/11) de las encuestas indican que se proporciona exclusivamente alimento comercial a los cerdos y en 27.3% (3/11) se indica que se mezcla alimento comercial con sobras de cocina.

En cuanto al agua para las aves, el 82.0% proporciona agua potable a sus animales y el 18% agua de pozo, sin embargo, los recipientes utilizados rara vez se encontraban limpios. Para los cerdos, el 100% proporcionaba agua potable.

Las gallinas predominantes en los traspatios de comunidades rurales del estado de Yucatán son las cruzas, conocidas como criollas, encontrándose exclusivamente en 65.4% de las viviendas que crían esta aves, 32.7% de las casas mantienen tanto aves criollas como de línea comercial (engorda y/o postura), solamente 1.8% de las viviendas mantenía exclusivamente aves comerciales siendo estas de tipo engorda.

Con respecto a los pavos 5.5% se reportó criar aves de tipo comercial, siendo el resto criollos. Para los cerdos el 79.5% de las familias que criaban este tipo de animal, tenían animales cruzados (criollos), el 16.9% criaban de tipo comercial y 3.6% criaba ambos tipos de cerdo.

Figura VII.23).- Cerdos criollos criados en el sistema de traspatio en comunidades rurales del estado de Yucatán, México.

En 58.6% (89/152) de las viviendas se baña a los animales contra garrapatas, los productos utilizados son: Organofosforados 72.6% (37/51), Amitraz 15.7% (8/51), Cipermetrina 3.9% (2/51) y Carbamato con Diflubenzuron 3.9 % (2/51).

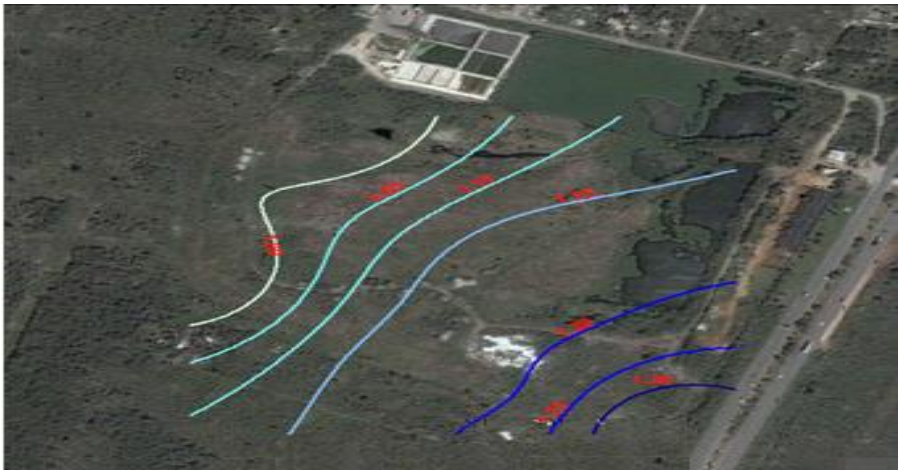
Con respecto al manejo del estiércol de los animales, la mayoría no realiza alguna actividad (75/120, 62.5%), mientras que 33.3% (40/120) lo usa como abono y otros lo desechan, sin especificar donde.

VII.6.- Contaminación derivada de los sitios de disposición a cielo abierto de residuos sólidos urbanos.

La contaminación derivada de sitios de disposición de residuos sólidos urbanos a cielo abierto en el Estado de Yucatán se evidenció a través del estudio que realizó la Facultad de Ingeniería de la UADY en el año 2008 sobre un vertedero a cielo abierto, que al inicio de la década de 1980 dispuso el Ayuntamiento de la ciudad de Mérida, en el cuál los desechos sólidos de la ciudad fueron depositados sin contar con ningún sistema de protección que evitara la lixiviación hacia el agua del subsuelo, propiciando que funcione como un generador puntual de contaminación al ambiente. En el sitio, igual que se realiza en los 106 municipios del Estado, se practicó la pepena y la quema, y los desechos sólidos eran dispuestos totalmente en forma anárquica. La zona del ex basurero se localiza en un terreno geológico de tipo cárstico, caracterizado por la presencia de cavernas y conductos de disolución. El acuífero subyacente presenta bajo gradiente hidráulico, alta permeabilidad y diferentes grados de evolución cárstica; por las características del subsuelo, los contaminantes que se generen en la superficie tienden a infiltrarse rápidamente y a contaminar el acuífero de la zona. Dentro del predio de 30 ha se localiza una zona de acumulamiento de basura (cerro de basura) y alrededor existen algunas lagunas de agua; en la parte noroeste se ubican las lagunas de oxidación donde se depositan los lodos provenientes de la limpieza de fosas sépticas y de las nixtamaleras. Como consecuencia de la descomposición de los desechos sólidos, se producen líquidos percolados o lixiviados y gases que después de atravesar las celdas de basura pasan a los suelos afectándolos de manera nociva (Trejo, 1996) o se dispersan en la atmósfera.

Los lixiviados son líquidos que se han percolado a través de los desechos sólidos y son altamente contaminantes. La infiltración del lixiviado al acuífero provoca el desarrollo de una pluma contaminante en el sentido del flujo de agua subterránea. El agua subterránea se mueve de sureste a noroeste con un gradiente de 8 mm/km (González *et al.*, 2004) y que esta pluma de contaminación se caracteriza por su elevado contenido de cloruros y sulfatos principalmente, que se encuentran por encima de la concentración de fondo del agua subterránea que fue de 19 mg/l de cloruro.

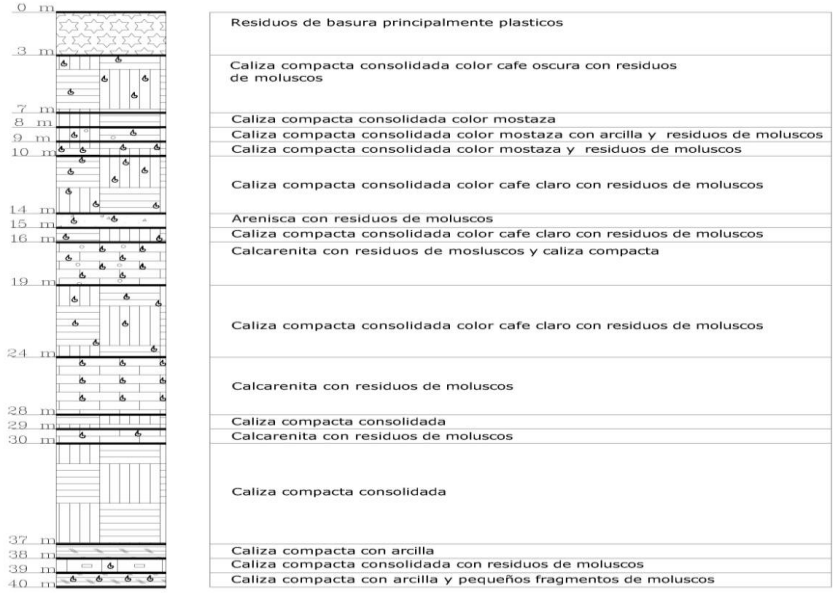
Figura VII.24).- Dirección del flujo subterráneo en la zona del sitio de disposición de basura en la ciudad de Mérida.



Los parámetros analizados en el laboratorio fueron: metales (hierro, zinc, cobre, mercurio, arsénico, cadmio, plomo, cromo), físicoquímicos (sodio, potasio, magnesio, calcio, cloruro, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, sólidos disueltos totales), sanitarios (nitratos, nitrógeno total Kjendhal, nitritos, nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico), demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y coliformes totales y fecales. En general, los pozos perforados presentaron casi las mismas características litológicas: calizas compactas, calcarenita con fragmentos de moluscos y roca caliza con textura porosa, en algunos casos se presentó secciones de caliza con arcilla; a excepción del pozo 2 donde se encontró 3 metros de basura en la parte superior, ninguno de los pozos perforados presentó caverna. Esto permite señalar que debido a la geología del terreno se puede presentar infiltración de los lixiviados generados por la basura acumulada en el terreno; ocasionando así contaminación al agua subterránea en esa área.

Figura VII.25).- Ubicación de los pozos de muestreo de agua.

Figura VII.26).- Corte litológico del Pozo 2 del ex basurero de Mérida, Yucatán.



Los registros de calidad de agua permitieron determinar que en el Pozo 1 y en el Pozo 2 toda la columna de agua es dulce y en la parte superior del acuífero se presentan condiciones reductoras (anaerobias). Se detectó un olor a ácido sulfhídrico en el Pozo 2, debido a la infiltración del agua superficial o de la precipitación. En el Pozo 3 la temperatura del agua es mayor que la del ambiente, toda la columna de agua es dulce y presentó condiciones reductoras, teniendo olor a ácido sulfhídrico; esto debido al lixiviado de la basura que se infiltra al subsuelo. La columna de agua del Pozo 4 es dulce y presenta condiciones reductoras debido a las condiciones anaerobias existentes; por lo que se presenta contaminación bacteriológica en el agua debido al lixiviado de la basura que se infiltra al subsuelo. En los Pozos 5 y 6 la columna de agua es dulce y presentan condiciones reductoras debido a las condiciones anaerobias existentes por los lixiviados de la basura.

Figura VII.27).- Perfiles de (A) temperatura (B) conductividad eléctrica y (C) oxígeno disuelto vs profundidad

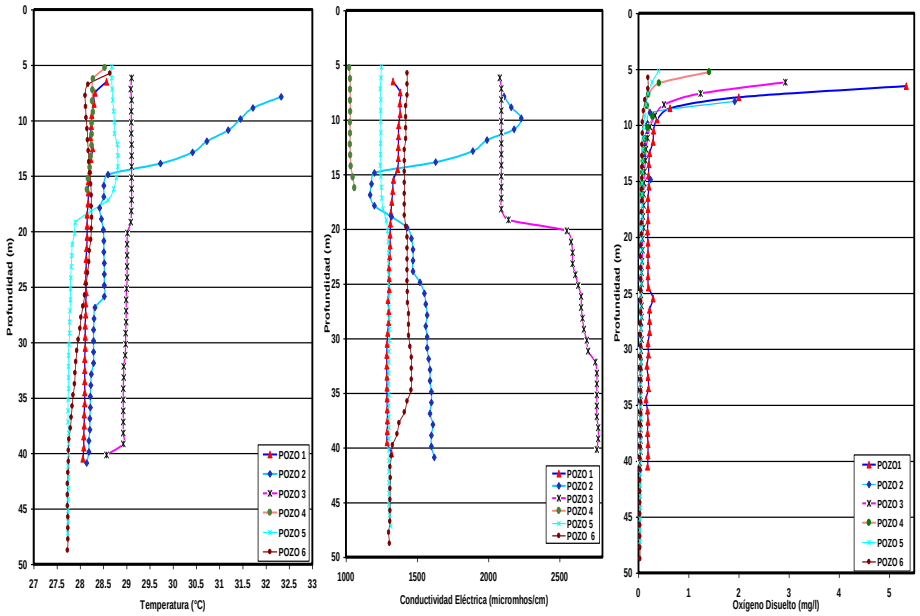
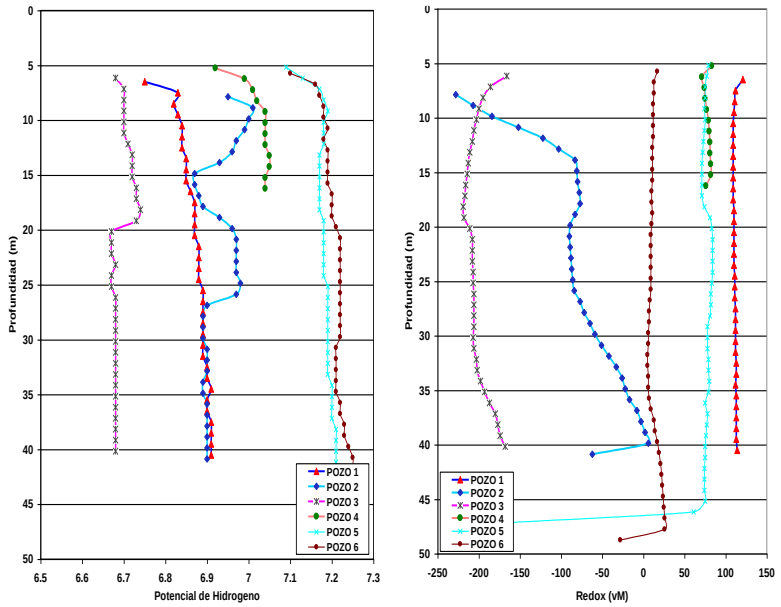


Figura VII.28).- Perfiles de (D) potencial de hidrógeno y (E) redox vs profundidad



Comparando el comportamiento de cada parámetro en los pozos, se observa que la conductividad eléctrica y la temperatura presentaron aumento de acuerdo a la dirección de flujo para disminuir al pasar por la zona de la basura; indicando así el efecto de la infiltración de los lixiviados generados por la basura que se encuentra acumulada en esa zona. El potencial redox presenta una disminución de sus valores en la dirección de flujo y después de pasar por la basura aumentan sus valores, lo que indica la existencia de condiciones reductoras en la zona de la basura. El potencial de hidrógeno no tiene mucha variación entre sus valores y el oxígeno disuelto presentó valores muy bajos en todos los pozos, indicando contaminación bacteriológica.

Tabla VII.12).- Resultado de los análisis de agua de los pozos del ex basurero de Mérida.

Pozo/Prof	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	HCO_3 (mg/L)	Cl (mg/L)	SO_4 (mg/L)	NO_3 (mg/L)	NKT (mg/L)	NH_4 (mg/L)	N. Org (mg/L)	NO_2 (mg/L)	Col. tot. NMP/100	Col. fec. NMP/100
POZO 1/	109.12	58.81	89.84	8.98	532.53	152.76	40.28	21.51	0.33	0	0.33	0.039	17	8
POZO 1/	93.28	65.22	87.16	5.22	549	152.76	31.25	19.33	0.56	0	0.56	0.017	17	8
POZO 1/	86.24	65.22	88.17	4.14	543.51	152.76	25.96	16.29	0.33	0	0.33	0	220	34
POZO 1/	93.28	66.29	88.9	4.2	549	152.76	24.44	17.9	0.56	0	0.56	0	220	34
POZO 2/	72.16	59.88	147.05	61.95	631.35	226.31	57.38	0.47	45.13	41.55	3.58	0.147	8000	8000
POZO 2/	79.2	59.88	103.8	24.35	549	162.19	35.81	1.36	7.61	6	1.61	0.046	8000	8000
POZO 2/	84.48	55.60	141.97	53.25	625.86	209.34	33.38	1.05	9.85	9	0.85	0.103	8000	8000
POZO 2/	84.48	55.60	140.48	53.25	625.86	213.11	37.23	0.54	10.75	9.12	1.63	0.13	8000	8000
POZO 3/	80.96	65.22	201.37	56.75	697.23	333.81	38.99	0.58	27.77	27	0.77	0.173	<2	<2
POZO 3/	75.68	49.18	207.9	57	631.35	335.70	31.58	0.39	28.33	26.71	1.62	7	<2	<2
POZO 3/	93.28	55.60	208.5	59.25	713.7	348.90	42.75	0.33	28.89	26.26	2.63	0.047	13	<2
POZO 3/	89.76	63.08	256.6	72	730.17	405.48	114.65	0.45	26.65	24.19	2.46	0.021	13	<2
POZO 4/	99.12	60.22	80.86	4.90	411.75	167.85	26.82	20.18	0.78	0.00	0.78	0.04	300	27
POZO 4/	102.48	47.97	82.98	6.28	411.75	128.24	34.55	22.08	0.89	0.16	0.72	0.07	17	11
POZO 5/	79.2	64.15	106.66	19.05	510.57	173.51	34.37	4.9	4.25	3.47	0.78	2.12	500	33
POZO 5/	79.2	58.81	105.02	19	532.53	169.73	35.53	5.47	5.37	4.6	0.77	0.66	500	33
POZO 5/	75.68	52.39	107.05	18.75	494.1	169.73	35.07	6.29	5.37	4.6	0.77	0.3	400	22
POZO 5/	84.48	50.25	103.46	18.3	494.1	169.73	30.32	7.17	1.23	1.12	0.11	0.035	400	22
POZO 5/	72.16	59.88	108.82	9.55	499.59	184.82	32.61	7.07	3.69	3.2	0.49	0.44	400	22
POZO 6/	84.48	66.29	117.06	13.45	516.06	192.37	73.16	23.63	0.33	0	0.33	7.03	500	<2
POZO 6/	77.44	69.50	121.61	14.1	532.53	199.91	60.2	20	2.24	1.51	0.73	2.15	500	<3
POZO 6/	133.76	34.21	124.42	15.5	532.53	205.57	45.91	16.1	3.47	2.63	0.84	2.92	4	<4
POZO 6/	140.8	21.38	125.16	16.7	527.04	209.34	47.34	19.33	1.45	0.56	0.89	4.86	4	<5
POZO 6/	140.8	28.87	136.03	17.15	543.51	213.11	44.78	17.53	2.12	1.68	0.44	3.56	4	<2

Pozo/Prof	STD (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	C. Org. (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Zn (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Hg (µg/L)	As (µg/L)
POZO 1/	86405	5.9	2.18	77	0.02	0.13	0.045	N.D.	N.D.	0.149	N.D.	0.818	1.884	1.284
POZO 1/	863.2	6.31	2.94	77.07	0.014	0.097	0.012	N.D.	N.D.	0.118	N.D.	0.603	1.658	1.294
POZO 1/	841.8	3.44	2.59	77.64	0.015	0.108	0.029	N.D.	N.D.	0.118	N.D.	0.609	2.000	1.214
POZO 1/	838.5	4.67	1.65	75.48	0.01	0.072	0.056	N.D.	N.D.	0.078	N.D.	0.426	1.566	1.326
POZO 2/	1371.5	379.91	9.85	167.20	0.043	0.112	0.175	N.D.	N.D.	0.076	N.D.	1.958	23.680	4.688
POZO 2/	780	40.32	2.94	95.77	0.031	0.168	0.043	N.D.	N.D.	0.149	N.D.	0.978	2.000	3.484
POZO 2/	1020.5	37.05	3.12	111.1	0.033	0.183	0.049	N.D.	N.D.	0.148	N.D.	1.257	51.250	6.884
POZO 2/	1046.5	26.41	3.65	109.2	0.028	0.133	0.025	N.D.	N.D.	0.106	N.D.	0.961	11.710	7.410
POZO 3/	1352	52.25	18.21	132.4	0.034	0.132	0.065	N.D.	N.D.	0.092	N.D.	0.912	0.650	10.063
POZO 3/	1358	52.67	15.73	129.5	0.03	0.11	0.067	N.D.	N.D.	0.053	N.D.	0.577	0.696	10.093
POZO 3/	1722.5	49.75	10.24	148.7	0.03	0.11	0.038	N.D.	N.D.	0.061	N.D.	0.655	7.000	10.336
POZO 3/		52.25	17.67	140.8	0.037	0.169	0.056	N.D.	N.D.	0.114	N.D.	1.065	1.038	13.202
POZO 4/	665.6	8.36	6.65	59.95	0.016	0.127	0.021	N.D.	N.D.	0.132	N.D.	0.679	2.204	1.628
POZO 4/	681.2	8.78	2.35	67.86	0.02	0.108	0.03	N.D.	N.D.	0.118	N.D.	0.723	3.058	1.734
POZO 5/	811.2	30.58	12.15	93.06	0.026	0.132	0.008	N.D.	N.D.	0.119	N.D.	0.658	7.536	2.880
POZO 5/	809.3	9.75	3.21	88.02	0.037	0.212	0.018	N.D.	N.D.	0.149	N.D.	0.809	39.420	3.212
POZO 5/	845	10.58	2.82	85.99	0.042	0.272	0.006	N.D.	N.D.	0.239	N.D.	1.117	4.428	2.694
POZO 5/	846.3	53.44	13.48	86.26	0.036	0.179	0.014	N.D.	N.D.	0.118	N.D.	0.79	83.000	3.690
POZO 5/	846	16.83	3.18	80.38	0.033	0.195	0.009	N.D.	N.D.	0.104	N.D.	0.774	2.362	3.432
POZO 6/	929.5	13.92	13.48	85.96	0.029	0.171	0.012	N.D.	N.D.	0.118	N.D.	0.961	0.778	6.586
POZO 6/	916.5	11.83	10.88	86.04	0.026	0.086	0.009	N.D.	N.D.	0.026	N.D.	1.489	2.260	20.025
POZO 6/	930.8	19.75	18.67	88.57	0.023	0.102	0.004	N.D.	N.D.	0.033	N.D.	0.545	0.688	5.620
POZO 6/	929.5	19.33	17.18	89.75	0.017	0.062	0.007	N.D.	N.D.	0.057	N.D.	0.637	1.692	5.332
POZO 6/	851.5	17.67	16.29	90.85	0.023	0.121	0.006	N.D.	N.D.	0.087	N.D.	0.813	0.894	6.192

N.D.: No detectable; NF: nivel freático; Col. tot.: coliformes totales; Col. fec.: coliformes fecales; C. org.: carbón orgánico total; N. org.: nitrógeno orgánico; STD: sólidos totales disueltos; Prof.: profundidad.

En general se observa el efecto de la infiltración de los lixiviados de la basura acumulada en el área, ocasionando así contaminación del acuífero en esa zona. En general, se observó el efecto que causó en la calidad de agua subterránea la infiltración de los lixiviados de la basura acumulada en la parte central del terreno en estudio, desplazándose dicha contaminación en dirección del flujo subterráneo hacia el noroeste del ex basurero y verticalmente hacia el fondo de los pozos **(Figuras VII.29 y VII.30)**. Esta contaminación fue bacteriológica y de metales pesados contenidos en la basura depositada en esa zona sin el manejo técnico-ambiental adecuado.

Figura VII.29).- Sección de isoconcentración de DBO en mg/L.

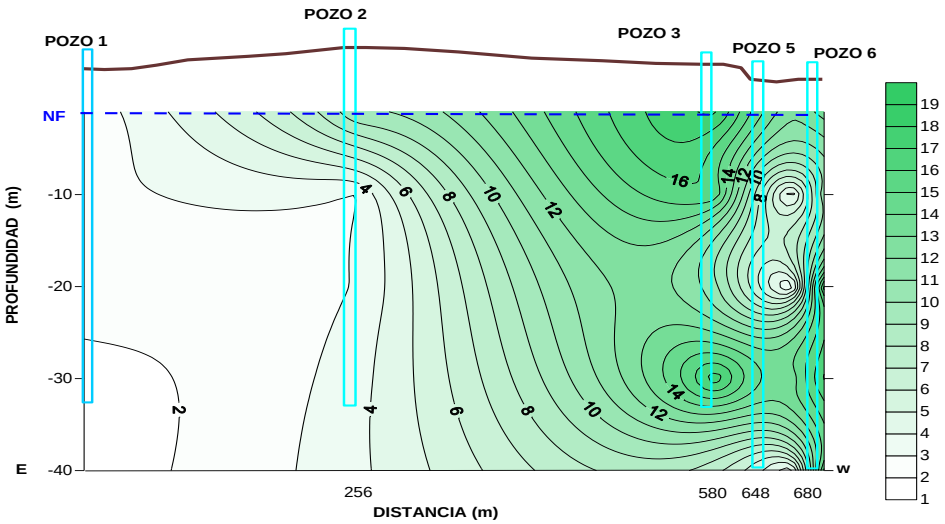
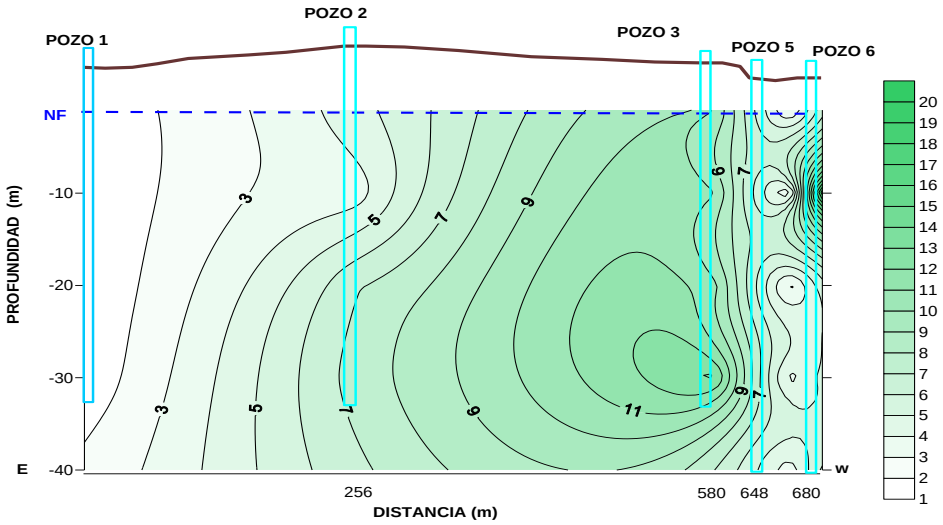
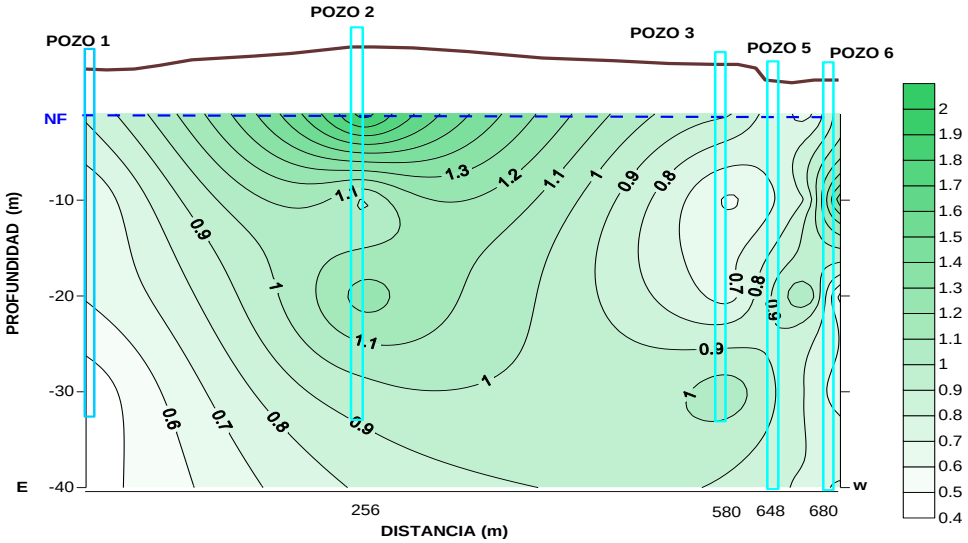


Figura VII.30).- Sección de isoconcentración de arsénico en µg/L



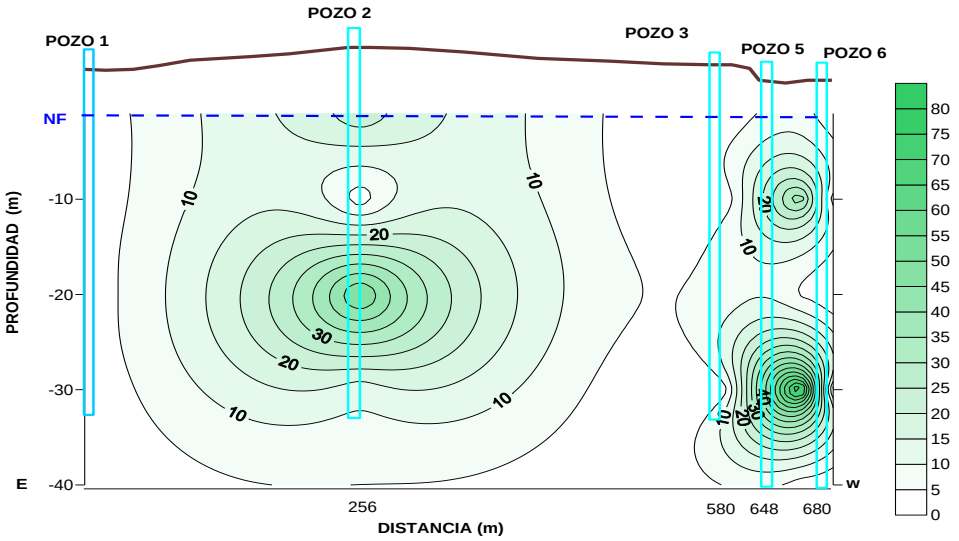
La concentración de hierro varió entre 0.436 y 1.958 mg/L. Se presentó la mayor concentración a nivel freático en el pozo 2 disminuyendo horizontal y verticalmente en forma radial (Figura VII.31). La alta concentración en el pozo 2 es debido a la infiltración del lixiviado de la basura acumulada en esa zona, que se encuentra con mucho desperdicio de hierro. Todas las muestras de agua rebasaron la NOM-127-SSA1-1994.

Figura VII.31).- Sección de isoconcentración de hierro en mg/L.



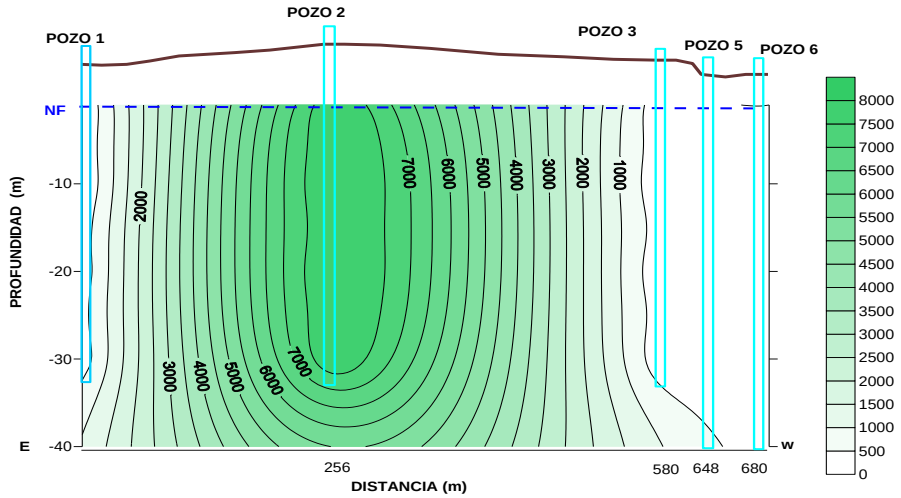
El mercurio (Hg) varió entre 0.650 y 83.00 µg/L. La mayor concentración se presentó en el pozo 2 a 20 m de profundidad, disminuyendo en forma radial hacia los extremos del terreno (Figura VII.32). Esta contaminación es debida a la infiltración del lixiviado de la basura que se encuentra en el área.

Figura VII.32).- Sección de isoconcentración de mercurio en µg/L



Los coliformes totales variaron entre < 2 y 8000 NMP/100 mL. La mayor concentración se presentó en el pozo 2, disminuyendo en forma radial horizontal y verticalmente (Figura). Esta alta concentración se debió a la infiltración del lixiviado de la basura acumulada en el área, que contiene o contenía desechos orgánicos. Las muestras rebasaron los límites de la NOM-127-SSA1-1994.

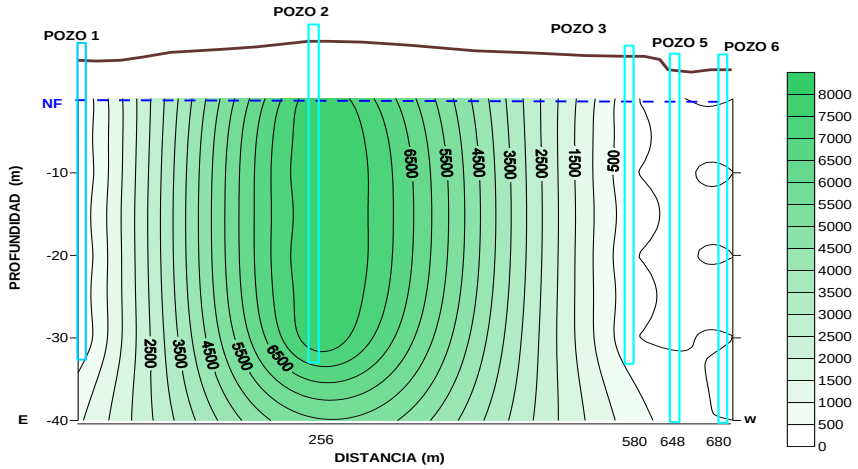
Figura VII.33).- Sección de isoconcentración de coliformes totales en NMP/100 mL..



Los coliformes fecales variaron entre < 2 y 8000 NMP/100 mL presentándose la mayor concentración en el pozo 2, disminuyendo en forma radial horizontal y verticalmente (Figura VII.34). Esta alta concentración se debió a la infiltración del lixiviado de la basura

acumulada en el área, que contiene o contenía desechos orgánicos. Estos valores se encontraron por encima de los límites de la NOM-127-SSA1-1994.

Figura VII.34).- Sección de isoconcentración de coliformes fecales en NMP/100 mL.



En general, se observó el efecto que causó en la calidad de agua subterránea la infiltración de los lixiviados de la basura acumulada en la parte central del terreno en estudio, desplazándose dicha contaminación en dirección del flujo subterráneo hacia el noroeste del ex basurero y verticalmente hacia el fondo de los pozos. Esta contaminación fue bacteriológica y de metales pesados contenidos en la basura depositada en esa zona sin el manejo técnico-ambiental adecuado.

La calidad del agua subterránea muestreada en los pozos de observación en el área del ex-basurero municipal sobrepasan los valores de los criterios considerados en la norma NOM-127-SSA1-1994 en la cual se hace referencia a los parámetros que debe cumplir el agua para uso y consumo humano; por lo tanto, en forma general no se recomienda la extracción del agua subterránea de área para el abastecimiento público.

VII.7.- Contaminación derivado del uso de agroquímicos.

En términos de la contaminación derivada del uso de químicos agropecuarios, Rodríguez Fuentes et al (2010) realizó un estudio sobre la expresión genética en peces cebra enjaulados como indicadores de exposición a contaminantes en cuerpos de agua en el anillo de cenotes. Uno de los mejores mecanismos para evaluar la biodisponibilidad de los contaminantes es mediante el uso de biomarcadores que toman en cuenta los procesos de absorción y distribución así como del metabolismo que ocurre en los organismos.

Los biomarcadores son respuestas biológicas cuantificables que cambian con relación a la exposición de un compuesto xenobiótico u otra perturbación ambiental o fisiológica y que pueden ser indicadores de una exposición o efecto a un compuesto tóxico (Chambers *et. al.,* 2002, citada por Rodríguez Fuentes et al 2010). Si los biomarcadores son suficientemente específicos y bien caracterizados, estos pueden ser de gran utilidad en la evaluación de riesgo, proporcionando información del grado de exposición de los humanos o poblaciones naturales a un xenobiótico específico o a una mezcla de ellos. El efecto de los contaminantes se puede determinar a varios niveles de organización, desde nivel sub celular hasta nivel poblaciones y comunidades. Sin embargo y con excepción de

pocos contaminantes, todos los efectos tóxicos inician con la interacción de una o más biomoléculas, y de ahí van escalando hasta llegar a afectar a los ecosistemas.

Los biomarcadores a nivel subcelular mas utilizados corresponden a la cuantificación de enzimas de biotransformación, parámetros de estrés oxidativo, proteínas de estrés y resistencia multixenobiótica, así como parámetros hematológicos, inmunológicos, reproductivos y neurológicos. Para el presente estudio se seleccionó como biomarcadores la expresión de los genes de citocromo P-450 1A (CYP1A) y vitelogenina (VTG).

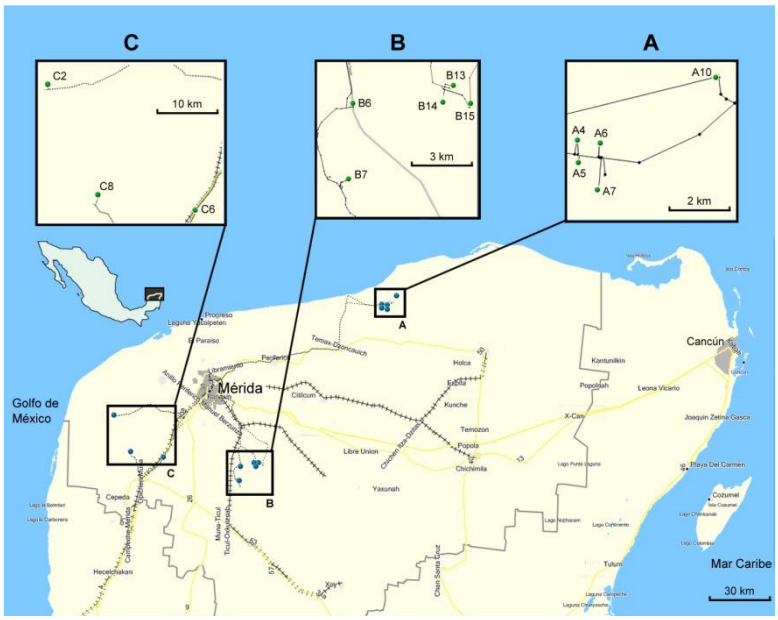
En peces, la clase de isoenzimas que son responsables de la biotransformación de una gran cantidad de compuestos xenobióticos (PAH, PCB, dioxinas etc.) es la subfamilia CYP1A (Goksoyr y Forlin, 1992, Stegeman y Hahn, 1994, citada por Rodríguez Fuentes 2010).

Una gran cantidad de xenobióticos con amplia distribución en el ambiente son reportados como disruptores endócrinos que pueden afectar la reproducción y por lo tanto constituyen una amenaza para las especies susceptibles. La vitelogenina (VTG) es la fosfoglicolipoproteína precursora de la yema de huevo expresada bajo condiciones normales en las hembras maduras de peces, reptiles, anfibios y aves.

El pez cebra (*Danio rerio*) ha surgido como un modelo de vertebrado y ha sido empleado en estudios de genética, desarrollo embrionario y toxicología acuática; más recientemente como un modelo para enfermedades humanas y el estudio de drogas terapéuticas (Penberthy *et al.* 2002, Sumanasa y Lin, 2004). En este estudio se determinó la expresión de los genes citocromo P-450 1 A y vitelogenina en juveniles de peces cebra que fueron enjaulados por un período de dos semanas en cuerpos de agua de Yucatán, México.

El presente estudio se realizó en 13 cuerpos de agua localizados en la zona norte del estado de Yucatán. La zona de estudio se dividió en tres sub-zonas, la zona A se encuentra localizada al Noreste de Mérida, la zona B al sur de Mérida y la zona C al Suroeste de Mérida. Todos los puntos muestreados están situados sobre el llamado anillo de cenotes.

Figura VII.35).- Ubicación de los sitios de muestreo para evaluación de agroquímicos

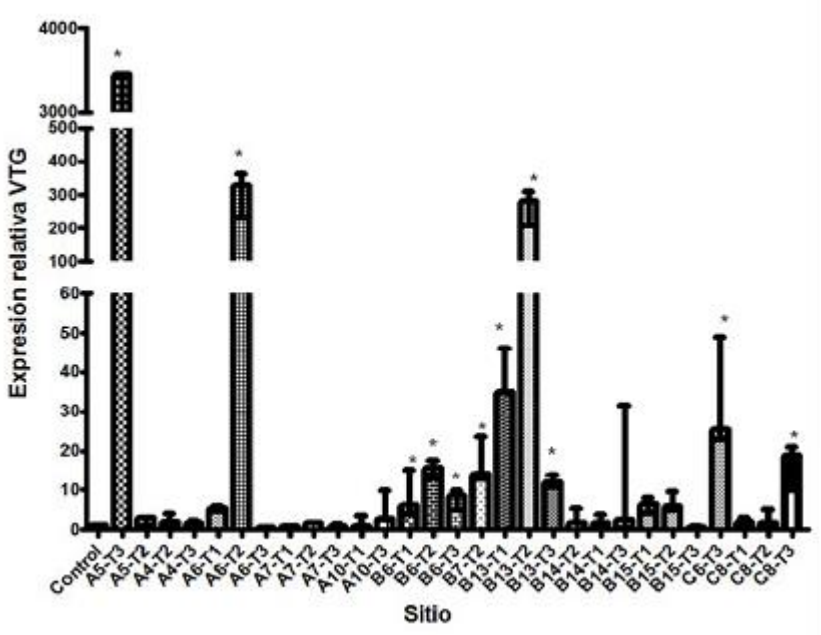


Se tomaron los datos de pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto lo más cercano a donde se colocó la trampa. Se colocaron 3 trampas conteniendo 5 peces cada una en los trece cuerpos de agua. La exposición de los organismos se realizó durante 15 días iniciando el día 1º de Marzo del 2010.

Durante el proceso de colecta de las muestras se detectó mortalidad del 87% de los organismos expuestos en el cenote A4 y un 100% de mortalidad en la aguada C2. Los resultados del análisis de expresión genética por medio de RT-PCR para el gen de VTG presentaron tres zonas con expresiones relativas 100 veces más altos que en el control.

En el punto A5-T3 de hecho se encontraron expresiones relativas comparables a las presentes en hembras adultas, es posible inferir que los organismos en este sitio estuvieron expuestos a xenoestrógenos provenientes probablemente de la actividad ganadera que se desarrolla en la zona. Ocho puntos resultaron con expresiones relativas intermedias estadísticamente significativas respecto al control. Al comprar los puntos por zona, se tiene que 16% de las trampas recolectadas en la zona A, 53% en la zona B y 50% en la zona C presentaron niveles significativamente superiores a las muestras del agua control. Los resultados del ANOVA para el estudio de expresión relativa del gen CYP1A arrojaron diferencias estadísticamente significativas. La prueba post-hoc de Duncan determinó que los sitios A4-T3, B6-T2 y B13-T2 fueron estadísticamente significativos con respecto a la expresión de los peces control **(Figura VII.36 y VII.37)**.

Figura VII.36).- Expresión genética de Vitelogenina en peces cebras enjaulados en diferentes cuerpos de agua de Yucatán.



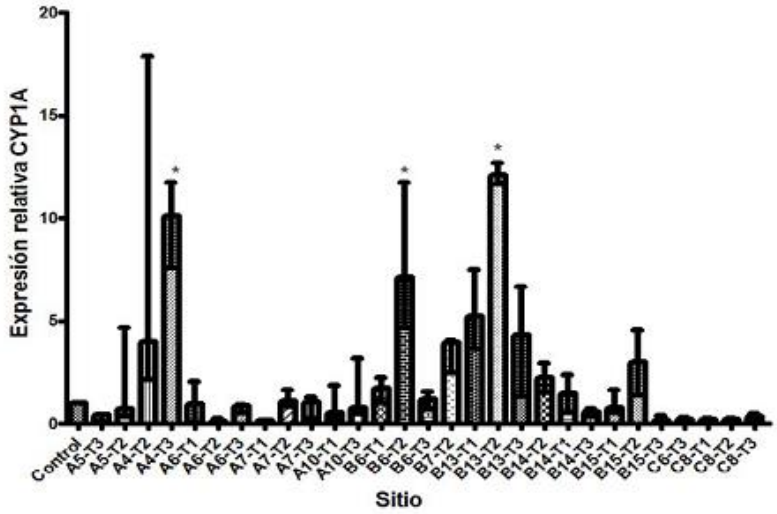
Las barras representan el valor de las medianas y los bigotes representan el rango intecuartílico. * denota diferencias significativas respecto al control p=0.05

La presencia de otras zonas con diferencias estadísticamente significativas para la expresión del gen VTG pudiera estar ligada a la presencia de agroquímicos que se observaron en toda la zona de estudio, principalmente en la zona A, donde fue posible observar envases vacíos de 2,4 D, Asuntol y Paraquat. El herbicida 2,4 D y el Paraquat han sido reportado previamente como compuestos disruptores endócrinos (Orme y Kegley,

2010) y se han reportado su efecto sobre especies silvestres. Xie *et al.,* 2005 determinaron que el 2,4 D pudiera ser un disruptor endócrino que pudiera causar efectos adversos en los órganos reproductivos debido a la interrupción de los procesos mediados por el receptor de estrógeno. Los cenotes B6, B7 y B13 presentan un efecto por actividades humanas al ser utilizados para actividades recreativas por los habitantes de la localidad siendo esta la posible ruta de entrada de los contaminantes al sistema. Estudios anteriores han demostrado la gran sensibilidad de la expresión del gen VTG al ser utilizada como biomarcador por ejemplo, Tong *et al*. 2004 determinaron que concentraciones tan bajas como 1 ug/L de 17!"-estradiol es posible observar la inducción del gen.

La expresión del gen CYP1A es una respuesta a la exposición a compuestos orgánicos de estructura plana, entre estos compuestos tenemos a los hidrocarburos poliaromáticos (PAH), a los bifenilos policlorados (PCB) y a las dioxinas, sin embargo, algunos plaguicidas y productos farmacéuticos también tienen su metabolismo por vía del CYP1A. Al analizar la expresión de CYP1A en los organismos expuestos en trampas muestras se pueden observar tres puntos donde se tuvieron expresiones relativas significativamente más altas que en el control. El punto A4-T3 está situado en una zona con actividad ganadera, en este cuerpo de agua se presentó una mortalidad del 87% por lo cual el análisis de la expresión relativa se llevó a cabo con los pocos organismos que sobrevivieron la exposición. La sobreexpresión podría estar ligada a la presencia de los compuestos tóxicos que causaron la muerte de los organismos. Por otro lado, el punto B6-T2 corresponde al cenote Yaxputol, la trampa se encontraba en una región del cuerpo de agua donde se podía apreciar la quema de basura, por lo cual la inducción pudiera estar ligada a la presencia de hidrocarburos PAH, que son sub-productos de una combustión incompleta de la materia orgánica. El punto B13-T2 tuvo sobreexpresión genética de los dos genes utilizados en este estudio, el cenote B13 (Calcuch) es utilizado para actividad turística y la práctica del espeleobuceo. El punto B13-T2 está localizado bajo la escalera que da entrada al cenote por lo que es un punto con alta actividad humana. Estos resultados indicaron que hay cuerpos de agua en todas las zonas estudiadas durante el presente proyecto que presentaron un efecto producido por las actividades humanas

Figura VII.37).- Expresión genética de CYP1A en peces cebras enjaulados en diferentes cuerpos de agua de Yucatán.



Las barras representan el valor de las medianas y los bigotes representan el rango intecuartílico. * denota diferencias significativas respecto al control p=0.05

Por su parte, Polanco, A. (2011), realizó un estudio sobre el riesgo por contaminantes orgánicos persistentes (COP´s, pesticidas) y su relación con cánceres en varios municipios del Estado de Yucatán. Menciona que la naturaleza cárstica de la región hace que el agua subterránea sea muy vulnerable a la contaminación y que en la mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua municipales el uso del suelo en los alrededores es principalmente habitacional, agrícola y pecuario, por lo que el uso no controlado de agroquímicos y la disposición inadecuada de los desechos, son las principales fuentes de contaminación del acuífero.

En la figura siguiente se presenta las concentraciones totales de compuestos organoclorados que se registraron en cenotes del anillo de cenotes por Polanco A (2011), este total incluye los siguientes compuestos: Alfa Lindano, Delta Lindano, Gama Lindano, Heptacloro, Aldrín, E. Epoxido, Endosulfán I, Endosulfán II, Endosulfán SO4, Dieldrín, Endrín, 4,4 DDE, 4,4 DDD, 4,4 DDT.

Figura VII.38, a).- Concentración total de plaguicidas organoclorados en pozos y cenotes ubicados en el anillo de cenotes, y concentraciones de la diversidad de plaguicidas utilizados en la zona

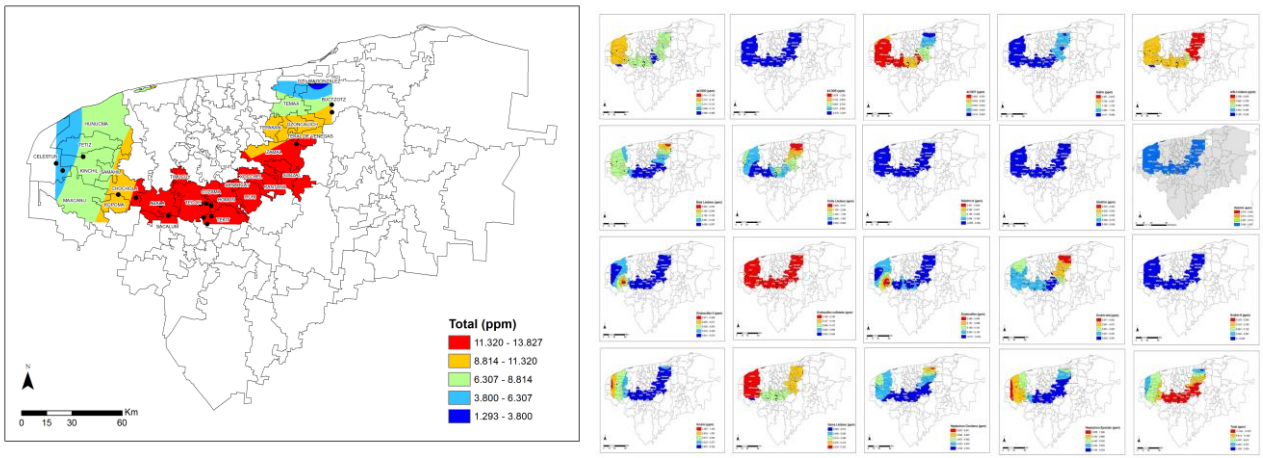
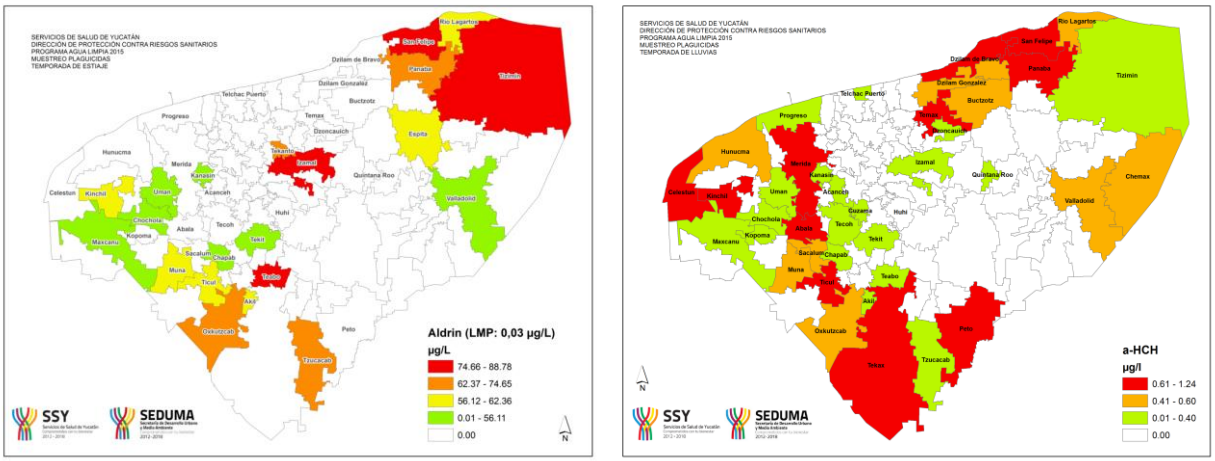


Figura VII.38, b).- Concentración en pozos de captación de agua potable en diversos municipios de Aldrín en temporada de secas en el año 2015, y concentración de alfa Lindano en temporada de lluvias en el año 2015.



Por su parte, Lizarraga Castro (2014), realizó estudios de compuestos organoclorados, particularmente DDT, DDD, DDT y Lindano, en un transecto que abarca de la Cd. de Mérida al Puerto de Progreso. Durante el periodo de mayo 2012 a enero del 2014, analizó la calidad del agua subterránea en diversos pozos distribuidos en toda la zona de estudio, y logró identificar y cuantificar dichos compuestos a una profundidad que varia entre los 10 y 25 metros de profundidad, así como la variación temporal durante secas, lluvias y nortes. La autora consideró la normatividad nacional e internacional vigente en cuanto a consumo de agua por el ser humano, así como para la vida silvestre, y encontró niveles de contaminación importantes, aun superando los valores de referencia en diversos pozos, demostrando el deterioro de la calidad del agua por la presencia de uno o mas contaminantes. Observó que durante la temporada de nortes, las concentraciones de plaguicidas organoclorados se incrementan, las lluvias que se generan durante la temporada de nortes teinden a ser menos abundantes y de más duración en el día, generan velocidades bajas de infiltración y mayor tiempo para el contacto plaguicida – agua, mientras que, durante la temporada de lluvias, la recarga del acuífero provoca el movimiento del agua subterránea dispersando y diluyendo los plaguicidas. En la temporada de secas la presencia de plaguicidas organoclorados se ve favorecida por actividades como el riego.

De acuerdo a las concetraciones obtenidas para el DDT, DDE y DDD durante las tres temporadas se observó el predominio del metabolito DDE, lo cual sugiere una contaminación no resiente de DDT en la zona de estudio, sin embargo, el DDT se incrementa en la temporada de lluvias sugiriendo la presencia o uso actual de dicho metabolito. El predominio de Lindano sugiere que este plaguicida es de uso reciente en la zona de estudio. Como se observa en las figuras siguientes, la mayor concentración se encuentra en la porción norte, sur y poniente de la Cd. de Mérida. Los plaguicidas organoclorados estudiados en este trabajo se movilizan hacia los ecosistemas costeros debido a la natualeza cárstica del Estado de Yucatán (Figura VII.39, a, b, c, d, e, f), la línea roja significa que los valores al interior superan lo establecido como máximo permitido en las normas oficiales).

Figura VII.39, a).- Distribución espacial de DDT en temporada de secas.

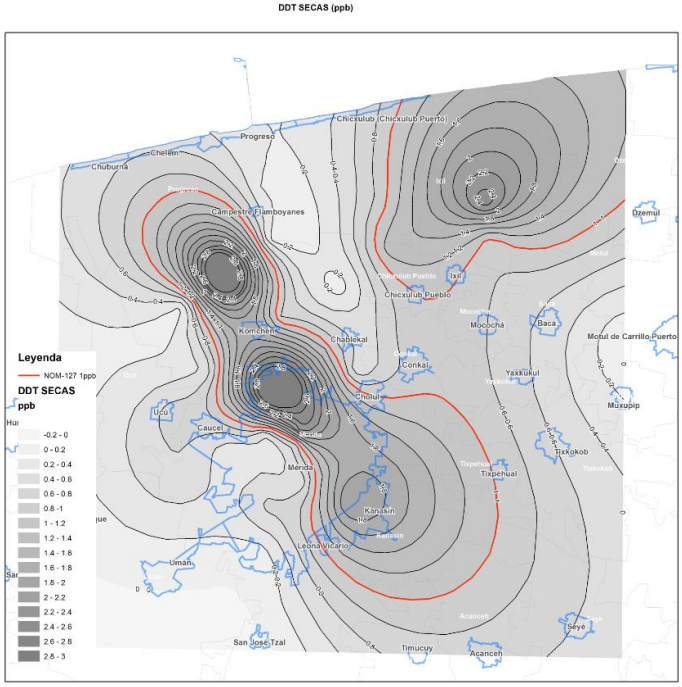


Figura VII.39,b),.- Distribución espacial de DDT en temporada de lluvias.

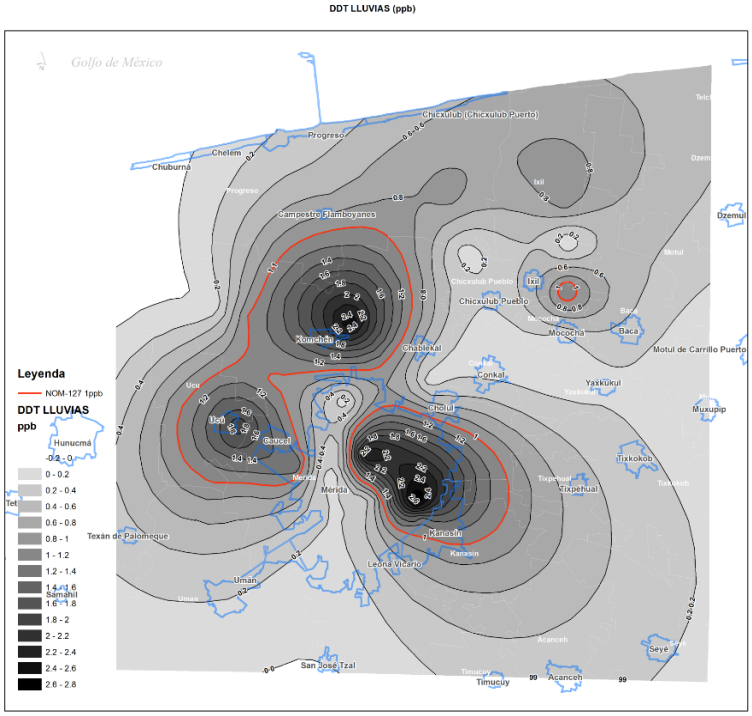


Figura VII.39, c).- Distribución espacial de DDT en temporada de nortes.

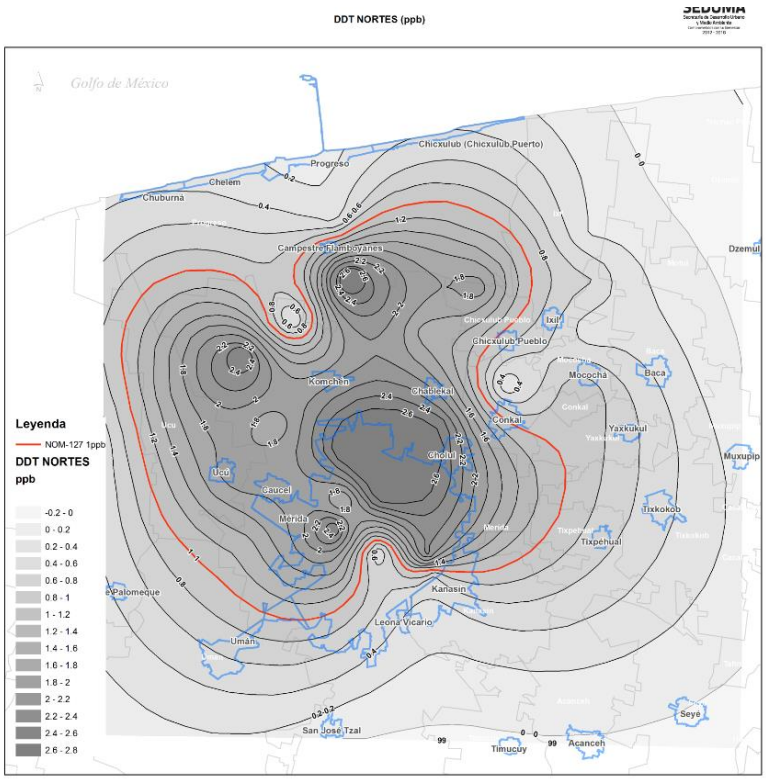


Figura VII.39,d).- Distribución espacial de Lindano en temporada de nortes.

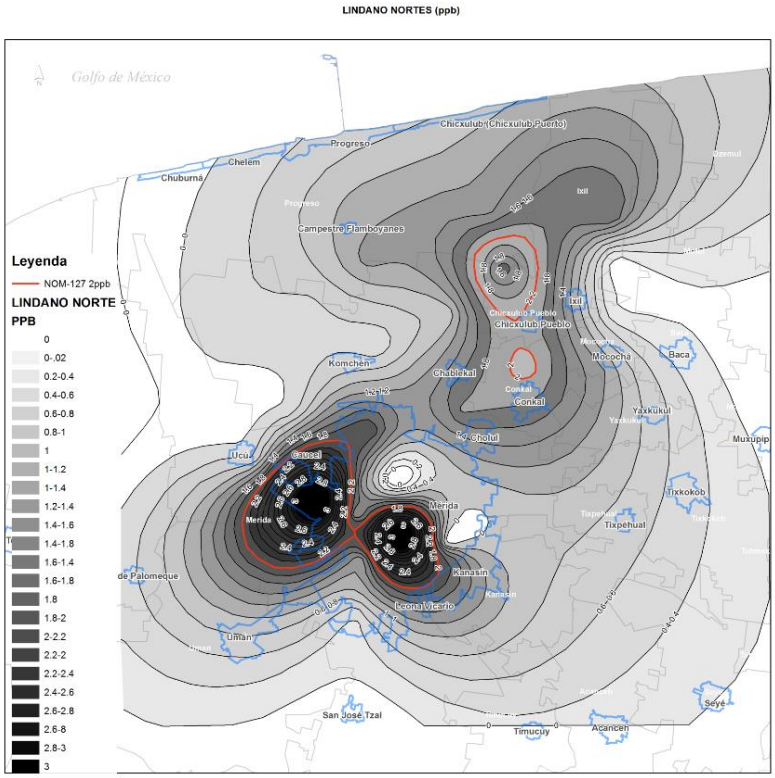


Figura VII.39,e).- Distribución espacial de Lindano en temporada de secas.

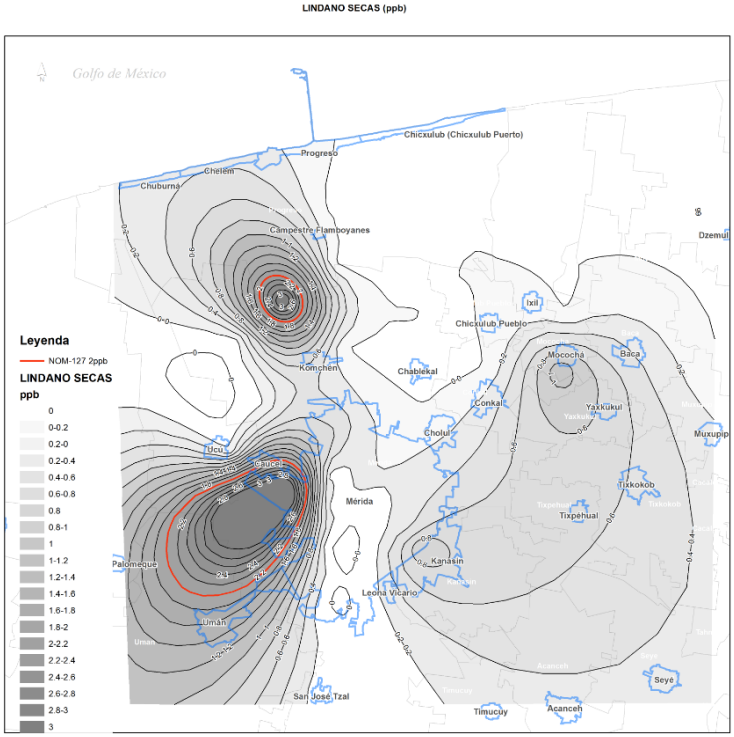
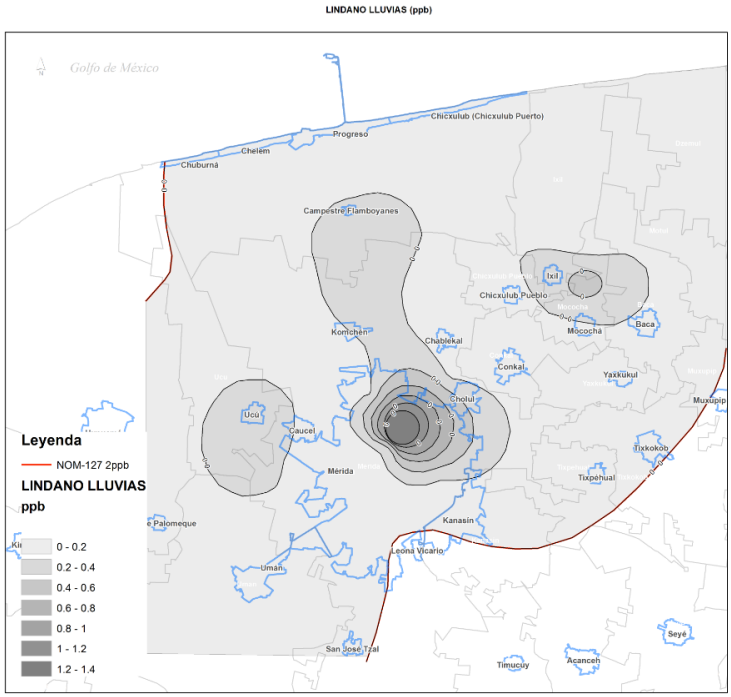


Figura VII.39,f).- Distribución espacial de Lindano en temporada de lluvias.



En 1992 se realizó un monitoreo de pozos que abastecen de agua a 12 comunidades del sur de Yucatán y los resultados mostraron residuos de agroquímicos 2,4-D y 2,4,5_T, encontrando las mayores concentraciones en Akil, Peto y Oxkutzcab.

Fue en la década de los noventa cuando creció el uso de plaguicidas en el Estado. Según datos de la SAGARPA, para 1990 en Yucatán se consumieron 600 toneladas de diversos plaguicidas, en 1991 se registró un incremento del 18 %, para 1992 el consumo alcanzó más de 1,000 toneladas y para 1995 fue cercano a las 2,000 toneladas al año. En Yucatán, la Secretaría de Salud reconoció en 1988 el uso de más de 60 plaguicidas de diferentes marcas, cuya venta sin control se lleva a cabo en diversos expendios de insumos agropecuarios.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente vinculó los efectos de los plaguicidas al nivel de morbilidad oncológica (cáncer), pulmonar y hematológico, así como a las deformaciones congénitas y deficiencias del sistema inmunitario. Los efectos en la salud humana son provocados por la inhalación y contacto a través de la piel durante la preparación y aplicación en los cultivos. No obstante un vínculo importante para la mayor parte de la población es la ingestión de agua y alimentos producto de las escorrentías y arrastre de contaminantes al manto freático durante las lluvias y por cosechas contaminadas por plaguicidas. El uso de plaguicidas en Yucatán se emplea frecuentemente para la producción de chile habanero, papaya, frijol, calabaza, pepino, sandía, melón, maíz, cítricos, entre otros. Se han identificado el uso de 21 ingredientes activos en la zona hortícola como son el paraquat, endosulfán, diazinón, metamidofós, metomilo, 2,4-D, maneb y metilparatión, glifosato y malatión, entre otros.

Se considera que los efectos producidos por los plaguicidas en la salud humana tienen que ver con el cáncer de cerebro, leucemia, tumor de Wilms, sarcoma del tejido blando, además de disruptores hormonales que generan cáncer en sistemas reproductivos, efectos neurológicos, defectos de nacimiento, cáncer de mama, cáncer cervicouterino, cáncer de piel, cáncer de próstata, cáncer de testículo, cáncer de pulmón, asma, así como en adolescentes y niños se evidencian problemas psicológicos y cognoscitivos, leucemias, deficiente desarrollo de los órganos sexuales en la menarca a causa de la disrupción en el sistema endócrino.

En la tabla siguiente se muestra el numero de niños y adolecentes con problemas de cáncer registrados en el centro oncopediatrico del Hospital Ohoran de la Cd. de Mérida desde el año 2010 al 2014.

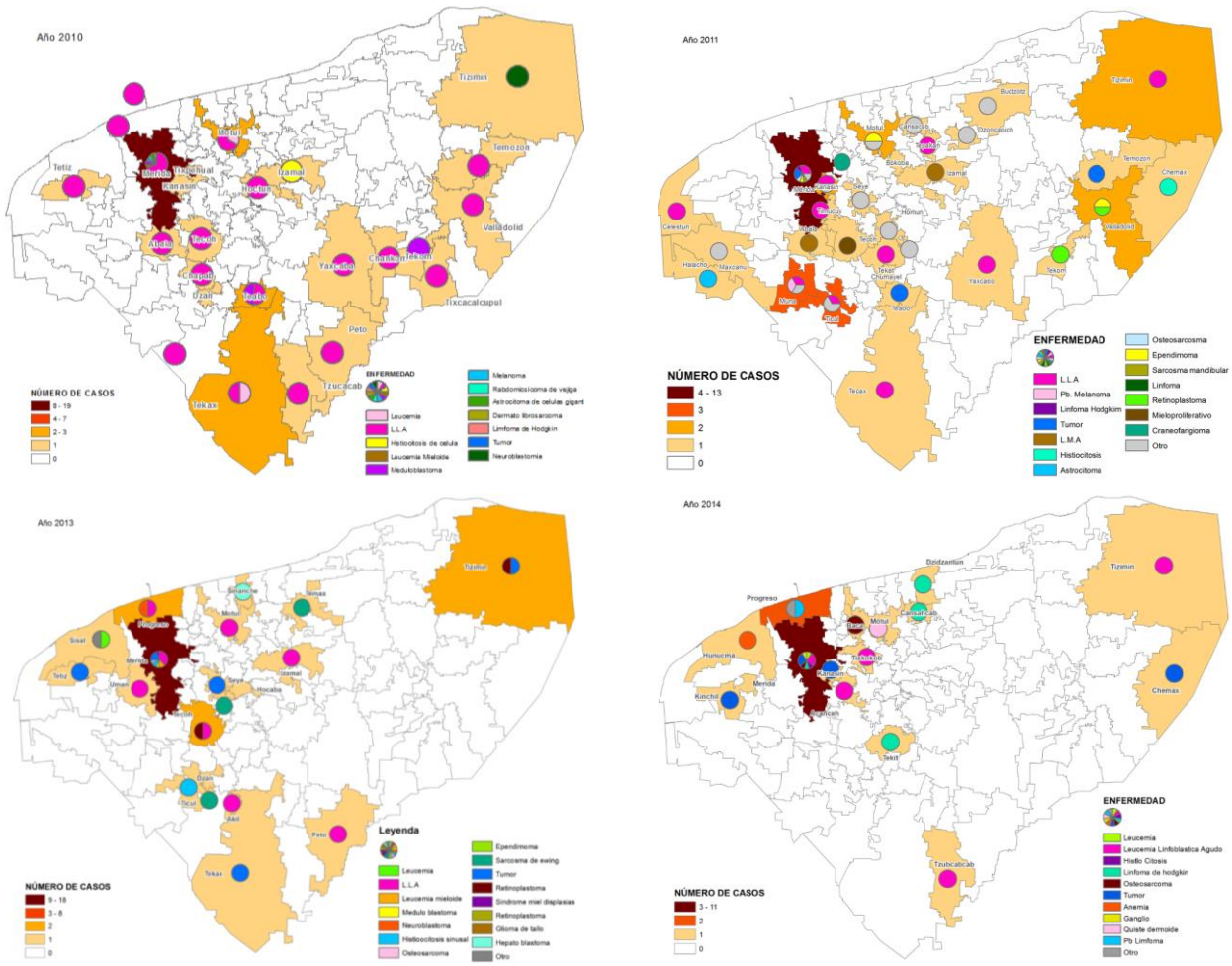
Tabla VII.13).- Número de casos de cancer en niños y adolecentes anual por sexo y edades.

TABLA RESUMEN		SEXO	EDAD		
AÑO	NÚMERO DE CASOS	FEMENINO	MASCULINO	INFANTES (1 - 12)	ADOLESCENTES (13 - 18)
2014	26	12	14	19	7
2013	38	19	19	36	2
2012	53	25	28	48	5
2011	49	17	32	46	3
2010	44	14	30	38	6

La figura VII.40 muestra el número de niños y adolecentes y el tipo de enfermedad para el año 2014 y la evolución del 2010 al 2014

Debido a más de 50 años de utilización de DDT, a su persistencia y acumulación en la cadena alimenticia, la dieta podría ser la mayor fuente de exposición para la población en general, sin embargo, otras vías de exposición pueden ser a través de la vía aérea y el agua contaminada (Lizarraga Castro, 2014). En un estudio realizado por Zumbado et.al. 1998 (citado por Lizarraga Castro, 2014), a los habitantes de las Islas Canarias en España se demostró que a pesar de la prohibición de DDT en 1977, la población mayor de 20 presentaba niveles altos de algún tipo de residuo derivado del DDT, ya que estuvieron expuestos en una época en la que estaba permitido. Además de la exposición crónica a DDT y derivados se ha relacionado con diversos tipos de cánceres dependientes de estrógenos, como el cáncer de mama. Se ha demostrado un efecto estrogénico del DDT, el cual podía mantener el crecimiento celular de un tumor estrógeno – dependiente. En Las Islas Canarias existe un alto índice de mortalidad por cáncer de mama.

Figura VII.40).- Número de casos jóvenes y adolecentes con cancer y tipo de enfermedad en el Estado de Yucatán, para los años 2010, 2011, 2013 y 2014.



Actualmente el Estado de Yucatán se encuentra en los primeros lugares de prevalencia a cáncer cervicouterino y cáncer de mama, manteniéndose esta problemática por años, que si bien ha venido disminuyendo no es del todo significativa. Su evolución va de 36 muertes por 100,000 mujeres de 25 años o más en 1992, a 44 muertes en 2005, siendo muy superior a lo reportado a nivel nacional que era de 15 muertes en la misma fecha.

Tabla VII.14).- Tasa de Mortalidad por Cáncer Cervicouterino 2001-2012*

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
DEF EST	52	45	49	67	44	48	46	37	63	50	75	71	69*	48*

Fuente: SSY, Sistema epidemiológico y estadístico de las defunciones (SEED).
*Datos preeliminares

Tabla VII.15).- Municipios con el mayor número de defunciones por cáncer de mama en mujeres de 25 años y más (2009-2014)

YUCATAN		
FRECUENCIA DE NUMERO DE DEFUNCIONES POR MUNICIPIO DE RESIDENCIA 2009-2014		
No. Orden	**Municipio**	**Núm.**
1	Mérida	252
2	Progreso	22
3	Tizimín	13
4	Kanasín	12
5	Ticul	8
6	Umán	6
7	Baca	6
8	Tekax	6
9	Valladolid	5
10	Peto	4
11	Izamal	3
12	Motul	3
13	Oxkutzcab	3
14	Hocabá	2
15	Sacalum	2

Fuente: SSY, Sistema epidemiológico y estadístico de las defunciones (SEED).

Tabla VII.16).- Tasa de Mortalidad por Cáncer Cervicouterino 2001-2014*

2001	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013***	**2014***
100	109	104	103	105	88	76	86	77	98	79	89	66	53

Fuente: SSY, Sistema epidemiológico y estadístico de las defunciones (SEED).
*Datos preliminares numero de defuncionas por cada 100,000 habitantes.

Tabla VII.17).- Municipios con el mayor número de defunciones por cáncer Cervicouterino en mujeres de 25 años y más (2009-2014)

YUCATAN		
MUNICIPIOS CON MAYOR FRECUENCIA DE DEFUNCIONES 2009-2014		
No. Orden	**Municipio**	**Núm.**
1	Mérida	200
2	Progreso	14
3	Tekax	14
4	Tizimín	14
5	Umán	14
6	Valladolid	14
7	Kanasín	13

8	Izamal	9
9	Motul	9
10	Ticul	9
11	Hunucmá	7
12	Maxcanú	7
13	Oxkutzcab	7
14	Chemax	6
15	Halachó	6
16	Peto	6
17	Tecoh	6
18	Tzucacab	6

Fuente: SSY, Sistema epidemiológico y estadístico de las defunciones (SEED).

El estudio de Polanco, A. (2011), sintetiza aspectos que se refieren a la epidemiología ambiental y sociocultural de la relación agua/pesticidas, así como la población/percepción de riesgos. Un resultado general mostró una muy baja percepción del riesgo del efecto nocivo, dado que muchos entrevistados no consideran que dichas sustancias dañen al suelo o al agua subterránea, entre otros.

El mismo autor analizó la presencia de plaguicidas en sangre de mujeres con cáncer cervicouterino y mamario encontrando presencia de pesticidas, en algunos casos por encima de la norma oficial para límites máximos permisibles. Los siguientes resultados que se exponen, sólo para el caso de los municipios de influencia metropolitana, como Umán, Kanasín y Progreso, además de Tizimín por ser un municipio donde el uso de estas sustancias es extensivo, destacan la presencia de Delta Lindano, Gama Lindano, Heptacloro, Aldrín, Endosulfan epóxido, Endosulfán I y II, Dieldrín, 4,4-DDE, 4,4-DDD, 4,4-DDT y Endosulfán SO4. Dicho autor también obtuvo concentraciones de pesticidas en la leche materna, aquí sólo presentamos los resultados del municipio de Kanasín con presencia de Beta Lindano, Aldrín, E. epóxido (que en este caso alcanzó concentraciones extraordinarias de 18.46 ppm), Endosulfán I y II, Dieldrín, 4,4-DDE, 4,4-DDD, 4,4-DDT, y Endosulfan SO4.

Tabla VII.18).- Concentraciones de pesticidas en sangre de mujeres con cáncer cervicouterino y mamario de diversos municipios del estado de Yucatán.

Municipio	**Umán**	**Progreso**	**Kanasín**	**Tizimín**
Pesticida ppm				
Alfa Lindano				
Delta Lindano				0.469
Gama Lindano			0.08	
Heptacloro			0.064	1.434
Aldrín				3.695
E. Epoxido				0.467
Endosulfán I	0.021	0.019	0.005	7.352
Dieldrín	0.334	0.006	0.01	0.859
4,4 DDE		0.019	0.01	0.127
Endrín		0.012	0.021	0.146
Endosulfán II			0.011	
4,4 DDD		0.010	0.005	2.336
Endrín AI		0.002	0.025	0.566
Endosulfán SO4			0.010	
4,4 DDT		0.005	0.003	

Tabla VII.19).- Concentraciones de pesticidas en la leche materna del municipio de Kanasín, Estado de Yucatán.

Municipio	**Kanasín**
Pesticida ppm	
Beta Lindano	0.072
Delta Lindano	
Gama Lindano	
Heptacloro	
Aldrín	0.122
E. Epoxido	18.46
Endosulfán I	0.007
Dieldrín	0.121
4,4 DDE	0.042
Endrín	1.92
Endosulfán II	0.157
4,4 DDD	0.235
Endrín AI	0.112
Endosulfán SO4	0.045
4,4 DDT	0.032

Las actividades humanas como la agricultura, la ganadería los incendios forestales, la quema de basura, entre otros terminan siendo nocivas mientras no exista mesura, particularmente en los 2 primeros, en la venta, uso y manejo de agroquímicos, ya que conllevan a su irremediable arrastre al manto freático en época de lluvias. Esto, aunado a que la naturaleza nociva de dichas sustancias está plenamente demostrada, su venta no controlada y la falta de información de la que adolecen las familias agricultoras, son en su conjunto elementos que convocan a la reflexión y a la acción con conciencia de que nuestra gente aspira, toma, come, huele, inhala y absorbe por la piel y da de amamantar a sus hijos, agroquímicos, sustancias que pueden quedar en el medio ambiente por casi 3 o 4 décadas, de manera que son varias generaciones que se dañan de manera irremediable.

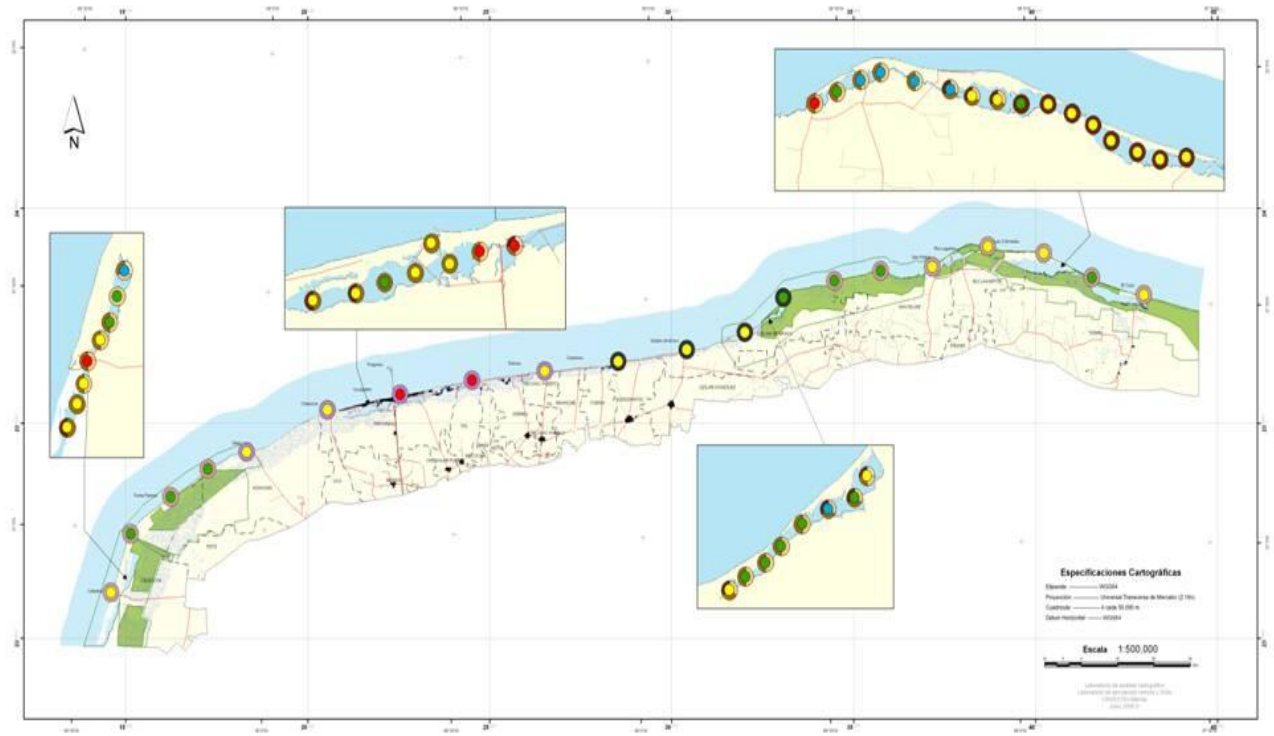
VII.8).- Características físico - químicas y sanitarias de la zona litoral

En el Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán (POETCY), se establece una serie de indicadores de calidad de agua litoral y lagunar denominada: Condición trófica del agua marina: Como se observa la zona centro norte presenta un nivel trófico de regular a malo, tipo II y III. Mesotrófico (particularmente en el área de Chuburná Puerto, Progreso y Telchac Puerto). Esta condición permite que de manera regular se presente el fenómeno de las mareas rojas, como sucedió en el año 2008. A continuación se presenta el mapa que describe dicha condición trófica:

Este es el resultado de los procesos de contaminación, principalmente de cargas orgánicas derivados de los vertimentos de aguas residuales de las zonas urbanas costeras y de tierra adentro, como la zona metropolitana de Mérida y también de casas veraniegas cuyo tratamiento en fosas sépticas es muy deficiente. Progreso de Castro es el municipio costero que presenta las peores condiciones físico – químicas de toda la costa yucateca. Por otro lado, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios 2009, presenta datos de calidad sanitaria del agua de mar para uso recreativo y se presentan a continuación los

datos del periodo 2003 - 2009. (Consulta Web: http://201.147.97.103/wb/cfp/progreso del 26 de marzo de 2009). Se presentan los resultados en forma de graficas de los niveles de la calidad bacteriológica del agua de mar donde se establecen los niveles de Enterococos (NMP/100 ml) durante los muestreos del Programa Integral de Playas Limpias para las playas de Progreso, Yucatán. El riesgo sanitario es considerado a partir de los datos mayores a 500 enterococos/100ml.

Figura VII.41).- Condición trófica del agua marina. En el Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán (POETCY). Indicadores de calidad de agua litoral y lagunar.



Condición trófica del agua

Estación de muestreo	Marina	Lagunar		
		Estuarina	Euhalina	Hiperhalina
Muy buena (Oligotrófico)	———	1.07 - 2.06	0.86 - 0.92	0.91 - 1.27
Buena (Oligo-Mesotrófico)	1.43 - 1.80	2.07 - 2.62	0.93 - 1.52	1.28 - 2.02
Regular (Mesotrófico)	1.81 - 2.32	2.63 - 3.23	1.53 - 2.38	2.03 - 2.77
Mala (Meso-Eutrófico)	2.33 - 3.38	———	2.39 - 3.75	———

Tipología de agua marina por variables hidrológicas[a]

Tipo I
Niveles bajos de NO_3, NO_2, NH_4, SRSi, SRP y Cl-a

Tipo II
Niveles altos de NO_3, SRSi y Cl-a

Tipo III
Niveles altos de NO_2, NH_4, SRP y Cl-a

[a] Construida por los autores considerando las concentraciones de nitrato (NO_3), nitrito (NO_2), amonio (NH_4), silicato (SRSi), ortofosfato (SRP) y clorofila (Cl-a)

Tipología lagunar[b] de acuerdo a la salinidad

Oligohalina (< 10)
Estuarina (11- 30)
Euhalina (31- 40)
Hiperhalina (> 40)

[b] Las lagunas pueden presentar variación temporal en la salinidad de más de un tipo a lo largo del año.

Figura VII.42).- Ubicación de los sitios de muestreo para zona litoral en Progreso, Yucatán.

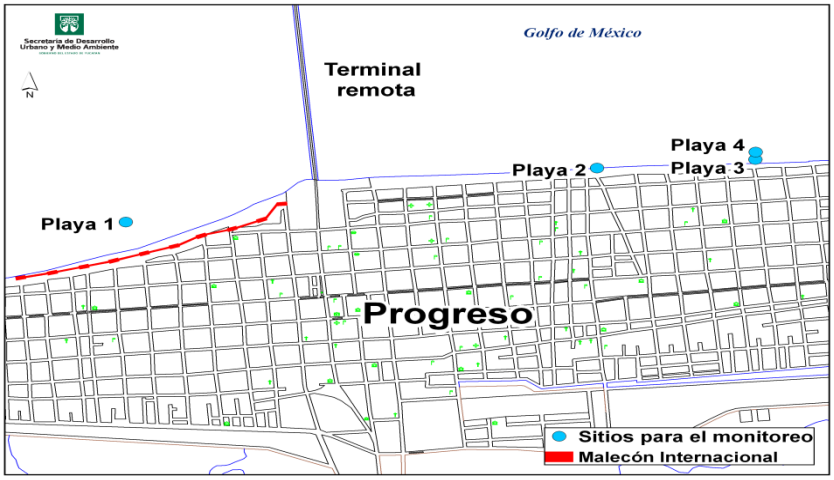
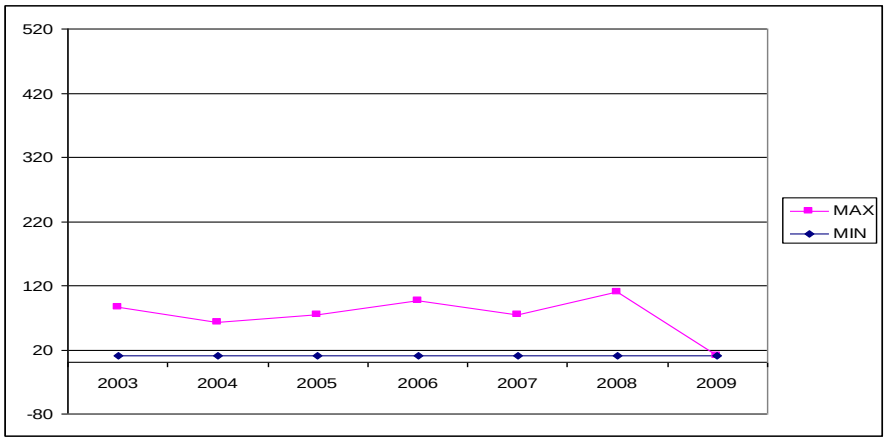
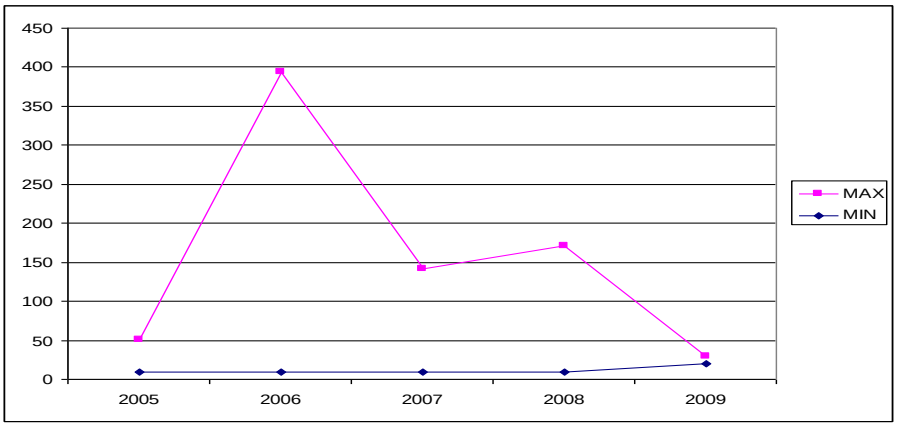


Figura VII.43).- Sitio 1, Playón de Progreso, 2, Malecón de Progreso y 3, hacia Chicxulub Puerto. Se mantiene en concentraciones que no sobrepasan los 120 enterococos /100 ml del año 2003 al 2009.

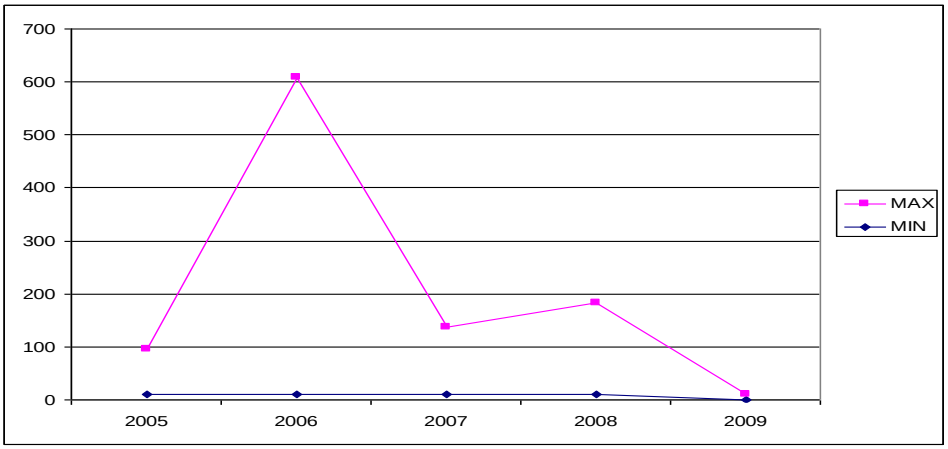
PLAYA	LATITUD	LONGITUD
Playa Progreso 1	21.28583	-89.67167



PLAYA	LATITUD	LONGITUD
Playa Progreso 2	21.28862	-89.65424



PLAYA	LATITUD	LONGITUD
Playa Progreso 3	21.28911	-89.64837



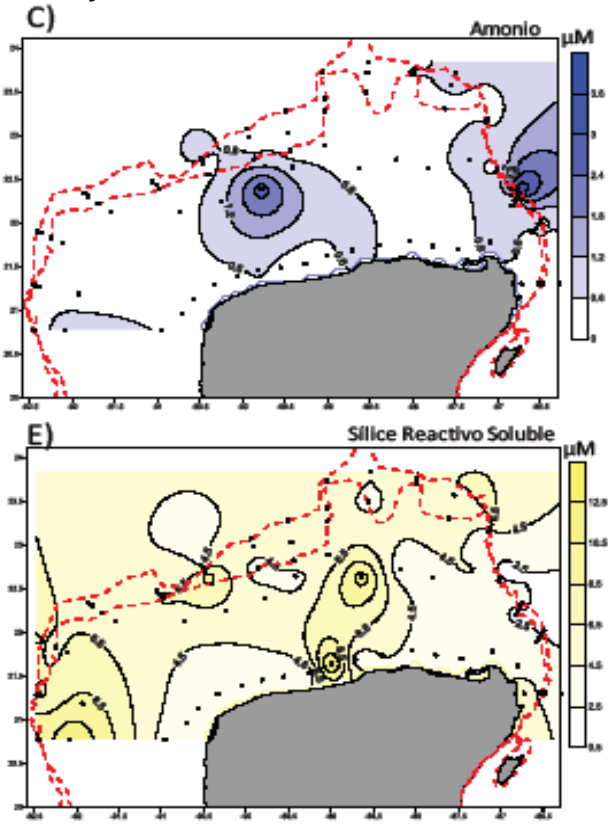
Se observa que el área oriental de influencia del Playón de Progreso es la que ha presentado condiciones que en ciertos momentos supera los valores recomendados.

Las descargas de agua epicontinentales que genera el anillo de cenotes hacia la platofarma marina se muestra en lo siguiente. Los valores altos de nitritos probablemente estén relacionados con aportes de agua subterránea y de las lagunas costeras (Herrera-Silveira, 1994; Morales-Ojeda et al., 2010).

En el caso del amonio se podría asociar a los aportes de agua subterránea que en esta zona por su conectividad con las actividades tierra adentro, están relativamente contaminadas (Herrera-Silveira, 1994 y Morales-Ojeda, 2009). Respecto al sílice reactivo soluble este nutriente presento sus mayores concentraciones en una zona donde hay influencia de aguas subterráneas proveniente del anillo de cenotes.

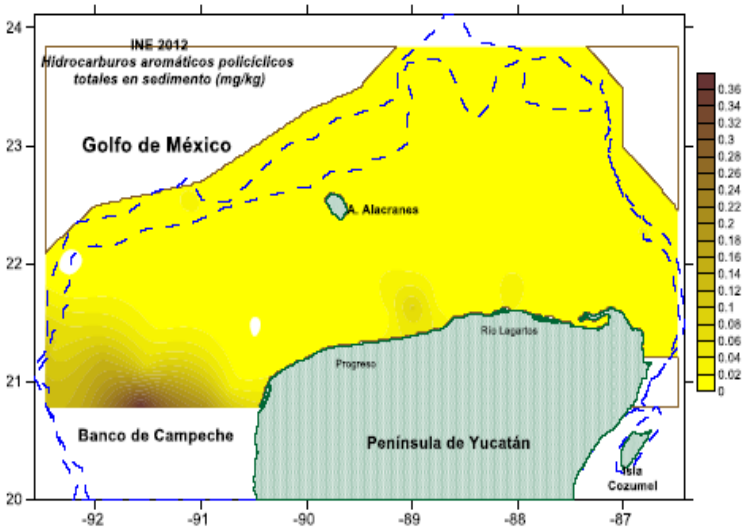
Estos resultados sugieren que la zona costera es la que presenta un estado trófico más alto asociado a los aportes de nutrientes de las descargas de aguas subterráneas ya que los promedios de nutrientes (FRS, amonio) que se asocian a estas fueron mayores.

Figura VII.44).- Descargas de agua epicontinentales que genera el anillo de cenotes hacia la platofarma marina. Amonio y Sílice reactivo.



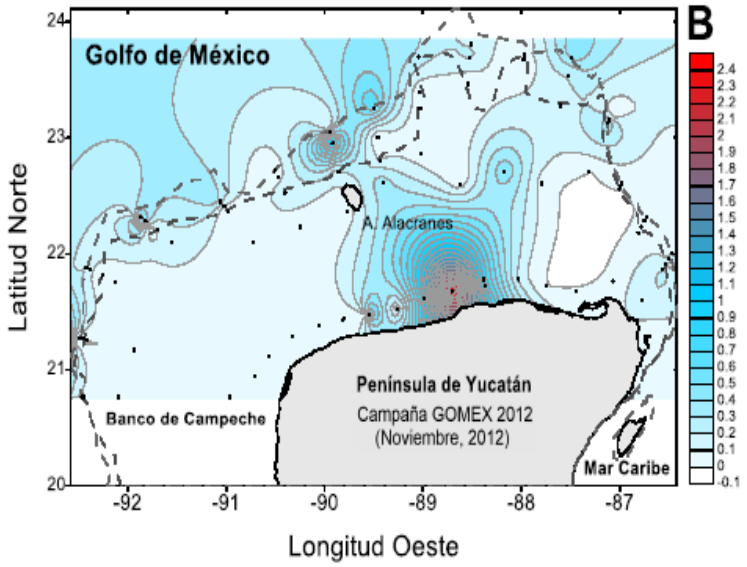
Otro aspecto importante tiene que ver con contaminantes. En la Figura VII.45 se muestra la distribución espacial de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) totales (sumatoria de APM y BPM). Se puede apreciar claramente que la zona con mayores concentraciones se encuentra cercana al Banco de Campeche, región del Golfo altamente petrolera y otro máximo, con menor intensidad se encuentra en la costa cercana a Dzilám de Bravo; esta ultima muy probablemente recibiendo descargas subterráneas de tierra adentro o bien, a incendios menores que pueden ser causa también de la presencia de HAPs.

Figura VII.45).- Distribución espacial de los HAPs totales (APM+BPM)



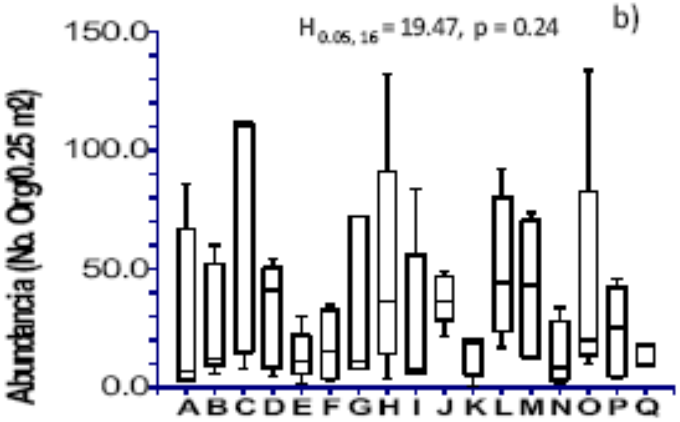
En el caso de Dzilám de Bravo se presentaron también índices altos de HID/HET (relación de bacterias hidrocarbonoclásticas/heterótrofas) en sedimentos, se esperaría que estén relacionadas con concentraciones altas de hidrocarburos y de esta manera se estaría indicando que la presencia de estas bacterias es debida a la concentración de determinados hidrocarburos (ya sean de la industria petrolera u otras fuentes, incluyendo las quemas agrícolas).

Figura VII.46).- Distribución de la relación de bacterias hidrocarbonoclásticas / heterótrofas (%) en el área de estudio. (B) sedimentos.



La siguiente figura muestra la distribución de la abundancia del macrobentos (anélidos poliquetos, los cuales fueron el grupo dominante en términos de abundancia relativa seguido por el grupo Arthropoda, Mollusca y Equinodermata) en la plataforma continental agrupada por transectos. Se observa que si bien la distribución de abundancia no es muy homogénea, si es de observarse que los valores de abundancia de macrobentos sean los menores en el transecto K, precisamente frente a Dzilám de Bravo.

Figura VII.47).- Distribución espacial de la abundancia (b) en función de la zona específica de muestreo (transectos). La posición de los transectos de la A a la Q va de Este a Oeste. Los valores del estadístico de kruskal Wallis (H), para comparación de medianas, se muestran en la parte superior o inferior de la figura.



VIII).- CONCLUSIONES

La zona geohidrológica del anillo de cenotes se configura como una unidad geográfica funcional, que permite aplicar un manejo integral y sustentable del agua subterránea en esta porción del Estado de Yucatán, identificando tres componentes constitutivos:

1).- Un área de recarga, representada por la zona de alta variabilidad hidrológica con aguas cálcico – carbonatadas de buena calidad al sureste de la Ciudad de Mérida, que incluye los Municipios de Huhí, Cuzamá, Homún, Seye, Tecoh, Acanceh, entre otros;

2).- Un área de escurrimiento subterráneo de agua en la parte central que pasa por debajo de la zona metropolitana de Mérida y Municipios de influencia, con áreas preferenciales de flujo a manera de ríos subterráneos en los diferentes anillos del cráter de Chicxulub, en el cual el conocido como Anillo de Cenotes es el mas evidente. y;

3).- Un área de descarga en la zona costera, confinando al acuífero mediante un acuitardo que permite regular el vertimiento de agua a través de manantiales a un sistema de humedales en los Municipios de Progreso, Ixil y Telchac Puerto, entre otros, al tiempo que permite desarrollar un pequeño gradiente altitudinal de los niveles de agua con respecto al nivel medio del mar, empujando la interfase salina (agua sódico – clorurada) a mas de 50 metros por debajo del mismo en el área de recarga, constituyendo un espesor de agua dulce útil para la sociedad.

Si bien la cantidad de agua almacenada puede cubrir las necesidades crecientes de la población y de las actividades productivas, la calidad de agua se encuentra amenazada dada la alta vulnerabilidad del acuífero a los contaminantes que se generan y que puede comprometer la sustentabilidad del desarrollo de la región metropolitana y área de influencia en el mediano y largo plazo.

Existe una fuerte polarización socioeconómica en la zona geohidrológica, en donde la zona metropolitana de Mérida y su área de influencia han sido sometidas a un acelerado proceso de expansión urbana y de especialización económica, que ha provocado impactos desiguales en el resto de la entidad.

En la zona metropolitana de Mérida se concentra el 57% de la población total y casi 60% de la población urbana del estado, cuenta con los mejores niveles de bienestar y calidad de vida, así como de equipamiento y servicios en materia de educación, salud, servicios bancarios, empleo, transporte, vialidad, abasto, comercio, deporte, vivienda, servicos de agua potable, drenaje, electrificación, entre otros, mientras que en las localidades rurales que completan la integración de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes, al estar dispersas se dificulta la dotación de servicios, particularmente en los Municipios de Abalá, Tahmek, Timucuy, Ixil, Tecoh, Acanceh y Timucuy, entre otros, donde se presentan procesos de hacinamiento, pobreza, exclusión y marginación que limitan las posibilidades de desarrollo humano, particularmente en aquellos grupos vulnerables, como las mujeres, niños, ancianos, personas con alguna discapacidad, así como la población indígena.

Existe una fuerte ocupación del territorio en donde predomina la vegetación secundaria, seguida de planteles agropecuarios de baja productividad y la mayor urbanización del Estado. Lo anterior representa un fuerte riesgo para las sociedades rurales, los espacios agropecuarios y las reservas ecológicas, las cuales enfrentan la urbanización sin contar

con alternativas viables de desarrollo y con severas restricciones de suelo para el crecimiento urbano. Las zonas costeras cercanas a las ciudades, como es el caso de Puerto Progreso a Telchac Puerto, han sufrido procesos acelerados de urbanización al funcionar como polos turísticos altamente atractivos para la inversión. La sinergia entre las actividades económicas del corredor Mérida-Progreso requiere definir una política regional que por un lado controle las expectativas de urbanización sobre el citado corredor, y por otro, potencie el papel de Puerto Progreso en la economía regional.

Desde 1995, la actividad agrícola ha dejado de ser una de las principales fuerzas económicas en la zona debido a que ha asumido un rol urbano predominante que enfoca la ocupación de la PEA hacia actividades terciarias, sin embargo, aún persiste la actividad agrícola y pecuaria en: Ucú, Baca, Mocochá, Conkal, Tahmek, Timucuy, Tekom, Tixmehuac y Abalá, entre otras. La Zona Metropolitana de Mérida también concentra gran parte de la industria maquiladora, y es la que ocupa el mayor número de PEA en el sector secundario (67.5%). El sector servicios es el más dinámico en los municipios con mayor influencia metropolitana, en Mérida el 70.6% de su PEA se ocupa principalmente en el comercio y turísmo, lo mismo que Kanasín y Progreso. En este último municipio la actividad pesquera concentra el mayor dinamismo. La terciarización de las actividades económicas de la región es un fenómeno evidente e inevitable al ir creciendo día con día las relaciones funcionales de los municipios periféricos de la zona metropolitana.

En cuanto al uso del agua, dentro de las diferentes regiones económicas de la Península de Yucatán y su entorno regional a nivel peninsular (Lutz et al, 2000), la Zona Metropolitana de la Ciudad de Mérdia es la región más pequeña de la Península, con apenas 1,636 km^2, pero la más poblada de todas con 658,452 habitantes, lo que representa la mayor densidad poblacional (402 hab./km^2). Ocupa el tercer lugar en cuanto a número de analfabetas y su población económicamente activa es también la más alta, donde sólo el 5% se dedica al sector primario y el 66% al terciario. El 25% de su población ocupada recibe hasta 1 salario mínimo, constituyéndose como la segunda región más rica de la península. La profundidad al manto freático es de 13 m y se considera somero.

Esta zona metropolitana desde el año 1995, posee el tercer lugar en número de aprovechamientos registrados, con 1,191 de los cuales 45% son para actividad agrícola, principalmente bombas tipo centrífuga y que, a través de norias, riegan una superficie de 25 km^2, con un volumen extraído de 26 Mm^3/año, valores considerados como bajos. Su producción agrícola ocupa el noveno lugar y la superficie cosechada lo ubica en el décimo lugar peninsular, de los más bajos. Tiene la mayor producción de pastos y la segunda en henequen. La superficie agrícola en desarrollo es la más baja de la península y se da en henequen, pastos y naranja. Presenta el menor rendimiento agrícola per cápita con riego permanente y temporal. Ocupa el tercer lugar en cuanto al volumen de agua usada con 0.26 Mm^3/km^2/año y ocupa el primer lugar en rendimiento agrícola sin riego con 190 ton/km^2. La calidad de las aguas subterráneas en esta región excede la norma oficial para nitratos, nitritos, conductividad eléctrica, coliformes fecales y totales.

Las áreas rurales de la zona geohidrológica del anillo de cenotes representan la tercera región con mayor población a nivel peninsular, la cuarta más densamente poblada (36.4 hab./km^2) y es la segunda con más población analfabeta. Es la tercera región con el mayor porcentaje de su población económicamente activa dedicada al sector primario. Presenta los procesos emigratorios o de expulsión de población más fuertes de la península. La población esta conformada principalmente por ancianos y jóvenes, por lo

que su fuerza laboral es muy baja. Es la segunda región más pobre donde el 58% recibe hasta 1 salario mínimo y sólo el 1.2 % recibe más de 5 salarios mínimos. Con una profundidad al manto freático similar al anterior, tiene mayor número de aprovechamiento (con 2,298) de los cuales el 82% son para la actividad agrícola. Las bombas son principalmente del tipo centrífuga, para regar una superficie de 95 km^2, colocándose como el tercer consumidor de agua más grande con una extracción de 100 Mm^3/km^2/año en el sector primario, en su mayoría a partir de norias. Esta región presenta la producción de henequen más alta de la península y el cuarto productor de naranja. Presenta la superficie en desarrollo agrícola en henequen y naranja más alta de la península. Tiene el mayor rendimiento agrícola con riego temporal de 151.8 ton/km^2, y el menor rendimiento sin riego de 36 ton/km^2, así como el menor rendimiento per cápita con 0.75 ton/PEA. Sus aguas subterráneas exceden las normas de calidad para cloruros y conductividad eléctrica.

Tabla VII.20).- Indicadores más importantes del uso del agua en la zona geohidrológica del anillo de cenotes (línea base de 1995, ver Lutz et al 2000).

	Concepto / Región	Metropolitana	Rural
1	Población total de hab.	658,452	248,022
2	PEA/primario	10,763	33,424
3	PEA/superficie cosechada ocupación espacial PEA/Km2	109.9	47.81
4	Volúmen de agua agrícola Mm3/Año	26.52	90.58
5	Superficie regada Km2	25.47	93.74
6	Superficie agrícola cosechada o cultivos con riego permanente Km2	7.17	30.85
7	Producción agrícola con riego permanente Ton/Año	1,879.8	7,515.3
8	Rendimiento agrícola con riego permanente Ton/Km2	262.17	243.6
9	Rendimiento individual Ton/PEA	2.38	5.09
10	Cultivos temporales que usan riego Km2	18.3	62.89
11	Producción agrícola cultivos temporales con riego Ton.	1,938.3	9,549
12	Rendimiento agrícola cultivos temporales con riego Ton/km2	105.92	151.8
13	Rendimiento individual Ton/PEA	0.96	3.17
14	Eficiencia terminal cultivos con riego Ton/Mm3/Año	143.9	188
15	Volúmen de agua utilizado por ocupación espacial Mm3/Km2/Año	1.04	0.96
16	Volúmen ocupado por PEA m3/PEA/Año	9,474.2	20,211
17	Cultivos que no usan Riego Km2	72.38	605.35
18	Producción agrícola que no usan riego Ton.	13,754.3	21,925.7
19	Rendimiento agrícola que no usan riego Ton/Km2	190.02	36.22
20	Rendimiento individual Ton/PEA	1.72	0.75
21	Cultivos que usan zonas inundables km2		
22	Producción en zonas inundables Ton.		
23	Rendimiento agrícola en zonas inundables Ton/Km2		
24	Rendimiento individual Ton/PEA		
25	Superficie agrícola cosechada total Km2	97.85	699.09
26	Producción agrícola total Ton.	17,572.41	38,990
27	Rendimiento total Ton/Km2	179.58	55.7
28	Rendimiento individual Ton/PEA	1.63	1.16
29	Volúmen agua usado ocupación espacial	0.26	0.12

	Concepto / Región	Metropolitana	Rural
	Mm3/Km2/Año		
30	Volúmen usado por PEA: m3/PEA/Año	2,443.66	2,710.6
31	Eficiencia terminal promedio: Ton/Mm3/Año	662.6	430

El desarrollo en la zona ha generado grandes pasivos ambientales degradando los bienes y servicios que brindan los ecosistemas contenidos en la zona geohidrológica. En la zona de recarga del acuífero y en todas aquellas áreas agrícolas, el uso y abuso de agroquímicos, como fertilizantes, pesticidas y herbicidas, han generado no sólo contaminación a las aguas subterráneas, con posibilidades de afectar los balnearios naturales como los cenotes, sino que se presentan en grandes cantidades, en ocasiones superando las normas oficiales en cuanto a límites permisibles, en sangre y leche materna, tanto en personas sanas como en mujeres con cáncer cervicouterino y mamario, en municipios que van desde Progreso en la costa hasta Kanasín y Umán, por mencionar a algunos. La actividad pecuaria (porcícola, aunado a la avícola) también genera grandes cantidades de aguas residuales en las áreas rurales de la región incluyendo en muchos casos áreas urbanas.

La urbanización es otro factor que ha generado fuertes niveles de contaminación al agua subterránea, particularmente en el área de tránsito de la zona geohidrológica debido al crecimiento expansivo inmobiliario basado en sistemas de tratamiento de aguas residuales ineficientes, o en ocasiones a través de sumideros descargando esta agua directamente al acuífero. La limpieza de las fosas sépticas y las aguas de nixtamal que se generan en todos los municipios de la región tampoco tienen un tratamiento adecuado, si bien en Mérida existe actualmente una planta de tratamiento, en el resto de los municipios de la zona se disponen en los tiraderos a cielo abierto en donde se depositan los residuos sólidos urbanos y que, junto con los lixiviados que estos tiraderos a cielo abierto generan, acumulan concentraciones grandes de contaminantes que se infiltran al acuífero, incluyendo metales pesados, como mercurio, cadmio, plomo, zinc y arsénico. En las áreas industriales también se generan cantidades de aguas residuales de varios de sus procesos que también son dispuestos de forma no adecuada, generando fuerte contaminación, aunado en que muchas de ellas se utilizan solventes, que son residuos peligrosos, y que se encuentran presentes en las aguas subterráneas. Todo lo anterior pone en grave riesgo la calidad del agua que se surte a la población por parte de los organismos operadores de agua potable, quienes sólo identifican la presencia de contaminantes como bacterias coliformes fecales o enterococos en el agua.

La zona costera, como área de descarga, recibe todos estos contaminantes que se adicionan a los que localmente se generan, tanto en sus áreas urbanas – veraniegas, como en las áreas industriales pesqueras. Los humedales costeros se encuentran afectados en sus capacidades funcionales por los diversos impactos que el desarrollo ha generado sobre ellos, aunado a los impactos naturales como huracanes, por lo que su capacidad para asimilar y procesar las aguas vertidas por manatiales es baja, propiciando con esto una contaminación y sobrefertilización en las aguas litorales creando condiciones para florecimientos algales nocivos, conocidos como marea roja, cada ves más frecuentes, y que impactan fuertemente a la actividad pesquera y turística.

Es posible afirmar entonces, que en la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes, y particularmente de la región metropolitana, los servicios ambientales de soporte, que son aquellos necesarios para la producción de los demás servicios, se encuentran muy afectados, particularmente las áreas de recarga y descarga del acuífero por la presencia de contaminantes, aunado a la degradación del habitat de selva y de manglares que

amenaza la vida silvestre y acuática útil para la sociedad, así colmo la generación de materia orgánica vía detritus, base de cadenas alimenticias.

Del mismo modo, los servicios de provisión, particularmente el agua para consumo humano y para riego se están comprometiendo por los niveles de contaminación ademas de la posible salinización en las áreas cercanas de la costa, afectando la producción de alimentos, particularmente pesqueros y agrícolas.

En cuanto a los servicios de regulación, los más afectados son sin duda, aquellos relacionados con la capacidad de depuración de masas de agua por la erosión generalizada que se presenta en la zona geohidrológica y la exportación de sedimentos en las lagunas costeras hacia la zona litoral y la degradación del ecosistema del manglar y sabanas, que además disminuyen mucho la capacidad de controlar inundaciones y proteger contra tormentas y huracanes, aunado a la gran extensión de suelo impermeabilizado en las zonas urbanas que afecta la capacidad de drenaje. Si bien el control del gradiente hidráulico no se encuentra amenazado, si es necesario vigilar el comportamiento de los dragados en Puertos de Abrigo, como el de Yucalpetén, canal de acceso al Puerto de Altura de Progreso, las extracciones de piedra caliza de forma comercial en áreas cercanas a la costa, así como la presencia del domo de agua que se forma en el acuífero por los vertidos de agua residual en la zona metropolitana y los conos de abatimiento en los campos de extracción de agua potable, en particular en los pozos de la JAPAY I, en la Reserva de Cuxtal, que pudiera generar contracorrientes subterráneas, particularmente en temporada de secas aunado al escaso gradiente que se presenta en el área de recarga al sureste, conocida como zona de alta variabilidad hidráulica.

Todo lo anterior pone en riesgo los beneficios materiales y no materiales que los ecosistemas contenidos en la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes, particularmente en la región metropolitana, brindan a la sociedad en materia de experiencias recreativas en cenotes y playas, así como espirituales y cognitivas por la degradación del paisaje y la diversidad biológica, afectando la resiliencia y capacidad adaptativa de la sociedad en su conjunto para enfrentar los cambios cuantitativos y cualitativos que estan ocurriendo, incrementando su vulnerabilidad en la perspectiva de los cambios climáticos que se predicen.

En términos de la relación entre naturaleza, desarrollo económico regional y la distribución de la población, es interesante hacer notar que se ha considerado al agua como un elemento pasivo, que recibe la mayor influencia de los demás a través de la contaminación. Debido entonces a que el agua, como recurso limitante para el desarrollo, presenta una alta vulnerabilidad, se justifica la necesidad de elaborar una planeación integral de las zonas geohidrológicas.

Es por tanto importante fortalecer la red de monitoreo de aguas subterráneas peninsulares mediante la instrumentación de estaciones de registro de la calidad de agua y el aforo de descargas y de los principales procesos costeros; esta acción permitiría ajustar los balances actuales, controlar el desequilibrio de la interfase marina y el avance de la intrusión marina, de tal manera que los volúmenes de agua puedan protegerse para preservar su calidad y las necesidades del ambiente.

De igual forma, la actividad pesquera se ha insertado en las cadenas productivas industriales de la región de manera importante. La inversión en el sector pesquero ha

desencadenado un efecto multiplicador a gran escala que absorbe una fuerte cantidad de mano de obra, reteniendo población, principalmente proveniente de la región henequenera en el anillo de cenotes. Esto tiene que ver con su capacidad amortiguadora que coloca a dicho sector pesquero como un actor principal en el desarrollo regional. De ahí la importancia de elaborar un plan que incluya la actividad pesquera (como elemento amortiguador), a través del manejo del agua (elemento pasivo) y que se extienda hacia el interior para dar sustentabilidad a la actividad agrícola y pecuaria (elemento crítico que tiene una gran influencia sobre las demás actividades y principal fuente de impacto en la región); asimismo, es importante regular las actividades y las emisiones contaminantes del sector industrial y de servicios, factor de desarrollo regional (elemento activo capaz de arrastrar la economía regional), además de controlar el crecimiento urbano.

IX).- PROGRAMA HÍDRICO ESPECIAL DE LA ZONA GEOHIDROLÓGICA DEL ANILLO DE CENOTES DEL ESTADO DE YUCATÁN.

El Programa Hídrico Especial de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes del Estado de Yucatán tiene la finalidad de garantizar y promover el uso responsable y eficiente del agua, de forma integral y sustentable, como medio para la recuperación de los servicios ambientales de los ecosistemas que contiene la zona geohidrológica y cuyos beneficios se distribuyan lo más ampliamente posible para el bienestar humano.

El Programa se enfocará hacia el manejo integrado de la zona geohidrológica enfatizando en los siguientes temas estratégicos:

1).- Gobernanza para el manejo integral de la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

2).- Planeación hídrica regional y desarrollo urbano, social y económico sustentable.

3).- Fondo ambiental para el desarrollo de mecanismos compensatorios para la restauración y mantenimiento de servicios ambientales.

4).- Conservación y recuperación de los servicios ambientales de las áreas de recarga en los ecosistemas de selva y cenotes y en áreas de descarga de humedales costeros, así como en las áreas de escurrimiento subterránea urbanizadas.

5).- Identificación de fuentes de contaminación y control de descargas de aguas residuales y lixiviados hacia el agua subterránea.

6).- Investigación y desarrollo tecnológico para la gestión y valoración de servicios ambientales tangibles e intangibles.

IX.1).- Misión y Visión del Programa Hídrico Especial de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes del Estado de Yucatán.

Misión

Asegurar arreglos interinstitucionales que garanticen la transversalidad de políticas públicas que promuevan, desde una perspectiva de manejo integral de la zona geohidrológica, el fomento de los servicios ambientales de los ecosistemas para que los beneficios derivados de estos se repartan equitativamente entre la población.

Visión

La Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes, para el año 2030, ha incrementado su resiliencia social y ambiental asegurando un desarrollo sustentable y armónico basado en los servicios ambientales, con equidad de género, con procesos incluyentes y distributivos de la riqueza generada en un entorno de justicia social y respetuosa de los derechos humanos.

IX.2).- Coherencia entre el diagnóstico y los temas estratégicos.

Tema Estratégico 1.- Gobernanza para el manejo integral de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes.

Promover una visión integral entre los órdenes de gobierno con los sectores privado, social y académico para el desarrollo de la zona geohidrológica.

Incentivar la participación de grupos u organizaciones civiles, a través de procesos de participación que resulten en la implementación de proyectos o actividades en beneficio de la sociedad.

Impulsar la aplicación de normativas que permitan el desarrollo con una visión integral que fomenten el bienestar humano y potencien el beneficio de los servicios ambientales que proven los ecosistemas contenidos en la zona geohidrológica.

Objetivo

Mejorar y desarrollar nuevos mecanismos de coordinación intermunicipal y con los otros ordenes de gobierno para la gestión hídrica de la zona geohidrológica del anillo de cenotes, fomentando la participación de los diferentes sectores de la sociedad.

Indicadores, línea base y metas

Nombre	Unidad de medida	Línea base 2012	Meta 2030	Fuente
01-01.Municipios que cuentan con Programa de Desarrollo Urbano Municipal y de centros de población	Número de Municipios con PDU publicado e inscrito en el Registro Público de la Propiedad	4	15	SEDUMA
01-02. Alianza intermunicipal para la gestión ambiental de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Número de Municipios incorporados en una alianza intermunicipal para la gestión hídrica integral.	0	20	SEDUMA
01-03. Municipios que cuentan con Carpetas Básicas sobre Leyes, Normas y Reglamentos para la gestión integral del agua	Municipios que cuentan con la Carpeta Básica	0	58	SEDUMA
01-04 Comités de Usuarios de Recursos Naturales que participan en la Alianza Intermunicipal	Número de Comités de Usuarios establecidos participando en la Alianza Intermunicipal	0	20	SEDUMA
01-05 Censo de pozos de uso doméstico e hidroagricola	Base de datos de Número de pozos registrados		1	CONAGUA, JAPAY, SEDER

Estrategia 1.1.- Promover una visión integral entre los órdenes de gobierno con los sectores privado, social y académico para el desarrollo de la zona geohidrológica.

Líneas de acción

1.1.1.- Promover la celebración de un convenio de coordinación intermunicipal y estatal para que las Juntas Municipales de Agua Potable y del Estado constituyan un Organismo Público Descentralizado Intermunicipal que tenga las funciones de organismo operador de agua.

1.1.2.- Fomentar que este organismo operador intermunicipal tenga objetivos, atribuciones, estructura, administración y las reglas de operación definidas en un Reglamento respectivo.

1.1.3.- Prever que el organismo operador preste los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales así como el saneamiento y mantenimiento de los servicios ambientales de la zona geohidrológica metriopolitana de los municipios que comprenda, de acuerdo a las reglas y condiciones previstas en el convenio que celebren los respectivos municipios.

1.1.4.- Favorecer la gestión cualitativa de las aguas subterráneas junto con las dependencias de la Administración Pública Federal y Estatal competentes mediante el control de vertimiento de contaminantes orgánicos, sitios de disposición de residuos sólidos, plantas de tratamiento de agua en desarrollos inmobiliarios y turísticos, granjas porcícolas y avícolas, residuos tóxicos y peligrosos en zonas industriales, fertilizantes, pesticidas y plaguicidas utilizados en la agricultura, así como el funcionamiento adecuado de fosas sépticas y biodigestores, detección y clausura de sumideros y tratamiento de aguas y lodos de fosas sépticas, aguas de desecho industriales y aguas de nixtamal así como las aguas de los sanitarios portátiles, contribuyendo a garantizar agua limpia en las zonas de recarga y disminuir los contaminantes a la zona de descarga costera, prevención de mareas rojas y mejoramiento del hábitat para las pesquerías.

1.1.5.- Identificar incompatibilidades entre programas de gobierno que generen conflictos por el uso de suelo y agua para alinear políticas compatibles con la conservación de los servicios ambientales, aprovechamiento sustentable y el desarrollo comunitario en la zona geohidrológica.

Estrategia 1.2.- Incentivar la participación de grupos u organizaciones civiles, a través de procesos de participación que resulten en la implementación de proyectos o actividades en beneficio de la sociedad.

Líneas de acción

1.2.1.- Impulsar que el organismo público descentralizado municipal o intermunicipal del agua participe activamente en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas de la zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes (COTASMEY), donde están representados los diversos sectores que aprovechan el recurso, como el agropecuario, agrícola, industrial, turístico, inmobiliario, pesquero, centros de investigación y organizaciones de la sociedad civil, entre otros.

1.2.2.- Fomentar que el organismo operador celebre acuerdos con la actividad empresarial, que contribuya a la inversión de construcción de infraestructura hidráulica en viviendas con el mínimo costo y el máximo beneficio ambiental.

1.2.3.- Fomentar que el organismo operador celebre acuerdos o convenios de coordinación con las dependencias de la Administración Pública Federal y Estatal para realizar programas integrales para el desarrollo de la infraestructura hidroagrícola dentro de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes, particularmente en la región metropolitana, cuidando en todo momento los servicios ambientales que prove y regula el agua que sirve en calidad y cantidad, así como el uso en cantidad y calidad de agroquímicos y de sustancias tóxicas y peligrosas como pesticidas y herbicidas que afecten la calidad de las aguas de la zona geohidrológica.

1.2.4.- Promover que el organismo operador celebre convenios con los productores agropecuarios para realizar obras y acciones para el desarrollo sustentable de los sistemas de riego y la protección de la zona geohidrologica del Anillo de Cenotes y región metropolitana y sus servicios ambientales que presta.

Estrategia 1.3.- Impulsar la aplicación de normativas que permitan el desarrollo con una visión integral que fomenten el bienestar humano y potencien el beneficio de los servicios ambientales que proven los ecosistemas contenidos en la zona geohidrológica.

Líneas de acción

1.3.1.- Impulsar la aprobación de la Ley Estatal de Agua, así como de las regulaciones necesarias para la implementación de un marco legal que regule el aprovechamiento y protección de los servicios ambientales que brindan los ecosistemas contenidos en la zona geohidrológica.

1.3.2.- Reglamentar la operación, clausura y reubicación de las lagunas de oxidación actuales para el tratamiento de lodos y agua de fosas sépticas y aguas de nixtamal y baños portátiles y consolidar el nuevo sistema de tratamiento instalado en la Cd. de Mérida que de cumplimiento a la Normatividad vigente para el tratamiento de estos residuos.

1.3.3.- Elaborar un reglamento para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales para fomento de infraestructura hidráulica, que pueda escalar desde biodigestores con separación de aguas grises y negras que viertan a campos de infiltración y/o conduzcan hacia cárcamos de acopio, pretratamiento y transferencia a plantas de tratamiento que manejen grandes volúmenes de agua que aseguren su rentabilidad, relacionadas a desarrollos inmobiliarios o industriales, procurando el reuso del agua para riego o procesos industriales.

1.3.4.- Elaborar un reglamento para el manejo de aguas y lodos de registros pluviales, para el manejo de aguas y lodos provenientes de la limpieza de fosas sépticas, manejo de aguas provenientes de la industria del nixtamal, industriales, agroindustriales y de baños portatiles así como para regular a los prestadores de los servicios de recolección y transporte.

1.3.5.- Fomentar el desarrollo y reglamentación de nuevos prototipos de manejo de aguas pluviales mediante jardines de lluvia y campos de infiltración, así como la de diseñar y construir más calles que funcionen como áreas de recarga del acuífero, disminuyendo áreas asfaltadas.

1.3.6.- Realizar una identificación de domicilios y/o actividades cuyo sistema de captación sea a través de pozos y no del servicio público, para su regularización, así como su sistema de disposición y drenaje de sus aguas servidas sea a través de pozos o sumideros y cavernas de manera directa y fomentar su reconversión a uso de biodigestores o sistemas sépticos colectivos.

1.3.7.- Elaborar un reglamento que establezca sistemas de protección espacial de seguridad de los campos de pozos periurbanos para el agua potable, así como una norma técnica para la construcción y perforación de pozos con ademes adecuados.

1.3.8.- Fomentar la celebración de convenios o acuerdos para la creación y gestión de reservas hidrológicas que aseguren regulaciones para la prevención de la contaminación y aseguren el vital liquído en el largo plazo.

Tema Estratégico 2.- Planeación hídrica regional y desarrollo urbano, social y económico sustentable.

Promover procesos de planeación que permita aplicar las políticas, estrategias, objetivos, programas y normas que conlleven a la preservación y conservación de las aguas de jurisdicción nacional y estatal y los servicios ambientales de la zona geohidrológica metropolitana.

Objetivo

Promover una planeación hídrica estatal que tenga como sustento los principios de participación democrática previstos en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en la Constitución Política del Estado de Yucatán y en la Ley Estatal de Planeación.

Indicadores, línea base y metas

Nombre	Unidad de medida	Línea base 2012	Meta 2030	Fuente
02-01 Diagnóstico recurrente del Programa Hídrico Especial de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Actualización de documento y publicación en Diario Oficial	0	3	SEDUMA / COTASMEY
02-02. Definir la disponibilidad de agua de la zona geohidrológica Anillo de Cenotes de acuerdo con la NOM-011-CNA-2000	Documento publicado en Diario Oficial	0	2	SEDUMA, CONAGUA, COTASMEY

02-03. Elaborar norma técnica estatal para el diseño de pozos	Documento publicado en Diario Oficial	0	3	SEDUMA, JAPAY, CONAGUA
02-04. Elaborar la Ley Estatal de Agua	Documento publicado en Diario Oficial	0	1	SEDUMA, JAPAY

Estrategia 2.1.- Promover procesos de planeación que permita aplicar las políticas, estrategias, objetivos, programas y normas que conlleven a la preservación y conservación de las aguas de jurisdicción nacional y estatal y los servicios ambientales de la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

Líneas de acción

2.1.1.- Desarrollar a largo plazo el Programa Hídrico Especial de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes para la gestión integrada de los recursos hídricos con base en diagnósticos recurrentes cada 3 años de la situación actual y prospectiva del recurso, evaluación participativa de alternativas y distribución de responsabilidades en el ámbito federal, estatal y municipal, debiendo prever las políticas y estrategias que se observarán en materia hídrica para la zona geohidrológica con una proyección mínima de veinticinco años, incluyendo consideraciones sobre cambio climático y los métodos de remediación y control de la intrusión salina.

2.1.2.- Definir la disponibilidad media anual del acuífero dentro de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes de acuerdo a la NOM-011-CNA-2000, que establece la metodología para tal efecto.

2.1.3.- Promover, a través del COTASMEY, la gestión cuantitativa del agua en la zona geohidrológica en periodos de estiaje o en periodos de años secos que implica una menor recarga al manto freático, concentración de sales y problemas de intrusión salina, en la perspectiva de cambio climático.

2.1.4.- Orientar los servicios de agua potable y de saneamiento a las áreas de desarrollo en la zona geohidrológica, mediante una correcta planeación del crecimiento urbano, industrial y agropecuario.

Tema estratégico 3.- Fondo ambiental para el desarrollo de mecanismos compensatorios para la restauración y mantenimiento de servicios ambientales.

Promover mecanismos financieros transparentes que permitan apoyar acciones de saneamiento de la zona geohidrológica y valoración económica de los servicios ambientales de los ecosistemas contenidos en ella.

Objetivo

Fomentar esquemas transparentes de financiamiento y de participación social que aseguren el saneamiento integral de la zona geohidrológica y generen oportunidades de empleos.

Indicadores, línea base y metas

Nombre	Unidad de medida	Línea base 2012	Meta 2030	FUENTE
03-01. Generar la Matriz de Contabilidad Social en los Municipios de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Número de Municipios que cuentan con MCS para la planeación económica	4	25	SEDUMA
03-02. Generar la matriz de insumo – producto relacionada al agua en la zona geohidrológica del anillo de cenotes	Matriz de insumo – producto regional	0	1	SEDUMA
03-03. Desarrollo de un Observatorio del Agua en la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Un istema de información geográfica interactivo funcionando en medios electrónicos	0	1	SEDUMA / COTASMEY / CONAGUA / JAPAY
03-04. Grupos productivos del agua y servicios ambientales con equidad de genero	Grupos organizados de producción con perspectiva de genero	0	10	SEDUMA

Estrategia 3.1.- Promover mecanismos financieros transparentes que permitan apoyar acciones de saneamiento de la zona geohidrológica y valoración económica de los servicios ambientales de los ecosistemas contenidos en ella.

Líneas de acción

3.1.1.- Plantear objetivos y metas generales que orienten a la sociedad respecto a la problemática hídrica en la zona geohidrológica del anillo de cenotes para crear una nueva cultura que considere al agua como un elemento vital, escaso y de valor económico, social y ambiental.

3.1.2.- Mantener actualizado el inventario de aguas en pozos, norias, cenotes, manantiales, zonas de inundación temporal y permanente en selvas bajas, sabanas y lagunas costeras de la zona geohidrológica y clasificarlas de acuerdo a sus usos.

3.1.3.- Crear mecanismos en la zona geohidrológica del anillo de cenotes para el pago por servicios ambientales en las áreas de recarga, escurrimiento y descarga del acuífero provenientes de ingresos, créditos, aportaciones y otros, que aseguren la protección, restauración y saneamiento a través del fondo ambiental implementado por la Secretaría de Desarrollo Sustentable (antes SEDUMA) promoviendo fondos concurrentes con organizaciones de la sociedad civil y dependencias del ámbito federal, que permita asimismo la construcción de drenajes, plantas de tratamiento y biodigestores para garantizar servicios de calidad y al alcance de todos los habitantes, particularmente en aquellas localidades en que se presente fecalismo al aire libre y granjas porcícolas y avícolas.

3.1.4.- Desarrollar un Observatorio del Agua en la zona geohidrológica del anillo de cenotes que permita transparencia y participación social en la gestión y administración hídrica regional.

3.1.5.- Fomentar nuevas oportunidades de empleo para la supervisión y asesoría en el diseño, construcción, operación, mantenimiento e inspección de sistemas de tratamiento de aguas residuales individuales o colectivas, de rejillas y pozos de drenaje pluvial, alcantarillado, así como en restauración, conservación y mantenimiento de servicios ambientales en áreas de recarga y descarga del acuífero de la zona geohidrológica.

Tema estratégico 4.- Conservación y recuperación de los servicios ambientales de las áreas de recarga en los ecosistemas de selva y cenotes y en áreas de descarga de humedales costeros, así como en las áreas de escurrimiento subterráneo urbanizadas.

Restaurar y conservar los ecosistemas de selva baja y cenotes en el área de recarga y y aquellos sitios asociados a conductos preferenciales de agua subterránea del anillo de cenotes.

Restaurar y conservar ecosistemas de humedales en manglares, sabanas y selvas inundables en el área de descarga del acuífero

Mantener las condiciones del gradiente hidráulico de la zona geohidrológica lo mas favorable posible para evitar reversiones o contracorrientes indeseables en los flujos naturales del agua subterránea de la región metropolitana.

Objetivo

Potenciar los servicios ambientales de la zona geohidrológica mediante acciones de restauración, conservación y mantenimiento de los ecosistemas contenidos en ella.

Indicadores, línea base y metas

Nombre	Unidad de medida	Línea base 2012	Meta 2030	FUENTE
04-02. Kilómetros de playas con deterioro sujetas a recuperación en la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Km playas con deterioro/Km de playas recuperadas	42.50 / 0.00	42.50 / 40.00	SEDUMA
04-02. Hectáreas de manglar con deterioro y acondicionadas para restauración	Ha de manglar con deterioro/Ha de manglar recuperadas	12,764 / 1,590	12,764 / 6,000	SEDUMA
04-03. Número de manantiales desazolvados	Número de manantiales	10	125	SEMARNAT
04-04- Número de cenotes saneados.	Número de cenotes	16	75	SEDUMA
04-05. Hectáres de selva con deterioro y acondicionadas para su restauración	Ha de selva reforestada	100	3,500	SEDUMA
04-06. Monitoeo de interfase salina en campos de pozos para dotación de agua potable	Sistemas de monitoreo operando	0	4	JAPAY
04-07. Cloración de agua potable en servicios públicos urbanos municipales	Porcentaje de Municipios que cloran el agua potable	81%	100%	COFEPRIS

Estrategia 4.1.- Restaurar y conservar los ecosistemas de selva baja y cenotes en el área de recarga y y aquellos sitios asociados a conductos preferenciales de agua subterránea del anillo de cenotes.

Líneas de acción

4.1.1.- Promover acciones de restauración y mantenimiento de selvas y cenotes en coordinación con entidades de los tres órdenes de gobierno, productores locales, instituciones educativas de todos los niveles y sociedad civil,

4.1.2.- Fomentar actividades de recuperación y reforestación de selva en áreas deforestadas y/o degradadas para fortalecer el mantenimiento del microclima, la formación de suelo que incremente su capacidad de retener agua y drenarla al subsuelo de forma gradual y favorecer la recarga de las aguas pluviales al manto freático a la ves que conservar el hábitat de vida silvestre y acuática y la biodiversidad útil para la sociedad.

4.1.3.- Fomentar la limpieza y saneamiento de los cenotes y grutas o cavernas de residuos sólidos y establecer controles para impedir escurrimientos superficiales indeseables que viertan hacia los cenotes.

4.1.4.- Fomentar en aquellos cenotes que tienen un uso turístico o recreativo la colocación de contenedores para el manejo de residuos sólidos urbanos.

Estrategia 4.2.- Restaurar y conservar ecosistemas de humedales en manglares, sabanas y selvas inundables en el área de descarga del acuífero.

Líneas de acción.

4.2.1.- Realizar gestiones ante las instituciones de los tres órdenes de gobierno y la coordinación con los diferentes centros educativos y de la sociedad civil para promover acciones de rehabilitación y conectividad hidráulica para consolidar la depuración de masas de agua provenientes de las áreas urbanizadas y agropecuarias que se encuentran al interior de la zona geohidrológica y asegurar el hábitat terrestre y acuático para la vida silvestre y los recursos pesqueros, conservar la biodiversidad y el paisaje para la actividad ecoturística y el transporte por agua.

4.2.2.- Fomentar la limpieza y desazolve de cenotes costeros y manantiales, así como canales de drenaje para favorecer la descarga y distribución de agua subterránea y mejorar las condiciones de salinidad y temperatura y asegurar los aportes de nutrientes básicos para el desarrollo de la vegetación en ciénagas y sabanas.

4.2.3.- Impulsar acciones de reforestación con especies de manglar y otras asociadas en áreas degradadas y sitios en donde la recuperación natural esta impedida con la participación de la sociedad civil.

4.2.4.- Fomentar acciones de prevención y control de incendios forestales en sabanas y selvas inundables derivados de causas humanas en coordinación con las autoridades del

Comité Estatal para la Prevención de Incendios Forestales y Quemas Agrícolas, coordinada por la Secretaría de Desarrollo Rural y Pesca, junto con la Secretaría de Desarrollo Sustentable (antes SEDUMA) en la Reserva Estatal de Ciénagas y Manglares de la costa norte de Yucatán y la Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes al sur, Dirección de Protección Civil, Bomberos y la Comisión Nacional Forestal para evitar perder la cobertura vegetal.

Estrategia 4.3.- Mantener las condiciones del gradiente hidráulico de la zona geohidrológica lo mas favorable posible para evitar reversiones o contracorrientes indeseables en los flujos naturales del agua subterránea en la región metropolitana.

Líneas de acción.

4.3.1.- Promover que en los procesos de planeación se consideren las diversas alternativas de gestión del recurso hídrico, no sólo en términos de cantidad de agua, sino también su calidad y su evolución en el tiempo, ya que toda reducción de flujo en el área de descarga costero implica una modificación en el balance de sales, con incremento de la salinidad, particularmente cuando existe recarga con aguas residuales o excedentes de riego o se espera una gran dispersión en la zona de la interfase salina.

4.3.2.- Identificar dentro de la zona geohidrológica áreas donde el incremento del bombeo este permitiendo una mayor elevación de la interfase salina o penetración de la cuña salina.

4.3.3.- Fomentar que las extracciones de agua cercanas a la costa sigan las recomendaciones emitidas por la CNA y la Facultad de Ingeniería de la UADY, para que a una distancia entre los 0 y los 5 km de la costa, o elevaciones del nivel estático (en la temporada mas seca, cuando el nivel se encuentra en su mínimo) por debajo de 0.5 msnm, la extracción sea de hasta 5 lps, entre los 5 y 10 km de la costa, o elevaciones mayores a 0.5 msnm pero menores de 0.75 msnm, sea de hasta 10 lps, y entre los 10 y 15 km de la costa, o elevaciones mayores a 0.75 msnm pero menores de 1.15 msnm, sea de hasta 15 lps. Se recomienda también que la separación entre los pozos deba tener una distancia mínima de 500 metros (25 hectáreas por pozo), con lo cual se realiza el cálculo, a partir de la cantidad de agua potable deseada por habitante por día, la densidad de lotes/ cuartos/ apartamentos/ viviendas por hectárea para los desarrollos inmobiliarios, los cuales deberán contar con sistemas de tratamiento de aguas residuales que cubran la totalidad de sus aguas servidas.

4.3.4.- Fomentar la observación periódica de pozos construidos o campos de pozos para el estudio espacial del espesor del acuífero hasta algunos metros por debajo del agua salina con la finalidad de evaluar los conos de abatimento y la modificación de la interfase salina, así como la fluctuación del nivel del agua subterránea, con la finalidad de mejorar su manejo y gestión.

4.3.5.- Evaluar la dinámica de agua subterránea generado por la recarga que presenta la Ciudad de Mérida y zona conurbada con aguas residuales desde las fosas sépticas individuales hacia el acuífero, y considerar la posibilidad de continuar con esta forma de gestión o modificar el modelo de gestión (que pueda implicar instalación de colectores a diferentes escalas, desde biodigestores conectados por alcantarillado a cárcamos de rebombeo que lleven el agua a plantas de tratamiento y sistemas de distribución de agua

residual para el control de la penetración salina), dado el riesgo de generar contracorrientes e incrementar la vulnerabilidad del acuífero y los campos de captación de los pozos de la JAPAY I y II.

4.3.6.- Incentivar los métodos alternativos de captación de agua de lluvia para disminuir la importación de agua subterránea a las ciudades, así como métodos alternativos en pavimentación, principalmente en calles secundarias y terciarias de las diversas localidades de la región metropolitana para incrementar la permeabilidad de la estructura vial y mejorar la infiltración de aguas pluviales y promover la reforestación de parques, jardines y avenidas para incrementar las áreas verdes vinculados con áreas peatonales y ciclovias que pudieran servir como campos de infiltración.

4.3.7.- Promover el cuidado del acuitardo costero que confina el acuífero y regula tanto sus descargas al mar como el gradiente hídrico regional, evaluar los efectos de su modificación por dragados en dársenas y puertos así como por el aprovechamiento de piedra caliza para la industria de la construcción, para aportar elementos de gestión.

4.3.8.- Vigilar los nivles de cloración en los sistemas municipales de agua potable para asegurar la calidad de agua que se surte a la población.

Tema estratégico 5.- Identificación de fuentes de contaminación y control de descargas de aguas residuales y lixiviados hacia el agua subterránea.

Fomentar la coordinación entre dependencias de los tres órdenes de gobierno, Universidades, Tecnológicos, Centros de Investigación y sociedad civil organizada para realizar acciones de identificación de contaminantes y favorecer la inspección y vigilancia del recurso agua.

Fomentar el manejo y gestión adecuados de aguas residuales de uso urbano, industrial y porcícola y avicola para mejorar la calidad de las aguas subterráneas en la zona geohidrológica.

Fomentar el manejo y gestión adecuada de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial para mejorar la calidad de las aguas subterráneas de la zona geohidrológica.

Promover acciones de coordinación entre las autoridades competentes para el control y manejo de residuos tóxicos - peligrosos y biológicos – infecciosos en la zona geohidrológica.

Objetivo.

Ubicar espacialmente todos aquellos contaminantes que afecten al agua derivados de actividades urbanas, agrícolas, pecuarias, industriales y hospitalarios para promover su manejo adecuado y propiciar las acciones de saneamiento necesarias.

Indicadores, línea base y metas

Nombre	Unidad de medida	Línea base 2012	Meta 2030	Fuente
05-01. Volumen de residuos sólidos municipales que son confinados en un sitio que cumple con la Norma NOM-083	residuos sólidos municipales anuales que son confinados en un sitio que cumple con la Norma NOM-083	85 %	95 %	SEDUMA
05-02. Número de granjas porcícolas que cuentan con sistemas de biodigestores para el tratamiento de aguas	Número de granjas	50	500	SEDUMA
05-03. Número de granjas avícolas que cuentan con programa de manejo de residuos de manejo especial.	Número de granjas		55	SEDUMA
05-04. Porcentaje de viviendas sin drenaje en los Municipios de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Valor promedio del Porcentaje de viviendas sin drenaje	85	50	SALUD / INEGI
05-05. Número de municipios que tiene sistemas de acopio de residuos tóxicos peligrosos derivados de la actividad agropecuaria	Número de Municipios con centros de acopio primarios	1	58	SEDUMA
05-06. Porcentaje de muestreos de agua de playas que cumplen con la normatividad de playa limpia	Muestreos de agua de playas que cumplen con la normatividad de playa limpia	95%	100%	COFEPRIS

Estrategia 5.1.- Fomentar la coordinación entre dependencias de los tres órdenes de gobierno, Universidades, Tecnológicos, Centros de Investigación y sociedad civil organizada para realizar acciones de identificación de contamiantes y favorecer la inspección y vigilancia del recurso agua.

Líneas de acción

5.1.1.- Fomentar la realización de convenios de colaboración entre dependencias de gobierno, instituciones de educación y sociedad civil para desarrollar un sistema de información geográfica vinculado al Observatorio del Agua de la zona geohidrológica del anillo de cenotes, que ubique e identifique espacialmente los sitios y/o actividades que generan contaminantes así como su caracterización y nivel de riesgo para la salud humana y del ecosistema.

5.1.2.- Realizar gestiones ante diversos organismos nacionales e internacionales para promover el desarrollo de capacidades institucionales y humanas, así como mejorar el equipamiento básico para el manejo y vigilancia de contaminantes generados por las diversas actividades sociales o productivas así como el saneamiento adecuado de sitios contaminados.

5.1.3.- Difundir leyes, normas o reglamentos entre funcionarios, grupos privados y sociales, así como a la población en general para el manejo adecuados de sustancias tóxicas, peligrosas y biológico infecciosas, así como los derivados de aguas residuales

domésticas e industriales y liquidos derivados de lixiviados en sitios destinados para la disposición de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

Estrategia 5.2.- Fomentar el manejo y gestión adecuados de aguas residuales de uso urbano, industrial y porcícola y avícola para mejorar la calidad de las aguas subterráneas en la zona geohidrológica.

Líneas de acción.

5.2.1.- Elaborar un inventario y diagnóstico de los sumideros, las fosas sépticas, biodigestores, plantas de tratamiento y lagunas de oxidación en áreas urbanas, y veraniegas costeras, así como en las áreas rurales de la zona geohidrológica, con la participación de autoridades de los tres órdenes de gobierno, centros de educación y sociedad civil, para evaluar su funcionamiento y el cumplimiento de la normatividad vigente.

5.2.2.- Identificar aquellas viviendas que carezcan de servicios sanitarios y práctiquen el fecalismo al aire libre en las áreas urbanas, veraniegas costeras y rurales y fomentar junto con el Sector Salud, JAPAY u organismo operador municpal o intermunicipal y CONAGUA la construcción de infraestructura necesaria.

5.2.3.- Identificar las formas y sitios de disposición de lodos derivados de fosas sépticas, lodos derivados de la cerdaza de granja porcícolas y avícolas y lodos derivados de las aguas de nixtamal, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas y fomentar el desarrollo de infraestructura para la implementación de sistemas de tratamiento para los lodos y aguas residuales de dichos sectores.

5.2.4.- Reutilizar el agua residual tratada como materia prima para el riego hidro-agrícola y los lodos inertes como un nutriente y mejorador de suelo para el cultivo agropecuario.

Estrategia 5.3.- Fomentar el manejo y gestión adecuada de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial para mejorar la calidad de las aguas subterráneas de la zona geohidrológica.

Líneas de acción.

5.3.1.- Elaborar un inventario y diagnósticos de los sitios de disposición de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, tanto oficiales como clandestinos, con la participación de entidades municipales y estatales, así como centros de educación y sociedad civil, para evaluar su funcionamiento y cumplimiento de la normatividad vigente.

5.3.2.- Fomentar la regionalización del manejo de residuos sólidos urbanos y de manejo especial para una adecuada recolección, transporte, tratamiento, calsificación y disposición de los mismos, así como mejorar las formas de recolección y los sitios de disposición actuales, promoviendo la separación de reciclables y la elaboración de composta.

5.3.3.- Promover la producción de composta y mejoradores de suelo con los residuos orgánicos derivados de la recolecta domiciliaria, residuos vegetales de parques y jardines,

residuos vegetales de mercados, residuos derivados de la actividad porcícola y avícola, así como los residuos vegetales de playa (comúnmente llamado sargazo) y lodos estabilizados de plantas de tratamiento de nixtamal y plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas para impulsar actividades agrícolas organicas, producción de plantas en viveros y acciones de reforestación.

5.3.4.- Promover acciones de coordinación con autoridades de los tres órdenes de gobierno para la clausura y saneamiento de sitios de disposición a cielo abierto y tiraderos clandestinos.

5.3.5.- Promover el manejo adecuado de residuos de manejo especial como productos de demolición y construcción, residuos agropecuarios, pesqueros, electrónicos, grandes generadores y neumáticos, entre otros, así como la coordinación entre dependencias de los tres órdenes de gobierno, centros de educación, sector privado y social para impulsar el coprocesamiento y reciclamiento de los mismos y su correcto manejo y gestión.

Estrategia 5.4.- Promover acciones de coordinación entre las autoridades competentes para el control y manejo de residuos tóxico - peligrosos y biológico – infecciosos en la zona geohidrológica.

Líneas de acción

5.4.1.- Elaborar un registro de hospitales, clínicas veterinarias, farmacias, laboratorios privados y en centros de investigación y universidades o tecnológicos, rastros, mercados, industrias (particularmente aquellas que procesan alimento como las pesqueras), talleres mecánicos, astilleros y de aquellos microgeneradores de residuos tóxico – peligrosos y biológico – infecciosos, en coordinación con los diferentes órdenes de gobierno para llevar a cabo acciones de supervisión y vigilancia del manejo adecuado de los mismos.

5.4.2.- Promover la construcción de infraestructura para la recolección, el manejo, tratamiento y disposición adecuado de los residuos tóxicos – peligrosos y biológicos – infecciosos.

5.4.3.- Fomentar acciones de prevención que conlleven a la detección y trazabilidad de sustancias tóxicas tanto en ambiente natural como en seres humanos, particularmente aquellos derivados de las actividades agropecuarias (pesticidas y herbicidas) como industriales (solventes, tintes y metales pesados).

Tema estratégico 6.- Investigación, educación y desarrollo tecnológico para la gestión y valoración de servicios ambientales tangibles e intangibles.

Conceptualización

Fomentar acciones de educación formal y no formal para generar una cultura del agua que considere al recurso hídrico como un elemento vital, escaso y de valor económico, social y ambiental.

Fomentar capacidades técnicas, humanas y administrativas en el sector público y privado para la prevención de la contaminación y el saneamiento integral de la zona geohidrológica.

Impulsar la participación de centros de investigación, universidades y tecnológicos para desarrollar estudios e investigaciones tendientes al manejo sustentable de la zona geohidrológica, prevenir la contaminación y desarrollar tecnología que eficientize el tratamiento de las aguas residuales y remediación de áreas contaminadas.

Objetivo de desarrollo

Promover la participación de la sociedad en su conjunto y las áreas generadoras de conocimiento para fomentar una cultura del agua que modifique las actitudes actuales en las formas de uso y aprocechamiento del vital recurso.

Indicadores, línea base y metas

Nombre	Unidad de medida	Línea base 2012	Meta 2030	Fuente
06-01.Proyectos de investigación y desarrollo tecnológico implementados en la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Número de de proyectos aprobados	40	70	CONCYTEY-FOMIX /CONACYT, /UNIVERSIDADES Y CENTROS DE INVESTIGACION
06-02. Foros y congresos con temas relacionados con el agua y ecosistemas de playas y duna costera, humedales, selvas y cenotes de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes.	Número de Foros y congresos	0	4	UNIVERSIDADES, TECNOLÓGICOS y CENTROS DE INVESTIGACION
06-03. Sistema de Monitoreo permanente operando en la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes (zona de recarga, tránsito y descarga)	Puntos de muestreo con sistema de monitoreo operando	6	160	LABORATORIO ESTATAL DE SALUD, UADY, UNAM, CICY, INNOVAFORCE, SDS (SEDUMA), COTASMEY
06-04. Formación de monitores comunitarios	Personas	0	50	COTASMEY/SEDUMA
06-05.- Capacitación y actualización de personal docente en técnicas pedagógicas en escuelas	Número de maestros en municipios	0	300	SEDUMA
06-06. Campañas de educación ambiental y capacitación en Espacios de Cultura del Agua	Número de ECA´s capacitados	10	50	CONAGUA, SSY, SEDUMA

Estrategia 6.1.- Fomentar acciones de educación formal y no formal para generar una cultura del agua que considere al recurso hídrico como un elemento vital, escaso y de valor económico, social y ambiental.

Líneas de acción

6.1.1.- Coordinar con las autoridades educativas, estatales y federales, públicas y privadas, acciones para incorporar en los programas de estudio de todos los niveles educativos los conceptos de cultura del agua, considerando la disponibilidad del vital líquido, su valor económico, social y ambiental y su uso eficiente en las comunidades rurales y urbanas; así como la necesidad y ventaja de tratar y reusar las aguas residuales; el fomento al pago por la prestación de los servicios y para preservar la cantidad y calidad de las aguas que se utilicen para uso doméstico o en otras actividades productivas.

6.1.2.- Fomentar que en los niveles educativos básico, medio y medio superior se incorporen programas que involucren tanto al personal docente, administrativo, de intendencia, alumnado y padres de familia y que conlleven a una cultura de la conservación del agua; que incluya a la comunidad en el desarrollo de soluciones viables para temas de calidad del agua y crecimiento urbano; que promuevan los programas de salud pública relacionados con las enfermedades causadas por el agua y otros temas sobre el agua; y que se promueva la conciencia pública de apoyo al cumplimiento de las leyes y normas como parte de la política sustentable en el uso responsable del agua y de otros recursos naturales, como el suelo, la vegetación y la fauna silvestre.

6.1.3.- Promover que se incluyan programas de estudio formales y actividades científicas de investigación, que incluyan acciones desde los niveles técnicos hasta el nivel universitario y programas de posgrado en ingeniería y ciencias ambientales y sociales, en las que se impartan los conocimientos, habilidades y aptitudes que se requieren para crear, desarrollar y adaptar tecnologías y capacitar los recursos humanos para incrementar la eficiencia en el uso del agua, suelo, flora y fauna, servicios ambientales y en la operación y control de la infraestructura; apoyar el desarrollo técnico, administrativo y financiero de los organismos prestadores de servicios de abastecimiento de agua y crear mediante las capacidades obtenidas el esquema que mejor se adapte para operar los planes y estrategias del manejo en la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

6.1.4.- Promover la coordinación entre entidades de los tres órdenes de gobierno, centros de educación y sociedad civil para impulsar campañas permanentes en los medios de comunicación, como radio, prensa y televisión, así como en medios electrónicos, que promuevan una nueva cultura del agua, y difundan mensajes que contribuyan a fomentar en la población el cambio de hábitos y actitudes en torno al buen uso y aprovechamiento del recurso y produciendo materiales didácticos para promover y difundir una cultura del agua entre los diferentes sectores usuarios del recurso, tanto en localidades urbanas, rurales y comunidades indígenas.

6.1.5.- Promover que los municipios instalen y mantengan en operación permanente espacios de cultura del agua con el objeto de atender la problemática educativa y cultural que incide en la contaminación, uso y aprovechamiento del recurso en localidades urbanas y rurales y fomentar la participación de la ciudadanía en acciones de monitoreo comunitario del agua en pozos y norias de las diversas localidades.

6.1.6. Fomentar en coordinación con la Secretaría de Educación que en los programas dirigidos a la población infantil y en los medios masivos de comunicación que difundan y fomenten la cultura del agua, la conservación conjunta de los ecosistemas vitales como cenotes, selva y humedales costeros.

Estrategia 6.2.- Fomentar capacidades técnicas, humanas y administrativas en el sector público y privado para la prevención de la contaminación y el saneamiento integral de la zona geohidrológica.

Lineas de acción.

6.2.1.- Fomentar el diseño, desarrollo e implementación de programas de prevención de la contaminación del agua y adopción de tecnologías más limpias y eficientes para auxiliar a los municipios en el control de las fuentes puntuales de contaminación, el saneamiento y mantenimiento de servicios ambientales para así proteger las fuentes de agua dentro de la zona geohidrológica.

6.2.2.- Promover la capacitación en prevención de los sectores industrial, agropecuaria, comercial e institucional, sobre las técnicas generales para prevenir la contaminación, desarrollando planes de contingencia ante eventos de emergencia.

Estrategia 6.3.- Impulsar la participación de centros de investigación, universidades y tecnológicos para desarrollar estudios e investigaciones tendientes al manejo sustentable de la zona geohidrológica, prevenir la contaminación y desarrollar tecnología que eficientize el tratamiento de las aguas residuales y remediación de áreas contaminadas.

Líneas de acción.

6.3.1.- Promover líneas de investigación interdisciplinaria para mejorar la sustentabilidad en el ciclo del agua, y desarrollar una red regional de investigadores que incluyan, por ejemplo: salud pública, hidráulica, hidrología, ciencias del medio ambiente, ecología, demografía, antropología, agronomía desarrollo urbano y economía, de forma indicativa, no limitativa,, tomando en cuenta todas las instituciones académicas de la región y otras en el contexto nacional y extranjero, con la finalidad de mejorar la eficiencia y la efectividad de costos de la investigación aplicada, identificar problemas prioritarios y proveer el conocimiento que permita su solución.

6.3.2.- Organizar talleres de trabajo para detectar las prioridades de la investigación y las estrategias para lograrla asi como para identificar mecanismos para la colaboración en investigación y las fuentes de financiamiento y diseñar, desarrollar e implementar mecanismos para transferir los resultados de la investigación a intervenciones en el ciclo del agua, el cual incluye el ecosistema y la interacción humana.

6.3.3.- Promover la calidad y la capacidad de los laboratorios para el monitoreo confiable del agua, que garantice la calidad y confiabilidad del laboratorio mediante la acreditación y participación en programas de certificación, para que proporcionen información precisa y segura para la toma de decisiones.

6.3.4.- Fomentar, apoyar y mejorar la infraestructura de los laboratorios existentes e identificar los requisitos para nuevos laboratorios, equipo o entrenamiento de personal.

6.3.5.- Promover el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo permanente de la zona geohidrológica, así como la integración de datos en un sistema de información geográfica integrada al Observatorio del Agua que permita mejorar las

capacidades en la toma de decisiones, reglamentación, administración y gestión del agua en la zona geohidrológica del anillo de cenotes.

X).- EVALUACIÓN DEL PROGRAMA HÍDRICO ESPECIAL DE LA ZONA GEOHIDROLÓGICA DEL ANILLO DE CENOTES DEL ESTADO DE YUCATÁN

X.1.- Matriz de Indicadores

Tema Estratégico 1.- Gobernanza para el manejo integral de la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes.

Objetivo	Nombre	Unidad de medida	Fuente
Mejorar y desarrollar nuevos mecanismos de coordinación intermunicipal y con los otros ordenes de gobierno para la gestión hídrica de la zona geohidrológica del anillo de cenotes, fomentando la participación de los diferentes sectores de la sociedad.	**01-01.Municipios que cuentan con Programa de Desarrollo Urbano Municipal y de centros de población**	Número de Municipios con PDU publicado e inscrito en el Registro Público de la Propiedad	SEDUMA
	01-02. Alianza intermunicipal para la gestión ambiental de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Número de Municipios incorporados en una alianza intermunicipal para la gestión hídrica integral.	SEDUMA
	01-03. Municipios que cuentan con Carpetas Básicas sobre Leyes, Normas y Reglamentos para la gestión integral del agua	Municipios que cuentan con la Carpeta Básica	SEDUMA
	01-04 Comités de Usuarios de Recursos Naturales que participan en la Alianza Intermunicipal	Número de Comités de Usuarios establecidos participando en la Alianza Intermunicipal	SEDUMA
	01-05 Censo de pozos de uso doméstico e hidroagricola	Base de datos de Número de pozos registrados	CONAGUA, JAPAY, SEDER

Tema Estratégico 2.- Planeación hídrica regional y desarrollo urbano, social y económico sustentable.

Objetivo	Nombre	Unidad de medida	Fuente
Promover una planeación hídrica estatal que tenga como sustento los principios de participación democrática previstos en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en la Constitución Política del Estado de Yucatán	**02-01 Diagnóstico recurrente del Programa Hídrico Especial de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes**	Actualización de documento y publicación en Diario Oficial	SEDUMA / COTASMEY
	02-02. Definir la disponibilidad de agua de la zona geohidrológica Anillo de Cenotes de acuerdo con la NOM-011-CNA-2000	Documento publicado en Diario Oficial	SEDUMA, CONAGUA, COTASMEY

y en la Ley Estatal de Planeación.	**02-03. Elaborar norma técnica estatal para el diseño de pozos**	Documento publicado en Diario Oficial	SEDUMA, JAPAY, CONAGUA
	02-04. Elaborar la Ley Estatal de Agua	Documento publicado en Diario Oficial	SEDUMA, JAPAY

Tema estratégico 3.- Fondo ambiental para el desarrollo de mecanismos compensatorios para la restauración y mantenimiento de servicios ambientales.

Objetivo	Nombre	Unidad de medida	FUENTE
Fomentar esquemas transparentes de financiamiento y de participación social que aseguren el saneamiento integral de la zona geohidrológica y generen oportunidades de empleos.	**03-01. Generar la Matriz de Contabilidad Social en los Municipios de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes**	Número de Municipios que cuentan con MCS para la planeación económica	SEDUMA
	03-02. Generar la matriz de insumo – producto relacionada al agua en la zona geohidrológica del anillo de cenotes	Matriz de insumo – producto regional	SEDUMA
	03-03. Desarrollo de un Observatorio del Agua en la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Un sistema de información geográfica interactivo funcionando en medios electrónicos	SEDUMA / COTASMEY / CONAGUA / JAPAY
	03-04. Grupos productivos del agua y servicios ambientales con equidad de genero	Grupos organizados de producción con perspectiva de genero	SEDUMA

Tema estratégico 4.- Conservación y recuperación de los servicios ambientales de las áreas de recarga en los ecosistemas de selva y cenotes y en áreas de descarga de humedales costeros, así como en las áreas de escurrimiento subterráneo urbanizadas.

Objetivo	Nombre	Unidad de medida	FUENTE
Potenciar los servicios ambientales de la zona geohidrológica mediante acciones de restauración, conservación y mantenimiento de los ecosistemas contenidos en ella.	**04-02. Kilómetros de playas con deterioro sujetas a recuperación en la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes**	Km playas con deterioro/Km de playas recuperadas	SEDUMA
	04-02. Hectáreas de manglar con deterioro y acondicionadas para restauración	Ha de manglar con deterioro/Ha de manglar recuperadas	SEDUMA
	04-03. Número de manantiales desazolvados	Número de manantiales	SEMARNAT
	04-04- Número de cenotes saneados.	Número de cenotes	SEDUMA
	04-05. Hectáres de selva con deterioro y acondicionadas para su restauración	Ha de selva reforestada	SEDUMA
	04-06. Monitoeo de interfase salina en campos de pozos para dotación de agua potable	Sistemas de monitoreo operando	JAPAY
	04-07. Cloración de agua potable en servicios públicos urbanos municipales	Porcentaje de Municipios que cloran el agua potable	COFEPRIS

Tema estratégico 5.- Identificación de fuentes de contaminación y control de descargas de aguas residuales y lixiviados hacia el agua subterránea.

Objetivo	Nombre	Unidad de medida	Fuente
Ubicar espacialmente todos aquellos contaminantes que afecten al agua derivados de actividades urbanas, agrícolas, pecuarias, industriales y hospitalarios para promover su manejo adecuado y propiciar las acciones de saneamiento necesarias.	**05-01. Volumen de residuos sólidos municipales que son confinados en un sitio que cumple con la Norma NOM-083**	residuos sólidos municipales anuales que son confinados en un sitio que cumple con la Norma NOM-083	SEDUMA
	05-02. Número de granjas porcícolas que cuentan con sistemas de biodigestores para el tratamiento de aguas	Número de granjas	SEDUMA
	05-03. Número de granjas avícolas que cuentan con programa de manejo de residuos de manejo especial.	Número de granjas	SEDUMA
	05-04. Porcentaje de viviendas sin drenaje en los Municipios de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes	Valor promedio del Porcentaje de viviendas sin drenaje	SALUD / INEGI
	05-05. Número de municipios que tiene sistemas de acopio de residuos tóxicos peligrosos derivados de la actividad agropecuaria	Número de Municipios con centros de acopio primarios	SEDUMA
	05-06. Porcentaje de muestreos de agua de playas que cumplen con la normatividad de playa limpia	Muestreos de agua de playas que cumplen con la normatividad de playa limpia	COFEPRIS

Tema estratégico 6.- Investigación, educación y desarrollo tecnológico para la gestión y valoración de servicios ambientales tangibles e intangibles.

Objetivo	Nombre	Unidad de medida	Fuente
Promover la participación de la sociedad en su conjunto y las áreas generadoras de conocimiento para fomentar una cultura del agua que modifique las actitudes actuales en las formas de uso y aprocechamiento del vital recurso.	**06-01.Proyectos de investigación y desarrollo tecnológico implementados en la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes**	Número de de proyectos aprobados	CONCYTEY-FOMIX /CONACYT, /UNIVERSIDADES Y CENTROS DE INVESTIGACION
	06-02. Foros y congresos con temas relacionados con el agua y ecosistemas de playas y duna costera, humedales, selvas y cenotes de la zona geohidrológica del Anillo de Cenotes.	Número de Foros y congresos	UNIVERSIDADES, TECNOLÓGICOS y CENTROS DE INVESTIGACION
	06-03. Sistema de Monitoreo permanente operando en la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes (zona de recarga, tránsito y descarga)	Puntos de muestreo con sistema de monitoreo operando	LABORATORIO ESTATAL DE SALUD, UADY, UNAM, CICY, INNOVAFORCE, SDS (SEDUMA), COTASMEY

	06-04. Formación de monitores comunitarios	Personas	COTASMEY/SEDUMA
	06-05.- Capacitación y actualización de personal docente en técnicas pedagógicas en escuelas	Número de maestros en municipios	SEDUMA
	06-06. Campañas de educación ambiental y capacitación en Espacios de Cultura del Agua	Número de ECA´s capacitados	CONAGUA, SSY, SEDUMA

XI).- BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA Y RELACIONADA.

Abramov, O., and Kring, D.A., 2007. Numerical modeling of impact-induced hydrothermal activity at the Chicxulub crater. *Meteoritics & Planetary Science,* 42(1):93–112. **http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2007.tb00220.x**

Álvarez, L. W., Álvarez W., Asaro F., Michel H.V., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction. Science, 208, 1095–1108.

Álvarez, W., Smith J., Lowrie W., Asaro F., Margolis S.V., Claeys P., Kastner M., Hildebrand A.R., 1992, Proximal impact deposits at the Cretaceous–Tertiary boundary in the Gulf of Mexico: A restudy of DSDP Leg 77 Sites 536 and 540: Geology, 20, 697–700.

Ames, D.E., Kjarsgaard, I.M., Pope, K.O., Dressler, B., and Pilkington, M., 2004. Secondary alteration of the impactite and mineralization in the basal Tertiary sequence, Yaxcopoil-1, Chicxulub impact crater, Mexico. Meteoritics & Planetary Science, 39(7):1145–1168.http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01134.x

Anonimo, 1989. Sitios para la perforación de pozos de abastecimiento de buena calidad para su uso como agua potable para la localidad de Telchac Puerto. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Unidad de Posgrado e Investigación. Coordinación Académica de Hidrología. Mérida, Yucatán, México.

Arcega-Cabrera F., N. Velázquez-Tavera, L. Fargherc, M. Derriena, E. Noreña-Barroso. 2014. Fecal sterols, seasonal variability, and probable sources along the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. Journal of Contaminant Hydrology 168 (2014) 41–49.

Arcega-Cabrera, F., y Lane F. Fargher, 2016. Education, fish consumption, well water, chicken coops, and cooking fires: Using biogeochemistry and ethnography to study exposure of children from Yucatan, Mexico to metals and arsenic. Science of the Total Environment 568 (2016) 75–82. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.209. 0048-9697/© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

Arcega-Cabrera, F., L. F. Fargher, I. Oceguera-Vargas, E. Noreña-Barroso, L. Yánez-Estrada, J. Alvarado, L. González, R. Moo-Puc, N. Pérez-Herrera, M. Quesadas-Rojas, y S. Pérez-Medina. 2017. Water Consumption as Source of Arsenic, Chromium, and Mercury in Children Living in Rural Yucatan, Mexico: Blood and Urine Levels. Bull Environ Contam Toxicol. DOI 10.1007/s00128-017-2147-x. © Springer Science+Business Media, LLC 2017

Arenillas I., Arz J.A., Grajales J.M., Murillo G. Alvarez W., Camargo-Zanoguera A., Molina E., Rosales A., 2007, Chicxulub impact event is Cretaceous/Paleogene boundary in age: New micropaleontological evidence. Earth Planet. Sci. Lett., 249, 241-25.

Arz, J.A., Alegret, L., and Arenillas, I., 2004. Foraminiferal biostratigraphy and paleoenvironmental reconstruction at the Yaxcopoil-1 drill hole, Chicxulub crater, Yucatán Peninsula. Meteoritics & Planetary Science, 39(7):1099–1111. http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01131.x

Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán, 2013. Servicio Geológico Mexicano. Ing. José Antonio Rafael Fernández, Jefe de Proyecto, M.C. Martha Angélica Salas Martín, Coordinadora del Atlas. Gobierno del Estado de Yucatán. 2012-2018.

Back, W., Hanshaw, B. B., Herman, J. S., Van Driel, N., 1986, Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico: Geology, 14, 137-140, doi: 10.1130/0091-7613(1986)14<137:DDOAPR>2.0.CO;2.

Barbosa-Gudiño, J. R., Orozco-Esquivel, M. T., Gómez-Anguiano, M., Zavala-Monsivais, A. 2008. The early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern Mexico: Journal of American Earth Sciences, 25, p. 49-63.

Barton, P.J., Grieve, R.A.F., Morgan, J.V., Surendra, A.T., Vermeesch, P.M., Christeson, G.L., Gulick, S.P.S., and Warner, M.R., 2010. Seismic images of Chicxulub impact melt sheet and comparison with the Sudbury structure. In Gibson, R.L., and Reimold, W.U. (Eds.), Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV. Special Paper—Geological Society of America, 465:103–113. http://dx.doi.org/10.1130/2010.2465(07)

Batllori E., Torrijos J. y Febles, J. 1991. Programa de Manejo de la Reserva Estatal de El Palmar, Yucatán: Hidrología. Secretaría de Ecología, Gob. del Edo. de Yuc.; Manejo de Recursos Silvestres, A.C. Mérida, Yuc., Mex.

Batllori, E., J. Trejo, J. Febles, P. Dzib y R. Tuyub. 1993. Caracterización y uso del recurso hídrico del Municipio de Sinanché, Yucatán. In Dickinson F. y Ortega, J., Evaluación ecológica, social y de salud en el Municipio de Sinanché, Yucatán. Fase II. Reporte final del proyecto. Sección de Ecología Humana, CINVESTAV-IPN Unidad Mérida.

Batllori, E. 1995. Hidrología de la región costera noroccidental del Estado de Yucatán. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Geográficas. Universidad de La Habana. Facultad de Geografía. La Habana, Cuba.

Batllori, E.; J.L. Febles y J. Diaz. 1999. Landscape change in Yucatan´s northwest coastal wetlands (1948 – 1991). Human Ecology Review. Vol. 6 Núm. 1. 8 -20 p.

Batllori, E; J. González y J. L. Febles. 1999. Población, recurso hídrico y actividad agrícola en la Península de Yucatán. CINVESTAV-IPN, IIASA, CONAPO, UNFPA. Reporte Interno. Yucatán, México. p. 42.

Batllori, E., J. L. Febles, J. Granados, J. C. Trejo, C. D. Novelo, E. J. Esparza, R. Tuyub, P.P. Dzib, M. Martínez, A. Cob, W. Cob. 2000. Hidrología de la reserva estatal de El Palmar, Fase II. CINVESTAV-IPN, Departamento de Ecología Humana. Informe Técnico. Clave Proyecto: 211085-5-3030-T. Yucatán, México. p. 77.

Batllori E., González P.J., Díaz S.J., Febles P-J. 2006. Carcaterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 59, pp. 74-92.

Batllori, E, y J.L. Febles 2007. Hidrologia superficial de la región costera del Estado de Yucatán. In: Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán. 2007. México.

Bautista, F., E. Batllori-Sampedro, G., Palacio, M., Ortiz Pérez, M., Castillo-González, 2005, Integración del conocimiento actual sobre paisajes geomorfológicos de la península de Yucatán, p. 33-58 en F. Bautista y G. palacio (Editores) Caracterización y manejo de los suelos en la península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarios, Forestales y Ambientales, Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, 282 pp.

Bautista-Zuñiga, Francisco; Estrada-Meddina, Héctor; Jiménez-Osornio, Juan; Gónzalez-Iturbe, José A. 2004. Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán. Terra Latinoamericana, Vol. 22, Núm., 3, julio-septiembre. Pp. 243-254. Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Bautista, F; 2007, Información Técnica para el desarrollo agropecuario y forestal del estado de Yucatán, Centro de Investigación en Geografía Ambiental, 12 pp.

Bautista-Zuñiga, F. y G. Palacio, 2005 Caracterízación y manejo de los suelos de la península de Yucatán. Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales.

Beck, B. F., 1988, Environmental and engineering effects of sinkholes - the processes behind the problems, 21st IAH proceedings: Karst hydrogeology and karst environment protection, 17-29.

Beddows, P.A. (2004). Groundwater hydrology of a coastal conduit carbonate aquifer: Caribbean coast of the Yucatán Peninsula, México. PhD thesis, Sch. of Geogr. Sci. Univ. of Bristol, UK.

Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., Torres-Talamante, O., 2007, Los cenotes de la Península de Yucatán: Arqueología Mexicana, 14(83), 32-35.

BGS (1994). Buckley, D.K., Macdonald D.M.J., Villasuso P.M., Graniel C.E.,Vázquez M.J. and Virgilio J. M. Geophysical Logging of a Karstic Limestone Aquifer for Hydrogeological Purposes at Merida, Yucatan, Mexico. British Geological Survey. Technical Report WD/94/4C. Hydrogeology series.

Bell, C., Morgan, J.V., Hampson, G.J., and Trudgill, B., 2004. Stratigraphic and sedimentological observations from seismic data across the Chicxulub impact basin. Meteoritics & Planetary Science, 39(7):1089–1098. http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01130.x

Beltrán, E. 1959. Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento. Ediciones del Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables (I.M.R.N.R.). Tomo 3º, parte II , estudios particulares. México, D.F. 354 pp.

Bolio-Barrios, E.R., Bautista, F., Pacheco-Ávila, J.G., 2011, Uso de la metodología EPIK para determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México: Teoría y praxis, 9, 55-72.

Bourgeois J., Hansen T.A., Wiberg P.L., Kaufman E.G., 1988, A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas. Science, 241, 567-570.

Butterlin, J. y Bonet, F., 1959, Las formaciones cenozoicas de la parte mexicana de la Península de Yucatán, UNAM.

Butterlin, S. y F. Bonnet. 1963. Mapas Geológicos de la Península de Yucatán. Bol. A.M.P.G. Vo. X Nos. 9-10 México. In: Orellana, R. El clima de la Península de Yucatán: presente, pasado y futuro. Manuscrito.

Bryce, C.C., Horneck, G., Rabbow, E., Edwards, H.G.M., and Cockell, C.S., 2015. Impact shocked rocks as protective habitats on an anoxic early Earth. International Journal of Astrobiology, 14(01):115–122.
http://dx.doi.org/10.1017/S1473550414000123

Brett R., 1992, The Cretaceous-Tertiary extinction: a lethal mechanism involving anhydrite target rocks, Geochim. Cosmochim. Acta, 56, 3603-3606.

Butterlin, S. y F. Bonnet. 1963. Mapas Geológicos de la Península de Yucatán. Bol. A.M.P.G. Vo. X Nos. 9-10 México. In: Orellana, R. El clima de la Península de Yucatán: presente, pasado y futuro. Manuscrito.

Cabrera, A; J. Pacheco; V. Coronado y A. Gómez, s/f. Evolución de la calidad del agua subterránea al norte de Mérida, Yucatán. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

Camargo-Zanoguera, A., and Suarez-Reynoso, G., 1994. Evidencia sismica del cráter de impacto de Chicxulub. Boletín de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, 34:1–28.

Campos-Enríquez J.O., Arzate J.A., Urrutia-Fucugauchi J., Delgado-Rodríguez O., 1997, The subsurface structure of the Chicxulub crater (Yucatan, Mexico): Preliminary results of a magnetotelluric study. Leading Edge, 16, 1774-1777.

Campos-Enríquez J.O., Chavez-Garcia F.J., Cruz H., Acosta J.G., Takafumi M., Arzate J., Unsworth M., Ramos J., 2004, Shallow crustal structure of Chicxulub impact crater imaged with seismic, gravity and magnetotelluric data: inferences about the central uplift. Geophys. J. Int., 156, 515-525.

Campos-Enríquez J.O., Morales-Rodríguez H.F., Domínguez-Méndez F., Birch F.S., 1998, Gauss's theorem, mass deficiency at Chicxulub crater (Yucatan, Mexico), and the extinction of dinosaurs, Geophysiscs, 63, 1,585-1,594.

Canales I., 2010, Análisis estructural-estratigráfico del cráter de Chicxulub a partir de datos sísmicos de reflexión. Tesis Ingeniería Geofísica, Facultad de Ingeniería, UNAM, 102 pp.

Casáres Salazar Rafael, 2006. Hidrogeología de la zona de descarga del acuífero del estado de Yucatán y sus implicaciones ambientales. Tesis En opción al grado de: Maestro en ingeniería, Opción hidrología. Universidad autónoma de Yucatán, Facultad de ingeniería, Unidad de posgrado e investigación, Mérida, Yucatán.

Castillo, B.E., R.M. Sauri; B.M. Comas and N.R. Méndez 1995. Metales traza en los lixiviados generados en un proceso de composteo a ciclo abierto. Boletín Académico de la Facultad de Ingeniería de la UADY. Mérida Yucatán.

CNA. 1996. Censo de aprovechamientos de agua subterránea del estado de Yucatán, Campeche y Quintana Roo. Gerencia Regional Sureste, Mérida, Yucatán.

CNA 2008. Problemática del acuífero Península de Yucatán y acciones requeridas para su conservación. Organismo de Cuenca Península de Yucatán. Dirección Técnica. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT. México. Pp4.

Claeys P., Kiessling W., Álvarez W., 2002, Distribution of Chicxulub ejecta at the Cretaceous-Tertiary boundary. In: Koeberl, C. and MacLeod, K.G. (Eds), Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond, Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 356, 55-68.

Claeys, P., Heuschkel, S., Lounejeva-Baturina, E., Sanchez-Rubio, G., and Stöffler, D., 2003. The suevite of drill hole Yucàtan 6 in the Chicxulub impact crater. Meteoritics & Planetary Science, 38(9):1299–1317.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00315.x

Cobiella-Reguera, J. L., 2008, Reconstrucción palinspática del paleomargen mesozoico de América del Norte en Cuba occidental y sudeste del Golfo de México, Implicaciones para la evolución del SE del Golfo de México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25(3), 382-401.

Collins, G.S., 2014. Numerical simulations of impact crater formation with dilatancy. *Journal of Geophysical Research: Planets,* 119(12):2600–2619. **http://dx.doi.org/10.1002/2014JE004708**

Collins, G.S., Melosh, H.J., Morgan, J.V., and Warner, M.R., 2002. Hydrocode simulations of Chicxulub crater collapse and peak-ring formation. *Icarus,* 157(1):24–33. **http://dx.doi.org/10.1006/icar.2002.6822**

Collins, G.S., Morgan, J., Barton, P., Christeson, G.L., Gulick, S., Urrutia, J., Warner, M., and Wünnemann, K., 2008. Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is caused by target heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters,* 270(3–4):221–230.
http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.032

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios 2009, Calidad sanitaria del agua de mar para uso recreativo (Consulta Web: http://201.147.97.103/wb/cfp/progreso del 26 de marzo de 2009).

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), 2011, La costa de Yucatán en la Perspectiva del Desarrollo Turístico. Disponible en: www.conabio.gob.mx

CONABIO (Comisión nacional para el uso y conocimiento de la biodiversidad), 2012, Programa de detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota. [En línea] 07 de Septiembre de 2012. [Citado el: 09 de Septiembre de 2012.]. Disponible en:

http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/puntos_calor.html

CONABIO (Comisión nacional para el uso y conocimiento de la biodiversidad), 2013, Portal de Geoinformación, fecha de consulta 15 de febrero del 2013. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/

Conagua. Comisión Nacional del Agua (2009). Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Edición 2009.

CONAGUA (2009). .Implementación de red piezométrica en la zona poniente del estado de Yucatán.. Comisión Nacional del Agua. Capítulo IV. Pp. 28-32.

Connors M., Hildebrand A.R., Pilkington M., Ortíz-Aleman C., Chavez R.E., Urrutia-Fucugauchi J., Graniel-Castro E., Camara-Zi A., Vasquez J., Halpenny J.F., 1996, Yucatan karst features and the size of Chicxulub crater: Geophysical Journal International, 127, F11-F14.

Consultores en Agua Potable, Alcantarillado, Geohidrología & Hidráulica Costera, I.C., 2008. Estudio geohidrologico para definir el contacto de la capa de caliche semiconfinante en el area del sur del puerto de Progreso, Yucatan, México.

COPLADE (Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado), 2007, Regionalización del Estado de Yucatán, Perfil Geoestadístico, Secretaria de Planeación y Presupuesto, Yucatán México, 18 pp.

Cornejo-Toledo A., Hernández-Osuna A., 1950, Las anomalías gravimétricas en la cuenca salina del istmo, planicie costera de Tabasco, Campeche y Península de Yucatán, Bol. Asoc. Mex, Geol. Petrol., 2, 453-460.

Custodio y Llamas (1996). Hidrología Subterránea. Tomo II. Editorial Omega. Barcelona España. 1224 páginas.

Chambers, J.E., Boone, J.S., Carr, R.L., Chambers, H.W. y Strauss, D.L. (2002). Biomarkers as predictors in health and ecological risk assessment. Hum Ecol. Risk Assess. 8(1): 165-176

Christeson, G.L., Nakamura, Y., Buffler, R.T., Morgan, J., and Warner, M., 2001. Deep crustal structure of the Chicxulub impact crater. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 106(B10):21751–21769.
http://dx.doi.org/10.1029/2001JB000337

Christeson, G.L., Collins, G.S., Morgan, J.V., Gulick, S.P.S., Barton, P.J., and Wharton, M.R., 2009. Mantle deformation beneath the Chicxulub impact crater. Earth and Planetary Science Letters, 284(1–2):249–257.
http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2009.04.033

DAICOS SA de CV, 2011. Diagnóstico y proyecto ejecutivo del alcantarillado y saneamiento de la Ciudad de Mérida, considerando Centro Histórico, zona de transición y zona conurbada. CNA, JAPAY-SEDUMA, Ayuntamiento de Mérida. Yucatán, México.

Delgado-Rodríguez O., Campos-Enríquez J.O., Urrutia-Fucugauchi J., Arzate J.A., 2001, Occam and Bostick 1-D inversion of magnetotelluric soundings in the Chicxulub impact crater, Yucatan, Mexico. Geofis. Int., 40, 271-283.

Doerfliger et al., Methode EPIK, 1999. In E.R.Bolio; S.A.Cabrera; F.Bautista y J.G.Pacheco. Aplicación de la metodología EPIK para establecer la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el Estado de Yucatán. UADY,Fac- de Ingeniería. Mérida, Yucatán, México.

DOF (Diario Oficial de la Federación), 17 de abril de 2002. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CNA- 2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Duch G. J. 1988. “La conformación territorial del Estado de Yucatán. Los componentes del medio físico”. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Centro regional de la península de Yucatán. México. 427 pp.

Durán, R., G. Campos, J.C. Trejo, P. Simá, F. May y M. Juan. 2000. Listado Florístico de la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Yucatán, México. 259 p

Durán, R. M., Méndez, A., Dorantes, C., Espadas, G., Dzib, M., Ferrer, A., López, Bañuelos, S., 2006, Propuesta de Modificación en la lista de especies en riesgo de la NOM-059-SEMAR-NAT-2001 de Mammilaria gaumer, Orcutt, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México

Dreybrodt, W., Gabrovsek, F., 2003, Basic processes and mechanisms governing the evolution of karst: Speleogenesis and evolution of karst aquifers, The virtual Scientific Journal,1, 26 pp.

Escobar-Sánchez J.E., Urrutia-Fucugauchi J., 2010, Chicxulub crater post-impact hydrother-mal activity – Evidence from the Paleocene carbonates in the Santa Elena borehole. Geofis. Int., 49, 97-106.

Escolero, O., L.E. Marín, B. Steinich, J.A. Pacheco, 2000. Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: the Merida, Yucatán example. Landscape and Urban Planning. 51: 53-62.

Escolero, O., L.E. Marín, B. Steinich, J.A. Pacheco, S.A. Cabrera and J. Alcocer, 2002. Water Resources Management 16: 351-367.

Escolero, O., L.E. Marín, B. Steinich, J.A. Pacheco, A. Molina-Maldonado and J.M. Anzaldo, 2005. Geochemistry of the hydrogeological reserve of Mérida, Yucatán, México. Geofísica Internacional. Vol. 44 No. 3, pp301-314.

Evaluación de los ecosistemas del Milenio 2009.
http://www.milleniumassessment.org/en/index.aspx,2009

Facultad de Ingeniería, 2008. Evaluación ambiental del exbasurero de Mérida. Universidad Autónoma de Yucatán y Gobierno del Estado de Yucatán. pp 210.

Febles, J. L, Batllori 1995. Fluctuación Diurna del nivel hidrostatico en petenes de la cuenca costera noroccidental del estado de Yucatán: efecto del desazolve y canalización de manantiales. Ingeniería Hidraúlica en México.

Foster S. e Hirata R. (1991). Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.

García, E. 1978. Apuntes de Climatología de México. Primera Parte. Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 95 p.

García, E., 1989, Las Regiones Climáticas de México, Instituto de Geografía, UNAM.

García, E., 2004, Antología, Centro de Investigación Científica de Yucatán, UNAM, Instituto de Geografía. García, F., Córdoba, J., Ordoñez, A., 2010, Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, in Durán-García, R., Méndez-González, M., CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 63-70.

García, Gil, E., Graniel-Castro, E., 2010: Geología en R. Durán-García, y M. Méndez, (editores), 2010, Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, CICY, PPD-FMA, CONABIO, SEDUMA. 446 pp. Disponible en: http://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad/

Gelinas, A., Kring, D.A., Zurcher, L., Urrutia-Fucugauchi, J., Morton, O., and Walker, R.J., 2004. Osmium isotope constraints on the proportion of bolide component in Chicxulub impact melt rocks. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(6):1003–1008.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00941.x

Goksøyr, A., Förlin, L., 1992. The cytochrome P450 system in fish, aquatic toxicology and environmental monitoring. Aquat. Toxicol.22, 287_/312

González-Herrera, R., I. Sánchez-Pinto and J. Gamboa-Vargas, 2002. Groundwater-flow modeling in the Yucatán karstic aquifer, México. Hydrogeology Journal. (10):539-552.

González R, Rodríguez R, Vadillo I y Carrasco F (2004). Sistema redox en un acuífero carbonatado afectado por lixiviado de basureros. Revista Latino-Americana de Hidrogeología, n.4, pp. 71-79.

González, L., M. Martínez, M. Mejía y C. Gutiérrez, 2003. Definición de reglas de Operación del Acuífero Costero de la Península de Yucatán, Primera Parte. Proyecto TH-0218. Coordinación de Tecnología Hidrológica, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, IMTA - CNA. México

González – Iturbe Ahumada, J., Olmsted,I., y Tun-Dzul F., 2002, (Tropical dry forest recovery alter long term Henequen -sisal, *Agave fourcoydes* Lem. – plantation in northern Yucatán, Mexico. Forest Ecology and Management 167 (2002) 67-82)

González Piedra, J. I. 1994. Guía metodológica para el estudio integral de cuencas hidrológicas superficiales con proyección de manejo. Grupo de Hidrología-Climatología, Facultad de Geografía, Universidad de la Habana. Ciudad de la Habana, Cuba. 47 pp.

Goto, K., Tada, R., Tajika, E., Bralower, T.J., Hasegawa, T., and Matsui, T., 2004. Evidence for ocean water invasion into the Chicxulub crater at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(7):1233–1247.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01139.x

Graniel, C.E., L.B. Morris and J.J. Carrillo-Rivera, 1999. Effects of urbanization on groundwater resources of Mérida, Yucatan, Mexico. Environmental Geology 37 (4) : 303 – 312.

Graniel-Castro, E., Carrillo-Rivera, J., Benavides-Cardona, A., 2003, Dispersividad de solutos en el cárst de Yucatán, México: Ingeniería, 49-56.

Graniel-Castro, E., 2010, en R. Durán García, y M. Méndez, (editores), 2010, Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, CICY, PPD-FMA, CONABIO, SEDUMA. 446 pp., disponible en: http://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad/.

Guerrero-Medina, R., y Díaz-Plaza, R., 2011, Paquete ecológico henequén Agave fourcroydes, Establecimiento y mantenimiento productivo, Programa estratégico para el desarrollo rural sustentable de la región sur-sureste de México trópico húmedo, SAGARPA, 25 pp.

Gutierrez, F., Cooper, A. H., Johnson, K. S., 2008, Identification, prediction and mitigation of sinkholes hazards in evaporate karst areas, Environmental Geology, 53, 36 pp.

Gutiérrez-Ruiz, EJ, Aranda-Cirerol FJ, Rodríguez-Vivas RI, Bolio-González ME, Ramírez-González S y Estrella-Tec J., 2012. Factores sociales de la crianza de animales de traspatio en Yucatán, México. Rev. Bioagrociencias. Vol. 5. No. 1, enero – junio de 2012

Grajales-Nishimura, J.M., Cedillo-Pardo E., Rosales C., Morán D.J., Álvarez W., Claeys P., Ruíz-Morales J., García J., Padilla-Avila P., Sánchez-Ríos A., 2000, Chicxulub impact: the origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields, Geology, 28, 307–310.

Granados Castellanos, J.J. 1994. Procesos del ciclo mineral (P y K) en una selva alta perennifolia del sur de Quintana Roo, México. Tesis para obtener el grado de Licenciado en Biología. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Mérida, Yucatán, México. 146 pp.

Grieve, R.A.F., Reimold, W.U., Morgan, J., Riller, U., and Pilkington, M., 2008. Observations and interpretations at Vredefort, Sudbury, and Chicxulub: towards an empirical model of terrestrial impact basin formation. *Meteoritics & Planetary Science,* 43(5):855–882.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb01086.x

Gulick S., Barton P., Christeson G., Morgan J., MacDonald M., Mendoza K., Urrutia-Fucugauchi J., Vermeesch P., Warner M., 2008, Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater. Nature Geoscience, v. 1, p. 131-135.

Gulick, S.P.S., Barton, P.J., Christeson, G.L., Morgan, J.V., McDonald, M., Mendoza-Cervantes, K., Pearson, Z.F., Surendra, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Vermeesch, P.M., and Warner, M.R., 2008. Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the

Chicxulub impact crater. *Nature Geoscience,* 1(2):131–135. **http://dx.doi.org/10.1038/ngeo103**

Gulick, S.P.S., Christeson, G.L., Barton, P.J., Grieve, R.A.F., Morgan, J.V., and Urrutia-Fucugauchi, J., 2013. Geophysical characterization of the Chicxulub impact crater. *Reviews of Geophysics,* 51(1):31–52.
http://dx.doi.org/10.1002/rog.20007

Hall, F.G., 1936, Physical and chemical survey of cenotes of Yucatán, in The Cenotes of Yucatan: Carnie Institute of Whashington Publication 457, 5-16.

Hernández, L.; Rebolledo V.M.; Almazán, B.A y F. Valadéz. 2011. Propuesta de creación de una reserva geohidrológica para el norte del Estado de Yucatán. Reporte Final CONACYT-FOMIX. Centro de investigación Científica de Yucatán, A.C.. Mérida, Yucatán. México.

Herrera-Silveira J. 1994. Spatial Heterogeneity and Seasonal Patterns in a Tropical Coastal Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 10(3): 738-746.

Herrera-Silveira, J. 1996. Comunidades de productores primarios asociados a las lagunas costeras en el norte de la costa de Yucatán. In: Proyecto de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero de Yucatán. PRONATURA-CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida. North American Wetlands Conservation Council. 2000. Yucatán, México.

Herrera-Silveira, J. A., Comín, F. A., López, S., Sánchez, I. 1998. *Limnological characterization of aquatic ecosistems in Yucatan* (SE Mexico). Verh. Internat. Verein. Limnol. 26: 1348-1351.

Herrera-Silveira, J.A. & S.M. Morales-Ojeda. 2009. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. Mar. Pollut. Bull. 59: 72-86.

Hecht, L., Wittmann, A., Schmitt, R.-T., and Stöffler, D., 2004. Composition of impact melt particles and the effects of post-impact alteration in suevitic rocks at the Yaxcopoil-1 drill core, Chicxulub crater, Mexico. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(7):1169–1186.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01135.x

Hildebrand, A. R., Boynton W. V., 1990, Proximal Cretaceous-Tertiary boundary impact deposits in the Caribbean. Science 248, 843-847

Hildebrand A. R., Penfield G.T., Kring D.A., Pilkington M., Camargo–Zanoguera A., Jacobsen S.B., Boynton W.V., 1991, Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico: Geology, 19, 867–871

Hildebrand A., Pilkington M., Ortíz C., Chávez R., Urrutia-Fucugauchi J., Connors M., Graniel E., Camara-Zi A., Halpenny J.F. and Niehaus D., 1998, Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic reflection data. In: Meteorites: Flux With Time and Impact Effects, M.M. Graddy, R. Hutchinson, G.J.H. McCall and D.A. Rotherby (Eds.), Geol. Soc. London Sp. Publ., 140, 153-173.

Hoogesteijn Reul, Almira L., 1, José Luis Febles-Patrón, Violeta Amapola Nava-Galindo. 2015. La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19-3 (2015) 169-175, ISSN1665-529-X.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2005, Uso de suelo y vegetación, serie III, escala 1:250,000. Aguas Calientes, México.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1990 a 2010) Censo de población y Vivienda 1990 a 2010. Disponible en
http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/default.aspx

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Censo de población y Vivienda 2010. Disponible en:
http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/consulta.asp?p=17118&c=27769&s=est

Ingeniería, Obras y Servicios a la Industria, SA de CV, 2010. Estudio costo – beneficio a nivel prefactibilidad del sistema de tratamiento de excretas porcinas en la zona noreste del Estado de Yucatán. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Estado de Yucatán. México.

I. M. R. N. R. (Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables) 1958. “Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento”. Ediciones del I. M. R. N. R. A. C., México, D. F., 326 pp.

Iracheta, A. y cols. 2009. Programas regionales del Estado de Yucatán, Región II Noroeste. Versión Preliminar. Secretaría de Planeación y Presupuesto, Gobierno del Estado de Yucatán.

Jabr, W. & El-Awar, F., 2004. GIS & analytical hierarchy process for siting water harvesting reservoirs , Irsal-Lebanon: Esri. Kring, D. A. and W. B. Boynton, 1992, (Abstract), Petrogenesis of an augite–bearing melt rock in the Chicxulub structure and its relationship to K/T impact spherules in Haiti: Nature, 358, 141 –144. doi:10.1038/358141a0.

Jiang, S., Bralower, T.J., Patzkowsky, M.E., Kump, L.R., and Schueth, J.D., 2010. Geographic controls on nannoplankton extinction across the Cretaceous/Palaeogene boundary. *Nature Geoscience,* 3(4):280–285.
http://dx.doi.org/10.1038/ngeo775

Juárez S.B. 2012. Escenarios de disponibilidad de agua para el estado de Yucatán con base en los escenarios de cambio climático. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Yucatán. 142 p.

Keller, G., Adatte T., Stinnesbeck W., Rebolledo-Vieyra M., Urrutia Fucugauchi J., Kramar U., and Stueben D. 2004(a), Chicxulub impact predates the K/T boundary mass extinction: Proceedings of the National Academy of Sciences 101, 3753–3758.

Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Stuben, D., Berner, Z., Kramar, V., Harting, M. 2004 (b). More evidence that the Chicxulub impact predates the K/T mass extinction: Meteoritics and Planetary Science 39(7), 1127-1144.

Kenkmann, T., Wittmann, A., and Scherler, D., 2004. Structure and impact indicators of the Cretaceous sequence of the ICDP drill core Yaxcopoil-1, Chicxulub impact crater, Mexico. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(7):1069–1088.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01129.x

Kettrup, B., Deutsch, A., Ostermann, M., and Agrinier, P., 2000. Chicxulub impactites: geochemical clues to the precursor rocks. *Meteoritics & Planetary Science,* 35(6):1229–1238.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01511.x

Kring, D.A., 2005. Hypervelocity collisions into continental crust composed of sediments and an underlying crystalline basement: comparing the Ries (~24 km) and Chicxulub (~180 km) impact craters. *Chemie der Erde–Geochemistry,* 65(1):1–46.
http://dx.doi.org/10.1016/j.chemer.2004.10.003

Kring, D.A., Hörz, F., Zurcher, L., and Urrutia Fucugauchi, J., 2004. Impact lithologies and their emplacement in the Chicxulub impact crater: initial results from the Chicxulub Scientific Drilling Project, Yaxcopoil, Mexico. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(6):879–897.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00936.x

Lefticariu, M., Perry E. C., William C. W., Lefticariu L., 2006, Post-Chicxulub depositional and diagenetic history of the northwestern Yucatan Peninsula, Mexico, Sedimentary Geology, 183, 51–69.

Lesser J. y Weidie A. (1988). Region 25, Yucatán peninsula, chapter 28, The Geology of North America, Vol. 0-2 Hydrogeology, The Geological Society of America, pp. 237–241.

Lesser J. (1976). Estudio Geohidrológico e Hidrogeoquímico de la Península de Yucatán. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Ciudad de México, 62 p.

López Ramos, E. 1973. Estudio Geológico de la Península de Yucatán. Enciclopedia Yucatanense, Tomo X: Explicación necesaria. Geología peninsular. Cultura Maya. Límites con Quintana Roo. Edición Oficial del Gobierno de Yucatán, México. p. 33-75.

Lopez Ramos E., 1975, Geological summary of the Yucatan peninsula. In: The Ocean Basins and Margins, vol. 3, The Gulf of Mexico and the Caribbean, A.E.M. Nairn and F.G. Stehli, Eds., Plenum, New York, 257-282.

Lugo-Pech, C., 1994. Modelo Matemático del Comportamiento Hidrodinámico del Acuífero de Sierra Papacal, Yucatán. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

Lüders, V., and Rickers, K., 2004. Fluid inclusion evidence for impact-related hydrothermal fluid and hydrocarbon migration in Cretaceous sediments of the ICDP-Chicxulub drill core Yaxcopoil-1. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(7):1187–1197.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01136.x

Lugo-Hubp, J., Aceves-Quezada, J. F., Espinosa-Pereña, R., 1992, Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán: Revista del Instituto de Geología, UNAM, 10(2), 143-150.

Lutz, W; E. P. Prieto y W. Sanderson (eds.) 2000 “Population, Development, and Environment on the Yucatán Peninsula: From Ancient Maya to 2030”. International Institute for Applied System Análisis. Laxenburg, Austria. 257 pp.

Mackenzie, G.D., Maguire, P.K.H., Denton, P., Morgan, J., and Warner, M., 2001. Shallow seismic velocity structure of the Chicxulub impact crater from modelling of Rg dispersion using a genetic algorithm. *Tectonophysics,* 338(2):97–112. **http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00123-8**

Marín L., R. Sanborn, A. Reeve, T. Felger, J. Gamboa, E.C. Perry and M. Villasuso. 1988. Petenes: a key to understanding the hidrology of Yucatan, Mexico. International Association of Hydrogeologist, International Symposium on the Hydrology of Wetlands in Semi-Arid and Arid Areas. Seville, Spain. May- 9-12,1988.

Marin, L. E. 1990. Field investigations and numerical simulation of ground-water flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico. Dissertation submited for the degree of Doctor of philosophy. Dekalb, Illinois, U.S.A. 182 pp.

Marín, l.E.; Steinich, B.; Pacheco, J., y O. Escolero. 2000. Hydrogeology of contaminated sole-source karst aquifer, Merida, Yucatán, México. Geofísica Internacional (2000) Vol. 39, Num 4, pp 359-365.

Marin L.E., Sharpton V.L., Urrutia-Fucugauchi J., Smit J., Sikora P., Carney C., Rebolledo M., 2001, Stratigraphy at ground zero: A contemporary evaluation of well data in the Chicxulub impact basin. Intern. Geol. Rev., 43, 12, 1145-1149.

Marín-Stillman, L. E., Pacheco-Ávila, J. G., Méndez-Ramos, R., 2005, Hidrogeología de la Península de Yucatán in Jiménez, B., y Marín, L., (Editores) El agua en México vista desde la academia, Academia Mexicana de Ciencias, 411 pp., ISBN: 968-7428-22-8.

McClain, J., 1997. Tertiary carbonate biostratigraphy of northwestern Yucatan Peninsula, Mexico. MS thesis, Northern Illinois University, DeKalb, IL, 125 pp.

Méndez Novelo, R, Castillo Borges, E., Vázquez Borges, E., Briceño Pérez, O., Coronado Peraza, V., Pat Canul, R.y Garrido Vivas, P. 2009 Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-2, pp. 13-21.

Méndez Ramos, R. 1994. Justificación técnica para la reglamentación del acuífero de Yucatán. Comisión Nacional del Agua (CNA). Gerencia Estatal en Yucatán. Documento Interno. Yucatán, México.

Méndez Ramos, R. 1996. Disponibilidad Hídrica en el Estado de Yucatán. Comisión Nacional del Agua (CNA). Subgerencia Regional del Sureste. Jefatura de Aguas Subterráneas. Documento Interno. Yucatán, México. p. 27.

Meyerhoff A.A., Lyons J.B., Officer C.B., 1994, Chicxulub structure: A volcanic sequence of Late Cretaceous age. Geology, 22, 3-4.

Mitsch, W. y J. Gosselink. (1993). Wetlands. Second Edition. Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 628-637 p.

Miranda, F. 1958. La vegetación de la Península Yucateca, In Beltrán E., 1958. Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento. Ed. IMERNARAC 2:215-271.

Molina-Garza, R. S., Van Der Voo, R., Urrutia-Fucugauchi, J., 1992, Paleomagnetism of the Chiapas Massif, southern Mexico: Evidence for rotation of the Mayan Block and implications for the opening of the Gulf of Mexico: GSA Bulletin, 104(9), 1156-1168.

Moore, Y; R Stoessell and D. Easley. 1992. Freshwater-Seawater relationship within a groundwater flow system, Northeastern coast of the Yucatán Península. V. 30, No 3-Ground Water-

Morales-Ojeda, SM, Herrera-Silveira, JA, Montero, J. 2010. Terrestrial and oceanic influence on spatial hydrochemistry and trophic status in subtropical marine nearshore waters. Water Research, 44: 5949-5964.

Morell I., Tuñón J. (2001). Vulnerabilidad de acuíferos costeros en el área Mediterránea, presentado en ponencias del taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación. metodología, Toluca, México

Morgan, J., and Warner, M., 1999. Chicxulub: the third dimension of a multi-ring impact basin. *Geology,* 27(5):407–410.
http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0407:CTTDOA>2.3.CO;2

Morgan, J., Warner, M., the Chicxulub Working Group, Brittan, J., Buffler, R., Carmargo, A., Christeson, G., Denton, P., Hildebrand, A., Hobbs, R., Macintyre, H., Mackenzie, G., Maguire, P., Marin, L., Nakamura, Y., Pilkington, M., Sharpton, V., Snyder, D., Suarez, G., and Trejo, A., 1997. Size and morphology of the Chicxulub impact crater. *Nature,* 390(6659):472–476. **http://dx.doi.org/10.1038/37291**

Morgan J. V., Christeson G., Zelt C., 2002, Testing the resolution of a 3D velocity tomogram across the Chicxulub crater, Tectonophysics, 355, 215–226.

Morgan J.V., Warner M., Urrutia-Fucugauchi J., Gulick S., Christeson G.L., Barton P., Rebolledo M., Melosh J., 2005, Chicxulub crater seismic survey prepares way for future drilling. EOS (Transactions American Geophysical Union), 86, 36, 325.

Morgan J.V., Lana C., Kearsley A., Coles B., Belcher C., Montanari S., Díaz-Martínez E., Barbosa A., Neumann V., 2006, Analayses of shocked quartz at the global K-P boundary indicate an origin from a single, high-angle, oblique impact at Chicxulub. Earth Planet. Sci. Lett., 251, 264-27.

Morgan, J.V., Warner, M.R., Collins, G.S., Grieve, R.A.F., Christeson, G.L., Gulick, S.P.S., and Barton, P.J., 2011. Full waveform tomographic images of the peak ring at the Chicxulub impact crater. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth,* 116(B6):B06303.
http://dx.doi.org/10.1029/2010JB008015

Morgan, J.V., Warner, M.R., Collins, G.S., Melosh, H.J., and Christeson, G.L., 2000. Peak-ring formation in large impact craters: geophysical constraints from Chicxulub. *Earth and Planetary Science Letters,* 183(3–4):347–354. **http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00307-1**

Morgane Derrien, Flor Arcega Cabrera, Nadia Libertad Velazquez Tavera, Cristian A. Kantún Manzano, Santiago Capella Vizcaino. 2015. Sources and distribution of organic matter along the Ring of Cenotes, Yucatan, Mexico: Sterol markers and statistical approaches. Science of the Total Environment 511 (2015) 223–229

Morris, B. L., 1994. Impact of urbanisation on groundwater in Merida, Mexico, Final Report, British Geological Survey, Technical Reports, WC/94138, 23 p.

Nakano, Y., Goto, K., Matsui, T., Tada, R., Tajika, E., 2008, PDF orientations in shocked quartz grains around the Chicxulub crater: Meteoritics and planetary Science 43(4), 745-760.

NASA-Jet Propulsion Laboratory, 2003, PIA03380: Anaglyph, Yucatan Peninsula, Mexico, http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03380, (acceso libre), fecha de publicación: 06/03/2006, fecha de consulta: 03/2012.

Orellana, R., A. Escamilla y A. Larqué-Saavedra, Ecofisiología Vegetal y Conservación de Recursos Genéticos, Ed. CICY, Mérida, Yucatán, México, 1999).

Orellana, L. R., Espadas, M. C., 2002, Aplicaciones de los Diagramas Ombrotérmicos de Gaussen Modificados, en la Península de Yucatán, Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Orellana, R., A. Escamilla y A. Larqué-Saavedra, Ecofisiología Vegetal y Conservación de Recursos Genéticos, Ed. CICY, Mérida, Yucatán, México, 1999).

Orellana, L. R., Espadas M. C., 2010, Atlas de Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Disponible en: http://www.cambioclimatico.yucatan.gob.mx/escenarios-cambio-climatico/index.php

Oropeza, O. O., Enríquez, G.C., 2003, Programa Estatal de Ordenamiento Territorial del Estado de Yucatán, Caracterización y Diagnósticos Sectoriales. Instituto de Geografía de la UNAM. México. 241-247.

Ortega-Nieto A., Urrutia-Fucugauchi J., Pérez-Cruz L., 2009. Petrological, magnetic and geochemical characterization of Cretaceous. Paleogene boundary El Mimbral and Lajilla sections, NE Mexico. EOS (Trans. Am. Geophys. Union), V51C-1701.

Ortiz-Alemán C., Urrutia-Fucugauchi J., Pilkington M., 2001, Three-dimensional modeling of aeromagnetic anomalies over the Chicxulub crater. Lunar Planet. Sci. Conf., XXXII, Houston, Texas, Conference CD Files.

Ortiz-Aleman, C., Urrutia Fucugauchi, J., and Pilkington, M., 2001. Three-dimensional modeling of aeromagnetic anomalies over the Chicxulub crater [presented at 32nd Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, 12–16 March 2001]. (Abstract 1962)

Ortiz-Alemán C., Urrutia-Fucugauchi J., 2010, Aeromagnetic anomaly modeling of central zone structure and magnetic sources in the Chicxulub crater. Phys. Earth Planet. Int., doi:10.1016/j.pepi.2010.01.007.

Pacheco A. J. Sauri, Ma. Rosa R. Cabrera, Armando S. 1997. Impacto de la Porcicultura en el Medio Ambiente. Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería. Yucatán, México. Vol 1 No. 3 Pp. 53-58.

Pacheco-Ávila, J., Cabrera-Sansores, A., Calderón-Rocher, L., Marín, L., Steinich, B., Escolero, O., 2002(a), Delineación de una zona de protección para el abasto de agua en Mérida, Yucatán, México, Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Memorias), 11 pp.

Pacheco-Ávila, J., Cabrera-Sansores, A., Graniel-Castro, E., Vázquez-Montalvo, J., Pérez-Ceballos, R., 2002(b), Diagnostico de la calidad del agua subterránea y evaluación de la infraestructura física de los sistemas de abastecimiento municipales en el estado de Yucatán (YUC-2002- CO1-8721), (Inédito).

Pacheco Ávila Julia, Calderón Roche Lorena, Cabrera Sansores Armando. (2004). Delineación de la zona de protección hidrogeológica para el campo de pozos de la planta Mérida I, en la ciudad de Mérida, Yucatán, México, “Ingeniería revista Académica” Vol.8, No. 001, pp. 7-16. Universidad Autónoma de Yucatán.

Patiño, Fernando. Estudio Técnico Justificatorio para cambio de uso de Suelo, Instituto de Vivienda del Estado de Yucatán, Yucatán, México, 2010

Penfield G. T., Camargo-Zanoguera A., 1981, Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetics and gravity, in: Technical Program, Abstracts and Bibliographies, 51st Annual Meeting, p. 37, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

Pérez C.R. (2003). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Tesis de Maestría. Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, 7-14

Pérez Ceballos, R.Y. 2011. Modelo Hidrogeoquímico para la zona del anillo de cenotes de Yucatán, México. Tésis de Grado Doctor en Ciencias. CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Depto. Recursos del Mar. Yucatán, México.

Perry, E., J. Swift, J. Gamboa, A. Reeve, R. Sanborn, L. Marin y M. Villasuso. 1989. Geologic and environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatan, Mexico. Geology, Vol. 17: p. 818-821.

Perry, E.; L. Marín; 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, v. 23, no. 1. p. 17-20.

Perry, E. and G. Velázquez. (1993), Determination of flow directions in the ring of cenotes in the Yucatan State, Mexico. (abs): Geos (Unión Geofísica Mexicana), V. 13, No. 5, pp 59.

Perry, E., Velazquez-Oliman, G., and Marín, L., 2002. The hydrogeochemustry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, México. International Geolohy. 191-221.

Pierazzo, E., Hahmann, A.N., and Sloan, L.C., 2003. Chicxulub and climate: radioactive perturbations of impact-produced S-bearing gases. *Astrobiology,* 3(1):99–118. **http://dx.doi.org/10.1089/153110703321632453**

Pilkington M., Hildebrand A.R., 2000, Three-dimensional magnetic imaging of the Chicxulub crater. J. Geophys. Res., 105, 23, 479-23,491.

Pilkington M., Hildebrand A.R., Ortíz-Alemán C., 1994, Gravity and magnetic field modeling and structure of the Chicxulub crater, Mexico. J. Geophys. Res., 99, 13,147-13,162.

Plan de Desarrollo Estatal 2012-2018.Yucatán. 2013. Gobierno del Estado de Yucatán 2012-2018. Mérida, Yucatán, México.

Polanco, R.A. 2011. Atlas de riesgo por contaminentes orgánicos persistentes –COPs- (pesticidas) y su relación a canceres en Yucatán. México. UADY-CONACYT. Yucatán, México.

Pope K.O., Ocampo A.C., Duller C.E., 1993, Surficial geology of the Chicxulub impact crater, Yucatan, Mexico. Earth Moon Planets, 63, 93–104.

Pope, K., Ocampo, A.C., Kinsland, G.L., Smith, R., 1996, Surface expression of the Chicxulub crater, Geology, 24(6), 527–530.

Pope, K.O., Baines, K.H., Ocampo, A.C., and Ivanov, B.A., 1997. Energy, volatile production, and climatic effects of the Chicxulub Cretaceous/Tertiary impact. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 102(E9):21645–21664. **http://dx.doi.org/10.1029/97JE01743**

Pope K.O., 2002, Impact dust not the cause of the Cretaceous-Tertiary mass extinction. Geology 30, 99-102.

Pope K., Ocampo A.C., Fisher A.G., Vega F., Ames D.E., King D.T., Fouke B., Wachtman R.J., Kleteschka G., 2005. Chicxulub impact ejecta deposits in southern Quintana Roo, Mexico, and central Belize. Geol. Soc. Am. Sp. Pap., 384, 171–190.

Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán. Decreto Número 801, Diario Oficial del Estado de Yucatán, Julio 2007

Rebolledo-Vieyra M., Urrutia-Fucugauchi J., Marin L., Trejo A., Sharpton V.L., Soler A.M., 2000, UNAM scientific shallow-drilling program of the Chicxulub impact crater. Intern. Geol. Rev., 42, 928-940.

Rebolledo-Vieyra, M., and Urrutia-Fucugauchi, J., 2004. Magnetostratigraphy of the impact breccias and post-impact carbonates from borehole Yaxcopoil-1, Chicxulub impact crater, Yucatán, Mexico. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(6):821–830. **http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00932.x**

Rebolledo-Vieyra, M., and Urrutia-Fucugauchi, J., 2006. Magnetostratigraphy of the Cretaceous/Tertiary boundary and early Paleocene sedimentary sequence from the Chicxulub impact crater. *Earth, Planets and Space,* 58(10):1309–1314.
http://link.springer.com/article/10.1186%2FBF03352626#page-1

Rebolledo-Vieyra, M., 2009, Aspectos geológicos de la cuenca del Caribe, in Espinoza-Ávalos, J., Islebe, G. A., Hernández-Arana, H. A., (Editores), El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: costa occidental del Mar Caribe, El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR).

Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia-Fucugauchi, J., and López-Loera, H., 2010. Aeromagnetic anomalies and structural model of the Chicxulub multiring impact crater, Yucatán, Mexico. *Revistas Mexicana de Ciencias Geológicas,* 27:185–195. (in Spanish with English abstract)
http://www.redalyc.org/pdf/572/57214937016.pdf

Robertson D.S., McKenna M.C., Toon O.B., Hope S., Lillegraven J.A., 2004, Survival in the first hours of the Cenozoic. Geol. Soc. Am. Bull., 116, 760-768.

Rodriquez, F.G. 2010. Expresión genética en peces cebra enjaulados como indicadores de exposición a contaminantes en cuerpos de agua en la zona norte de Yucatán. Reporte Técnico Final. In: Hernández, L.; Rebolledo V.M.; Almazán, B.A y F. Valadéz. 2011. Propuesta de creación de una reserva geohidrológica para el norte del Estado de Yucatán. Reporte Final CONACYT-FOMIX. Centro de investigación Científica de Yucatán, A.C.. Mérida, Yucatán. México.

Rowe, A.J., Wilkinson, J.J, Coles, B.J., and Morgan, J.V., 2004. Chicxulub: testing for post-impact hydrothermal inputs into the Tertiary ocean. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(7):1223–1231.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01138.x

Rzedowski, J., 2005, Vegetación de México, 1ra Edición digital, Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.

Salguero E., Urrutia-Fucugauchi J., Ramírez L., 2010, Fracturing and deformation in the Chicxulub crater – Complex trace analysis of instantaneous seismic attributes. Rev. Mex. Ciencias Geol., 27, 175-184.

Sánchez y Pinto I.A. (1999). Modelo numérico del flujo subterráneo de la porción acuífera N-NW del estado de Yucatán: implicaciones hidrogeológicas. Tesis de Maestría de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Sanford, J.C., Snedden, J.W., and Gulick, S.P.S., in press. The Cretaceous-Paleogene boundary deposit in the Gulf of Mexico: large-scale oceanic basin response to the Chicxulub impact. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
http://dx.doi.org/10.1002/2015JB012615

Sapper, K., 1986, Sobre la geografía física y la geología de la Península de Yucatán, Instituto Geológico de México: boletín, 3.

SARH. (1989). Sinopsis Geohidrológica del Estado de Yucatán. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos. México, D.F., 50 p.

Sartain, N., Mian, J., O`Riordan, N., Storry, R., 2011, Case study on the assessment of sinkhole risk for the development of infrastructure over karstic ground, ISGSR, in Vogt, Schuppener, Straub & Bräu (Editors), Bundesanstalt für wasserbau, ISBN: 978-3-939230-01-4.

Schmitter-Soto J.J., Comín, F.A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, E., Suárez Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L.E., Steinich, B., 2002, Hidrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatán Peninsula (SE México), Hydrobiología, 467, 215-228.

Schulte, P. et al., 2010, The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. Science, 327, 1214-1218.

Servicio Geológico Mexicano (2013). Atlas de peligros por fenómenos naturales del estado de Yucatán. Unidad Estatal de Protección Civil, Gobierno del Estado de Yucatán. México.

Sharpton V.L., Dalrymple G., Marin L., Ryder G., Schuraytz B., Urrutia-Fucugauchi J., 1992, New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary. Nature, 359, 819-821.

Sharpton V.L., Burke K., Camargo-Zanoguera A., Hall S., Marin L., Urrutia-Fucugauchi J., 1993, Chicxulub multiring impact basin: Size and other characteristics derived from gravity analysis. Science, 261, 1564-1567.

Sharpton, V. L., Martín, L. E., Carney, J. L., Lee S., Ryder, G., Schuraytz, B. C., Sikora, P. and Spudis, P. D., 1996, A model of the Chicxulub impact basin based on evaluation of geophysical data, well logs and drill core samples, in Ryder, G., Fastovsky, D., and Gartner, S., eds., The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History: Boulder, Colorado, Geological Society of America: Special Paper 307, p 55-74.
http://dx.doi.org/10.1130/0-8137-2307-8.55

Snyder D.B., Hobbs R.W., 1999, Deep seismic reflection profiles across the Chicxulub crater. In: Dressler, B.O., Sharpton, V.L. (Eds.), Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution, Geol. Soc. Am. Sp. Pap, 339, pp. 263–268.

Smit J., 1999, The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 27, 75-113.

Smit J., Montanari A., Swinburne N.H.M., Álvarez W., Hildebrand A.R., Margolis S.V., Claeys P., Lowrie W., Asaro F., 1992, Tektite-bearing, deep-water clastic unit at the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico. Geology, 20, 99–103.

Smit, J., Van Der Gaast, S., and Lustenhouwer, W., 2004. Is the transition impact to post-impact rock complete? Some remarks based on XRF scanning, electron microprobe, and thin section analyses of the Yaxcopoil-1 core in the Chicxulub crater. *Meteoritics &*

Planetary Science, 39(7):1113–1126. **http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01132.x**

Soki, R., Gaona-Viscayno, S., Perry, E., and Villasuso-Pino, M., 1984, A chemical drill: Suldfur isotope evidence for the mechanism of formation of deep sinkholes in tropical karst, Yucatán, México, Geological Society of America, Abstracts and programs 16, 662.

Steinich, B. y L. Marín, 1997. Determination of flow characteristics in the aquifer of the northwestern Península of Yucatán, Mexico. Journal of Hydrology 191 : 315-331.

Stöffler, D., Artemieva, N.A., Ivanov, B.A., Hecht, L., Kenkmann, T., Schmitt, R.T., Tagle, R.A., and Wittmann, A., 2004. Origin and emplacement of the impact formations at Chicxulub, Mexico, as revealed by the ICDP deep drilling at Yaxcopoil-1 and by numerical modeling. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(7):1035–1067.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01128.x

Stoessell, R.K; W.C. Ward; B.H. Ford y J.D. Schuffert. 1989. Water Chemistry and CaCO3 dissolution in the saline part of an open-flow mixing zone, coastal Yucatán Península, Mexico. Geological Society of America Bulletin, V. 101, p. 159-169.

Swisher III C.C., Grajales-Nishimura J.M., Montanari A., Renne P., Cedillo-Pardo E., Maurrasse F.J.M.R., Curtis G.H., Smit J., McWilliams M.O., 1992, Chicxulub crater melt-rock and K–T boundary tektites from Mexico and Haiti yield coeval 40Ar/39Ar ages of 65 Ma, Science, 257, 954–958.

Tinajero González, J.; L. Velázquez A. y F. D. Zúñiga O. 1981. Estudio de las características geohidrológicas del acuífero en el área de Mérida, Yucatán, y diagnóstico de la contaminación del agua y propuestas de solución para su manejo adecuado. Informe para Discusión, CAP. II.2 del Proyecto CPNH-IAS 8104. Yucatán, México.

Thomas C (1999) Aspects hydrogéologiques du Yucatan (Mexique) Karstologia 34(2):9–22

Trejo, P.J., 1988. Estudio del Sitema CO2-carbonatos en la laguna de Celestún. Tesis. Maestro en Ciencias, CINVESTAV, U. Mérida. México.

Trejo R (1996) Procesamiento de la basura – México. Editorial Trillas México D.F. 283 p.

Universidad Autónoma de Yucatán (Facultad de Arquitectura), 1999. “Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. Proyección cónica conforme de Lambert. Paralelos base: 17° 30’ y 29° 30’. Yucatán, México, D. F. 388 pp.

Unsworth, M., Campos-Enriquez, O., Belmonte, S., Arzate, J., and Bedrosian, P., 2002. Crustal structure of the Chicxulub impact crater imaged with magnetotelluric exploration. *Geophysical Research Letters,* 29(16):1–4. **http://dx.doi.org/10.1029/2002GL014998**

Urrutia-Fucugauchi J., 1992. Characteristic rock magnetic record for the K-T boundary. Results from the Gola de Bottaccioe section Gubbio, Italy. EOS (Trans. Am. Geophys. Union) 73 (43), 153.

Urrutia-Fucugauchi J., 1993, Tektite-bearing deep-water clastic unit at the Cretaceous/Tertiary boundary in NE Mexico-Comments. Geology, 21, 190-191.

Urrutia-Fucugauchi J., Marin L., Sharpton V.L., 1994, Reverse polarity magnetized melt rocks from the Cretaceous/Tertiary Chicxulub structure, Yucatan peninsula, Mexico, Tectono-physics, 237, 105-112.

Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L., and Trejo-Garcia, A., 1996. UNAM scientific drilling program of Chicxulub impact structure—evidence for a 300 kilometer crater diameter. *Geophysical Research Letters,* 23(13):1565–1568. **http://dx.doi.org/10.1029/96GL01566**

Urrutia-Fucugauchi, J., Morgan, J., Stöffler, D., and Claeys, P., 2004. The Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP). *Meteoritics & Planetary Science,* 39(6):787–790. **http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00928.x**

Urrutia-Fucugauchi J., Morgan J., Stoeffler D. Claeys P., 2004a. The Chicxulub scientific drilling project (CSDP). Meteorit. Planet. Sci., 39, 787-790.

Urrutia-Fucugauchi J., Soler A., Rebolledo-Vieyra M., Vera P., 2004b. Paleomagnetic and rock magnetic study of the Yaxcopoil-1 impact breccia sequence, Chicxulub impact crater, Mexico. Meteorit. Planet. Sci., 39, 843-856.

Urrutia-Fucugauchi J., Pérez-Cruz L., 2007, Deep drilling into the Chicxulub impact crater: Pemex oil exploration boreholes revisited. Am. Geophys. Union Joint Assembly, CD Program and Abstracts) U33A-07.

Urrutia-Fucugauchi J., Pérez-Cruz, L., 2008, Post-impact carbonate deposition in the Chicxulub impact crater region, Yucatan platform, Mexico. Current Science, 95, 241-252.

Urrutia-Fucugauchi, J., Chavez-Aguirre, J.M., Pérez-Cruz, L., and De La Rosa, J.L., 2008. Impact ejecta and carbonate sequence in the eastern sector of the Chicxulub crater. *Comptes Rendus Geoscience,* 341(12):801–810. **http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2008.09.001**

Urrutia-Fucugauchi J., Pérez-Cruz L., 2009, Multi-ring-forming large bolide impacts and evolution of planetary surfaces. Int. Geol. Rev., 51, 1079-1102. doi: 10.1080/002068 10902867161.

Urrutia-Fucugauchi, J., Camargo-Zanoguera, A., Pérez-Cruz, L., and Pérez-Cruz, G., 2011. The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatán carbonate platform, Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional,* 50(1):99–127. **http://www.scielo.org.mx/pdf/geoint/v50n1/v50n1a9.pdf**

Vazquez, J., J. Pacheco, D. C. Goody and B. L. Morris, 1997. Contaminación orgánica en el acuífero que subyace la Ciudad de Mérida, Yucatán, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, 7-14.

Velázquez, G. 1995. Estudio geoquímico del anillo de cenotes, Yucatán. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofìsica. México, D.F. 77 pp.

Vellekoop, J., Sluijs, A., Smit, J., Schouten, S., Weijers, J.W.H., Sinninghe Damsté, J.S., and Brinkhuis, H., 2014. Rapid short-term cooling following the Chicxulub impact at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 111(21):7537–7541. **http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1319253111**

Vermeesch, P.M., and Morgan, J.V., 2008. Structural uplift beneath the Chicxulub impact structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth,* 113(B7):B07103. **http://dx.doi.org/10.1029/2007JB005393**

Vickery, A.M., Kring, D. A., Melosh, H. J., 1992, Ejecta associated with large terrestrial impacts: Implications for the Chicxulub impact and K/T boundary stratigraphy, Lunar Planet. Sci. XXIII, 1473-1474.

Villasuso, M y Cols., 1989. Hurricane Gilbert Effects on the Karstic Aquifer NNW of Yucatan, Mexico. Hydrochemical and Geohydrological Historical data. Seminario sobre avances recientes en la Administracion del recurso hidraulico. Facultad de Ingenieria, UADY-Univ. de Winsconsin. USA. Merida, Yucatan, Mexico. Sociedad Mexicana de ingenieria Ambiental y Sanitaria A.C. VI Reunion Regional y I Peninsular. 26 y 27 abril. Perspectivas de la Ingenieria Sanitaria y Ambiental en la Peninsula de Yucatan.

Villasuso Pino, M. J. y R. Méndez Ramos. 1996. Modelo Conceptual del acuífero de la Península de Yucatán. Proyecto Población-Desarrollo-Medio Ambiente. IIASA, CINVESTAV IPN. Reporte Interno. Yucatán, México. p. 18.

Viniegra, O. F., 1981, Great carbonate bank of Yucatán, southern México: Journal of Petroleum Geology, 3, 274-278.

Ward, W.C. & J.L. Wilson. 1974. General aspects of the northeastern coast of the Yucatan península. In: Weidie, A.E. (ed.). Field seminar on water and carbonate rocks of the Yucatan peninsula, Mexico. New Orleans Geological Society Guidebook. Field Trip 2. Geological Society of America Annual Meeting.

Ward, W.C.; A.E. Weidie & Back, W. 1985. Geology and hidrology of tjhe Yucatan and quaternary geology of northeastern Yucatan peninsula. NOGS. 160 p.

Ward, W.C., Keller, G., Stinnesbeck, W., and Adatte, T., 1995. Yucatán subsurface stratigraphy: implications and constraints for the Chicxulub impact. *Geology,* 23(10):873–876. **http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0873:YNSSIA>2.3.CO;2**

Whalen, M.T., Gulick, S.P.S., Pearson, Z.F., Norris, R.D., Perez Cruz, L., and Urrutia Fucugauchi, J., 2013. Annealing the Chicxulub impact: Paleogene Yucatán carbonate slope development in the Chicxulub impact basin, Mexico. *In* Verwer, K., Playton, T.E., and Harris, P.M. (Eds.), *Deposits, Architecture, and Controls of Carbonate Margin, Slope and Basinal Settings*. Special Publication—SEPM (Society for Sedimentary Geology), 105:282–304.

Whalen, M.T., Pearson, Z.F., Gulick, S.P.S., and Norris, R.D., 2008. Sequence stratigraphy of the Chicxulub crater infill and Yucatán carbonate platform development: implications for the evolution of large terrestrial impact craters. *Geological Society of America Abstracts with Programs,* 40(6):407.

https://gsa.confex.com/gsa/2008AM/finalprogram/abstract_151599.htm

Wilson, E. 1980. Physical Geography of the Yucatán Península. In: Museley, E.H. y E.D. Terry. Yucatán: A World Apart. Univ. of Alabama Press. USA.

Wittmann, A., Kenkmann, T., Schmitt, R.T., Hecht, L., and Stöffler, D., 2004. Impact-related dike breccia lithologies in the ICDP drill core Yaxcopoil-1, Chicxulub impact structure, Mexico. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(6):931–954. **http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00938.x**

Wittmann A., 2004, Origin and emplacement of the impact formations at Chicxulub, Mexico, as revealed by the ICDP deep drilling at Yaxcopoil-1 and by numerical modeling. Meteorit. Planet. Sci., 39, 1035-1067.

Wittmann A., Kenkemann T., Hecht L., Stoeffler D., 2007, Reconstruction of the Chicxulub ejecta plume from its deposits in drill core Yaxcopoil-1. Geol. Soc. Am. Bull., 119, 1151-1167.

Zürcher, L., and Kring, D.A., 2004. Hydrothermal alteration in the core of the Yaxcopoil-1 borehole, Chicxulub impact structure, Mexico. *Meteoritics & Planetary Science,* 39(7):1199–1221.
http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb01137.x

XII).- ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DEL ACUÍFERO COSTERO

El aprovechamiento del agua vertida al mar en los acuíferos costeros es importante, por lo que todas las alternativas de gestión deben considerar, no solo la cantidad de agua disponible, sino su calidad y su evolución en el tiempo, ya que toda reducción de flujo al mar implica modificación del balance de sales, con incremento de la salinidad. Su consideración es importante cuando existe recarga con aguas residuales o excedentes de riego, o es de esperar una gran dispersión en la zona de la interfase salina.

Diferentes alternativas de gestión se detallan a continuación:

1.- Incrementar el bombeo permitiendo una mayor penetración de la cuña salina, reubicando si es preciso las captaciones (puede decirse que este es el modelo de gestión prevaleciente, junto con el punto 6 que se describe mas adelante). No se reduce completamente el flujo de agua dulce al mar, aunque pueden colocarse colectores costeros (como en el caso de Progreso y la región metropolitana).

2.- Establecer barreras de inyección costeras con agua propia (de reutilización) o bien con agua importada, una pequeña parte de la cual se perderá en el mar.

3.- Establecer depresiones de bombeo, combinadas o no con barreras de inyección, dejando fluir cierta cantidad de agua dulce al mar o a los pozos de extracción de agua salada. Se logra colocando una línea de pozos de bombeo dentro de la cuña salina a lo largo de la costa, tal que intercepte todo el flujo de agua salada hacia el interior.

4.- Establecer barreras físicas, aunque este procedimiento aparece como técnica o económicamente inviable en muchos casos.

5.- Recarga artificial de agua importada o de aguas de reutilización con diferentes esquemas de recarga y bombeo.

6.- Permitir una profunda intrusión marina, extrayendo el agua dulce con numerosas captaciones de escasa profundidad y pequeño caudal (puede decirse que este también es el modelo de gestión prevaleciente). Se pierde gran capacidad de regulación y es preciso establecer embalses de superficie, el acuífero no sopota sobreexplotaciones temporales en épocas de secas o especiales sin que se produzca salinización (como la zona hortícola y ganadera).

7.- Reducción del bombeo si la explotación es superior a la recarga o bien, aunque no lo sea, produce una penetración de la cuña salina, puede procederse a reducir el bombeo hasta que la posición de equilibrio sea la deseada. La reducción del bombeo supone encontrar un nuevo abastecimiento de agua a costos asequibles. También no siempre es fácil establecer herramientas legales precisas para controlar y reducir los bombeos.

8.- Combinaciones de los anteriores esquemas.

XII.1).- PROPUESTA DE MONITOREO HIDROGEOLÓGICO GENERAL DE LA ZONA DE ORDENAMIENTO (CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA)

Para una adecuada interpretación del fenómeno que gobierna la coexistencia de aguas dulces y saladas en los acuíferos costeros, se requiere un entendimiento general de la situación hidrogeológica de la zona de ordenamiento. Lo anterior permitirá definir y adquirir datos relacionados con el movimiento del agua subterránea y, particularmente, de las características geológicas, la estatigrafía de los sedimentos y las tendencias estructurales, asi como la distribución espacial de la permeabilidad y sus características dentro del acuífero (permeabilidad primaria – porosidad -, permeabilidad secundaria – fisuras – anisotropía hidrogeológica). Es importante la identificación de ciertas estructuras como barreras impermeables, fracturas, fallas, fisuras, conductos de disolución, manantiales, etc.

Se requiere elaborar un buen mapa geológico que será esencial para la comprensión del desarrollo del acuífero costero. En las rocas carbonatadas, la solubilidad de los minerales de carbonato juegan un importante papel en la distribución actual de la permeabilidad, junto con los cambios del nivel del mar. La carstificación y los procesos diagenéticos (dolomitización) deben ser considerados, debido a que tiene una gran influencia en el patrón espacial de la porosidad y la permeabilidad. En ocasiones, la presencia de sedimentos arcillosos y otros materiales menos solubles deben ser conocidos para interpretar la evolución de la permeabilidad secundaria (clausura de fisuras en rocas fracturadas).

Los acuíferos cársticos son mucho mas complejos que otros acuíferos fisurados. La generalización y extrapolación puede ser imposible. Pueden existir diferencia substanciales entre una parte de la región y otra. Aun cuando el área involucrada sea muy pequeña. Estas diferencias se deben a ciertos atributos como la geometría e hidrodinámica del acuífero, la forma en que ocurre la recarga y la descarga al mar, el patrón de movimiento del agua subterránea y sus propiedades químicas conectadas con la intrusión salina hacia tierra firme. Estos aspectos son influenciados no solo por el grado de fracturamiento de la roca, sino también por tres factores:

a).- La marcada anisotropía que gobierna los procesos genético-evolutivos, y la distribución y orientación espacial de los conductos cársticos.
b).- Los cambios paleogeográficos que en ocasiones afectan a varias partes de una gran región, que pueden resultar en cambios en los procesos de desarrollo de cavidades cársticas por cambios en los niveles del agua subterránea. Verticalmente entonces puede haber otros niveles de agua de espesores considerables separados por capas impermeables.
c).- El efecto de la Terra Rossa. Material producto de los procesos cársticos que puede obstruir conductos de disolución.

Es evidente que un análisis tectónico-estructural y estadístico del fracturamiento, llevados a cabo por nucleadores, y de los conductos cársticos subhorizontales, combinado con una valoración paleogeográfica, son esenciales cuando se estudia a profundidad un acuífero cárstico.

Cuando hay presencia de manantiales costeros, es importante reconocer lo mas posible la zona de alimentación de dichos manantiales, las condiciones de infiltración y la

estructura del acuífero, especialmente en el área de descarga, por lo que se requiere estudios geológicos subsuperficiales y el uso de trazadores. La información debe poner énfasis en las características geomorfológicas y topobatimétricas que juegan un importante papel en el desarrollo de los manantiales. Es importante correlacionar las características físico-químicas del acuífero que alimenta a dichos manantiales y poner una atención especial en las acciones antropogénicas. La percepción remota puede ser muy útil para un inventario de manantiales subaereos y submarinos.

1). Inventarios.

Inventarios de pozos, norias cenotes, aguadas, fracturas, manantiales, niveles de agua, datos hidrométricos e hidrometereológicos, gastos, etc, es la forma mas sencilla y barata para adquirir información de la situación presente y de conocer la evolución en el pasado. Para acuíferos costeros se debe hacer énfasis en:

a).- Salinidad del agua, su variación y distribución horizontal y vertical.
b).- La interfase entre agua dulce y salada. Interfase salina o zona de mezcla.
c).- La distribución precisa de las zonas permeables (fracturas) y las cabezas hidroestáticas a lo largo de pozos alineados.
d).- La existencia, importancia y variabilidad de los manantiales costeros.
d).- El nivel de agua de mar y los cambios en la línea de costa, como resultado de las mareas o tormentas, o a procesos de largo periodo (erosión - sedimentación).
e).- hundimientos de áreas planas no consolidadas.

2). Observación periódica de pozos construidos para el estudio espacial del acuífero a través del espesor del acuífero hasta algunos metros por debajo del agua de mar.

a).- Fluctuaciones del nivel del agua subterránea
b).- Estratificación térmica-salina-química del agua subterránea.
c).- Cambios en la posición de la interfase salina y zona de mezcla..
d).- Velocidad y dirección del flujo del agua subterránea.
e).- Corrientes verticales.
f).- Pesticidas, herbicidas, fertilizantes, sanitarios, hidrocarburos.
g).- Correlaciones con la recarga por lluvia y con las extracciones para usos humanos.

Se debe cuidar que los pozos de observación no se ubiquen cerca de áreas donde existan conos de depresión causados por pozos que estén operando para surtir algún desarrollo. Es muy importante distinguir entre los pozos de observación para estudiar los efectos de los conos de depresión causado por el abatimiento del nivel de agua por extracciones artificiales, o la penetración de la intrusión salina, de aquellos pozos de observación para estudiar los aspectos generales del régimen hidrogeológico.. Los primeros estarían colocados alrededor del pozo de servicio, generalmente utilizando el mismo criterio adoptado por los piezómetros; su numero, el espacio entre ellos y profundidad dependiendo de la anisotropía y permeabilidad del acuífero, nivel estático del agua por encima del nivel del mar y la cantidad de dinero disponible

3).- Mediciones de salinidad.

Realizar mediciones horizontales y verticales in situ de la salinidad, medida como conductividad eléctrica, el cual depende esencialmente de la salinidad, pero también varia por la temperatura y de cierto porcentaje de iones, que en aguas sódico-cloruradas estas ultimas pueden tener poca influencia.

4).- Mediciones de temperatura.

La temperatura, al igual que la composición química y los isótopos naturales, constituyen un efectivo trazador ambiental para estudiar el origen del agua subterránea y su movimiento en general y es mas útil cuando se toma en cuenta la intrusión salina.

5).- Mediciones de parámetros químicos.

Los aspectos químicos del agua subterránea son factores importantes para entender y evaluar el patrón de flujo subterráneo. Los aniones fundamentales son cloro, sulfato, bicarbonato, carbonato, fosfatos, nitratos y nitritos. Los cationes fundamentales son calcio, magnesio, sodio, potasio, y amonio. Algunos gases como bióxido de carbono y oxigeno. También el silicio en su forma no iónica. La salinidad y la composición química es una función compleja de la litología, las características del suelo y la vegetación, clima y el patrón de distribución del agua. Algunas de estas relaciones pueden caracterizarse como las proporciones entre cada uno de ellos o a través de diagramas químicos (diagrama de Piper)

EL agua dulce o continental, si no esta muy contaminada por la actividad humana, es generalmente del tipo cálcico-carbonatadas, las proporciones entre los iónes alcalinos y los alcalinotérreos son mayores que en el agua de mar. Por su lado el agua de mar se caracteriza por predominar los iónes de cloro y sodio. Lo anterior permite definir los tipos de agua presentes en el sitio (rSO4/rCl, rNa/rCl, Mg/Ca, Cl/HCO3, rNa/rK.) Lo anterior permite definir áreas donde los procesos de baja saturación de calcita se presentan en el acuífero.

Se deberán elaborar mapas hidroquímicos del área tanto horizontal como vertical.

6).- Prospecciones geofísicas eléctricas y sísmicas.

Pueden dar una buena información de la estructura subsuperficial, la litología, la tendencia de los contactos y cantidad y calidad de las aguas almacenadas, la cual complementa las investigaciones de acuíferos afectados por la intrusión salina, así como identificar la porosidad total de la roca calcárea y localizar las cavidades y fracturas.

7).- Uso de trazadores artificiales.

Medición del flujo subterráneo como indicador de la permeabilidad del acuífero y transmisividad así como de las descargas por el método de dilución. Variaciones horizontales y verticales.

8).- Identificación y monitoreo de la zona de dispersión.

El muestreo de los parámetros físico-químicos (en especial la temperatura y la salinidad) de manera frecuente en una red de pozos de observación es la mejor manera de identificar la zona de dispersión y sus cambios en el tiempo.

a).- Relación entre el espesor de la zona de dispersión y la distancia al mar.
b).- Relación entre permeabilidad y orientación de las discontinuidades tectónicas.
c).- Variaciones de la presión atmosférica y de los niveles aperiodicos del mar.

La magnitud de la recarga y los flujos de descarga se dan por la variación en el espesor de las aguas subterráneas medida desde el nivel de la tabla de agua (superficie piezométrica) a la zona de dispersión. La recarga y la extracción son los principales factores que influencian el movimiento de la zona de dispersión.

9).- Percepción remota. La aplicación específica de este método es para la identificación de manantiales costeros, revelando anomalías de temperatura en la superficie del mar.

10).- Monitoreo de la calidad y cantidad de agua superficial en lagunas costeras, cenotes, aguadas, charcas salineras, zonas de manglar, zonas de arrecifes incipientes. Parámetros fisicoquímicos y biológicos, particularmente aquellos que promuevan procesos de eutroficación o que los identifiquen.

11).- A partir de aquí, se podrán identificar claramente los impactos que las actividades humanas ejercen sobre el recurso hídrico, el cual sostiene una rica biodiversidad y una heterogeneidad ambiental en el sitio.

a.- Efectos directos.
- Extracciones de agua subterránea.
  - Reducción de la descarga al mar.
  - Penetración de la cuña salina.
  - Extracciones mayores que la recarga.
  - Caída de la tabla de agua, cono de abatimiento.
  - Salinización del aprovechamiento.
  - Conexiones entre diferentes capas de acuíferos confinados.

b.- Efectos indirectos.
- Acciones que afectan la recarga del agua subterránea.
  - Urbanización
  - Instalación de colectores o sistemas de distribución de agua.
  - Salinización de suelos.
  - Decremento de la infiltración por deforestación y cambios en la vegetación por contaminación salina de los suelos.
  - Canalizaciones y almacenamiento artificial del agua.
  - Desecación de zonas húmedas.
  - Canalizaciones del mar hacia tierra adentro.
  - Modificaciones de la línea de costa y pérdida de manantiales.

Este criterio se aplica para todas las regiones hidrológicas del área de ordenamiento. (I a VII), y en aquellos donde existe un Area Natural Protegida (regiones hidrológicas I, II, V, VI y VII) requerirá de la opinión técnica de la Dirección de la Reserva, federal o estatal.

Métodos de remediación y control de la intrusión salina.

La explotación de agua subterránea en los acuíferos costeros reduce la disponibilidad de agua dulce (oligohalina) en la zona de descarga (mar o lagunas o ciénagas). Por lo general la lenta respuesta de la intrusión salina o zona de mezcla produce una falsa seguridad sobre las explotaciones sostenidas que exceden la recarga del acuífero. Cuando un desarrollo se enfrenta con la intrusión salina y la contaminación del acuífero, el principal objetivo es la conservación de la calidad del agua subterránea en la zona de extracción (pozos, cenotes, etc), de la intrusión salina así como el de disponer aguas saladas que ocupan las partes bajas de los acuíferos.

La explotación del acuífero costero implica consideraciones como:

- El desarrollo del acuífero costero.
- La prevención de la salinización.
- Métodos para remediar y detener la intrusión salina.
- Métodos para sostener la explotación actual.

a.- Definir las consideraciones generales para prevenir la intrusión salina en los predios donde se explote el agua subterránea.
b.- Construcción y operación de los trabajos de explotación del acuífero.
c.- Explotación de manantiales costeros.
d.- Métodos para mejorar o remediar la intrusión salina en el acuífero.

- Reducción de la explotación.
- Substitución de aprovechamientos.
- Recarga artificial
- Corrección de los pozos.

e.- Métodos para mantener la explotación existente del acuífero.

- Barreras físicas.
- Barreras de inyección hidráulica.
- Barreras hidráulicas por bombeo.

f.- Control activo del cono de abatimento en el pozo.
g.- Uso de los acuíferos salinos para almacenar agua dulce y disposición de aguas residuales.
h.- Combatir la salinización a través de las aguas superficiales.

Todo lo anterior permitirá elaborar un Programa de Manejo Hidrológico y alternativas para desarrollar el acuífero costero.

Es posible utilizar el censo de aprovechamientos hidráulicos subterráneos de la CNA – UADY del 2002, donde reporta 30 norias existentes, el cual será necesario actualizarlo, mas los 5 pozos que se realizaron por la Facultad de Ingeniería de la UADY para el estudio del 2002 en el occidente (mencionados en el apartado de geología), complementando con las estaciones referidas para la ría de Celestún y los transectos prependiculares a la costa instalados e incorporando cenotes y manantiales que se encuentran en los diferentes geosistemas. .

En la zona de estudio se presenta una situación interesante con relación a la descarga de los flujos de agua subterránea en la zona cercana al Anillo de Cenotes. En este sitio se manifiesta también elevaciones importante del nivel estático debiendo ser incorporado en cualquier modelo hidrodinámico como la zona de recarga de la zona costera noroccidental (Dzilám de Bravo – Celestún). El manejo de la Cuenca Sedimentaria de Chicxulub. Este criterio se aplica para todas las regiones hidrológicas del área de ordenamiento. (I a VII).