

# Geohidrología de la Isla de Cozumel, Q. Roo

Heinz LESSER JONES  
 Jorge AZPEITIA REYES  
 Juan M. LESSER ILLADES  
 Ingenieros geólogos \*

## SINTESIS

*La Isla de Cozumel, Q. Roo, tiene características geológicas, litológicas y estructurales muy especiales, lo cual ha originado la presencia de un acuífero calcáreo subterráneo, de gran permeabilidad, que se encuentra en contacto con el agua de mar, y flotando sobre ésta, por su menor densidad, ocasionando que la obtención de agua dulce para el abastecimiento de su población sea un problema que encara condiciones limitantes. Con el objeto de conocer el funcionamiento del acuífero dulce existente y planear la forma apropiada de su explotación y conservación, y evitar o disminuir las condiciones difíciles de contaminación, la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, en atención a instrucciones de la Superioridad de la SARH, llevó a cabo el Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de dicha isla. Sus resultados, condiciones, recomendaciones y medidas de control sobre tan importantes aspectos se exponen en el presente trabajo.*

*Las características geohidrologicas que aquí se describen —pues la Isla se consideró como modelo para el estudio representativo de acuíferos en rocas calizas— deben hacerse extensivas a las zonas costeras turísticas de toda la Península de Yucatán, donde se presentan condiciones similares de disponibilidades de aguas dulces y el del atractivo de sus playas.*

## INTRODUCCION

El desarrollo de la Isla de Cozumel, como paraíso turístico de atracción mundial, se debe principalmente a la tibieza, transparencia, pureza y policromía luminosa de las aguas del Caribe que la rodean, con sus playas que reflejan la luz tropical, formadas por suaves sedimentos y arenas blancas calcáreas, en las cuales la exuberante vida marina arrecifal es propiciada por sus características especiales de ecología natural. Por lo tanto, demanda, apremiantemente, la preservación de esas extraordinarias e invaluable cualidades, evitando su deterioro y el de sus disponibilidades de

aguas dulces, por la contaminación creciente impuesta, como tributo, a ese benéfico y productivo desarrollo.

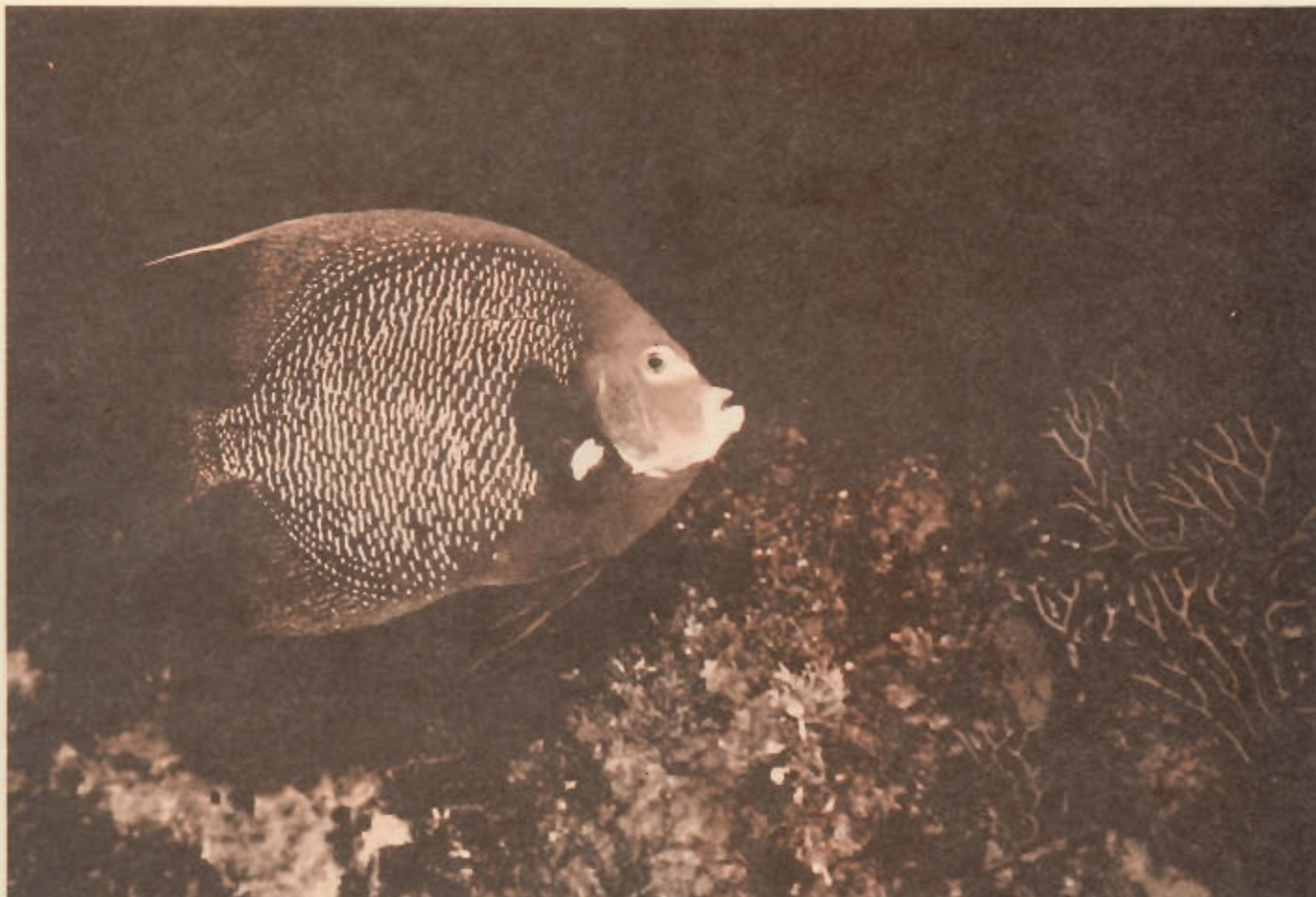
Ya desde los mayas, fue uno de los 3 grandes centros de peregrinación religiosa, que Landa comparaba con Jerusalén y Roma. En la isla se encontraba el templo principal de la Diosa de la Luna, Ixchel, y sus visitantes, que acudían del Norte de Yucatán, fueron estimados por los historiadores, tal vez exageradamente, en multitudes hasta de 40 000 almas. También se peregrinaba en la Península, a la ciudad de Itzamal, sede del Dios Supremo y del Dios del Sol, Kinich Malmó. Chichen-Itzá, con su pozo sagrado del Dios de la Lluvia, Chac, era el más importante de dichos 3 centros ceremoniales.

Las anteriores referencias sobre la Isla y otras anotadas por los cronistas, al inicio de la conquista española, que acompañaban a Grijalva y a Cortés, indican que dichos capitanes llegaban y regresaban a Cozumel, pues era un lugar seguro para abastecerse de agua dulce y alimentos.

Durante la dominación hispánica se relata que la actividad productora de sus numerosos habitantes, se manifestaba por la existencia de cuando menos un ingenio abastecido con caña de azúcar, cultivada en el lugar. Todo lo anterior confirma que hay y había fuentes de agua dulce, aprovechadas para su abastecimiento de agua potable, captadas seguramente de cenotes o pozos, que era extraída del almacenamiento o manto acuífero que se extiende bajo el subsuelo de la Isla, mismo que ahora se explota y que, en la temporada en que recibe por infiltración, aguas de lluvia, ocasiona salidas en manantiales que desfogan al mar y que pueden absorberse a lo largo de sus costas.

Este manto o lente de agua dulce, por su menor densidad, está flotando en toda la extensión de la Isla sobre aguas marinas. Su inadecuada captación o su sobreexplotación local o extensiva pro-

\* De la Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas, SARH.



Las playas del Caribe son un paraje turístico de gran atracción.

voca su contaminación por aumento de sales (contaminación química). La inconveniente eliminación de las aguas negras, o de otro tipo de desechos que llegan artificial o naturalmente al acuífero, lo contaminan con elementos de tipo orgánico. Este mismo fenómeno también degrada la ecología de las playas y su vida arrecifal.

De los objetivos que se fijaron para la ejecución del estudio geohidrológico hecho, y que aquí se presenta, destacan por su importancia las recomendaciones que se plantean para fijar e implantar medidas de control, imprescindibles, tanto en la captación de aguas dulces, como en la eliminación de aguas negras, con dispositivos idóneos, que en capítulo especial se describen. Se considera también, como recomendación obligada, la necesidad de que las autoridades municipales, sanitarias y en general todos los habitantes de Cozumel contribuyan a evitar que basuras, desperdicios y desechos sean arrojados a las playas o a lugares donde su destino, por acarreo natural, sea a las mismas o hacia las aguas dulces del subsuelo. Es conveniente disponer que su eliminación se haga por otros procedimientos sanitarios apropiados.

Las características geohidrológicas que aquí se describen, pues la Isla se consideró como modelo

para el estudio representativo de acuíferos en rocas calizas, deben hacerse extensivas a las zonas costeras turísticas de toda la Península de Yucatán, donde se presentan condiciones similares de limitación en disponibilidades de aguas dulces y de contaminación creciente de este recurso y el del atractivo de sus playas.

#### GENERALIDADES

La Isla de Cozumel, Q. Roo, tiene características geológicas, litológicas y estructurales muy especiales, lo cual ha originado la presencia de un acuífero calcáreo subterráneo, de gran permeabilidad, que se encuentra en contacto con el agua salina de mar y flotando sobre ésta por su menor densidad, ocasionando que la obtención de agua dulce, para el abastecimiento de su población, sea un problema que encara condiciones limitantes. Para conocer el funcionamiento del acuífero dulce existente y planear la forma apropiada de su explotación y conservación, y evitar o disminuir las condiciones actuales de contaminación, la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, en atención a instrucciones de la Superioridad y

en base al Proyecto CONACYT-NSF 704, llevó a cabo el Estudio Geohidrológico de dicha Isla. Sus resultados, condiciones, recomendaciones y medidas de control, sobre tan importantes aspectos, se exponen en el presente trabajo.

#### LOCALIZACION

La Isla de Cozumel forma parte del Estado de Quintana Roo. Se localiza en el mar Caribe hacia el extremo Este de la Península de Yucatán, a cuya costa hay una distancia de alrededor de 20 kilómetros. Geográficamente se encuentra entre los paralelos  $20^{\circ}15'$  y  $20^{\circ}35'$  de Latitud Norte y los meridianos  $86^{\circ}45'$  de Longitud Oeste (figura 1).

#### VIAS DE COMUNICACION

La isla está comunicada con el continente por medio de transbordadores que parten de Puerto Morelos y Playa del Carmen hacia la población de Cozumel, haciendo la travesía en una hora. Por lo que respecta a comunicación aérea, cuenta con aeropuerto internacional, al que llegan diariamente vuelos comerciales y particulares. Dentro de la

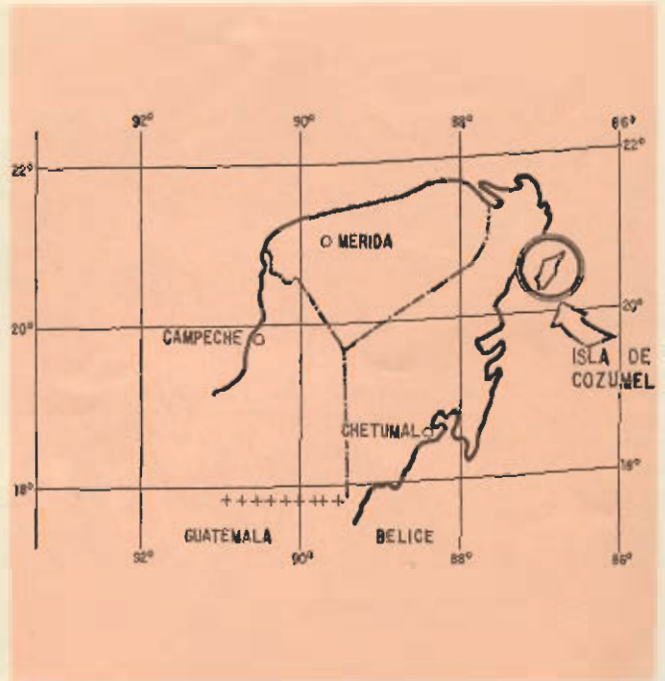
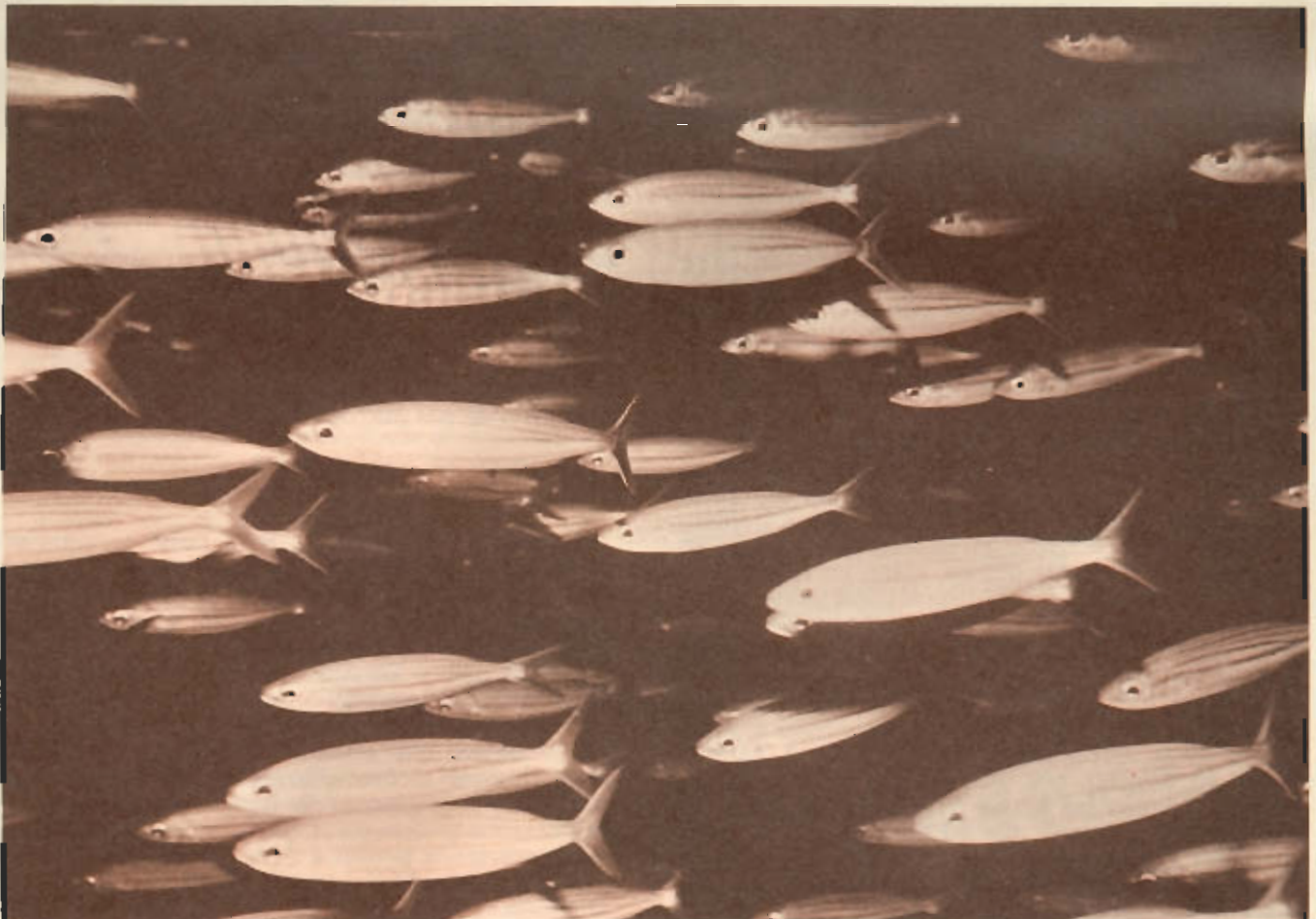


Figura 1. Plano de localización.





Zona de Riego de San Isidro, Q. Roo.

Isla hay las carreteras pavimentadas que se denominan Camino Transversal y Camino Costero. La primera tiene una longitud de 14 kilómetros y la cruza transversalmente, partiendo del puerto de Cozumel. La segunda bordea las dos terceras partes de la Isla, desde el camino transversal hacia el Sur, y tiene una longitud de 50 kilómetros. El resto está pobremente comunicado, existiendo sólo brechas de difícil acceso, principalmente en tiempos lluviosos.

#### AGRADECIMIENTOS

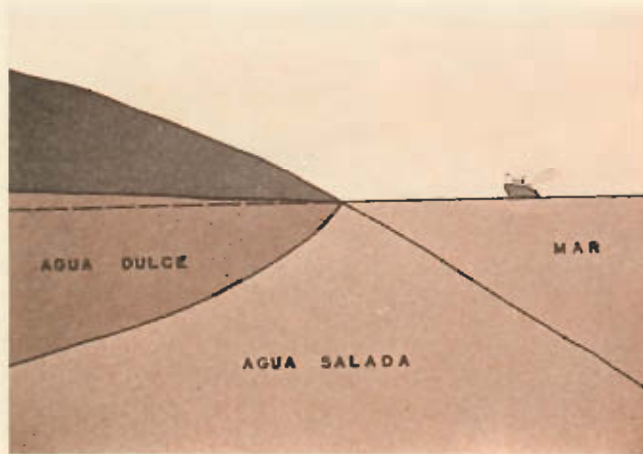
Para hacer posible la elaboración del presente trabajo se contó con la valiosa ayuda de un gran número de personas de la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas de la SARH, entre ellas el Ing. Antonio Trujillo Candelaria, Jefe del Departamento de Exploración; los Ings. Raúl Quintero Carrillo, José Luis Grajales Márquez y Raúl Arredondo Pastor, quienes tuvieron a su cargo las actividades de campo, y el Ing. Rubén Chávez Guillén, quien colaboró en el Capítulo relativo a Hidrología.

#### ACTIVIDADES DE CAMPO

Durante la realización del trabajo, se llevaron a cabo las actividades de campo que se comentan a continuación:



Rocas calizas cársicas.



Representación esquemática de la interfase salina en zonas costeras.

#### RECONOCIMIENTOS HIDROLOGICOS

Para lograr la información necesaria sobre las características hidrogeológicas del sistema acuífe-

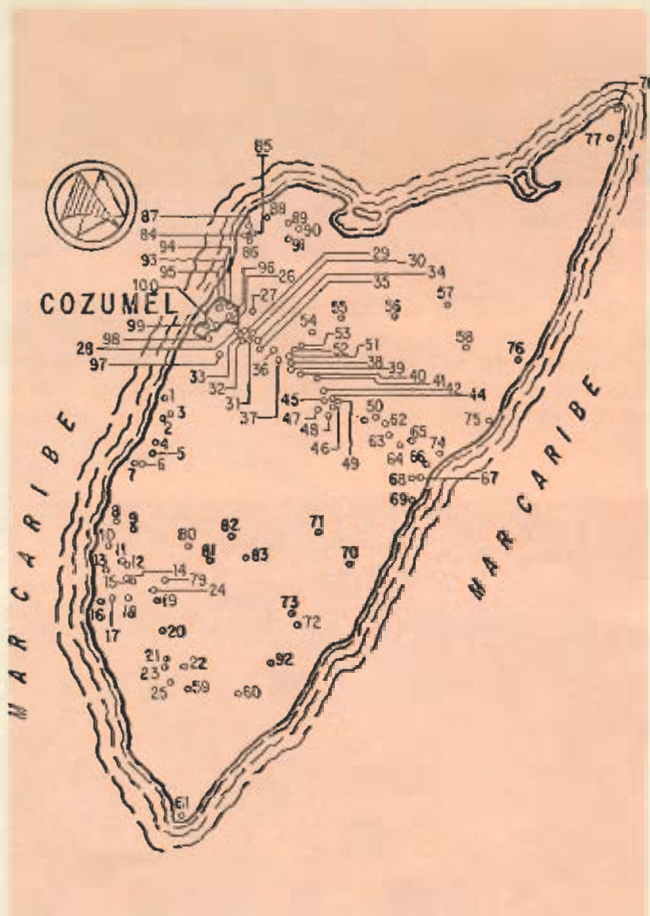


Figura 2. Localización de aprovechamiento de agua subterránea.

ro que existe en la Isla, se llevaron a cabo recorridos de campo en distintas fechas, para lo cual se utilizaron previamente fotografías aéreas de cuyo examen geohidrológico se localizaron áreas y puntos de mayor atención e interés para su examen directo. También se efectuaron reconocimientos aéreos que fueron de gran utilidad en la complementación del conocimiento de las características y condiciones topográficas, geológicas e hidrológicas de la Isla.

Durante los recorridos se seleccionaron los sitios más propicios para localizar las perforaciones y sondeos exploratorios, en forma tal que su ejecución y la obtención de los datos y registros que de ella se derivaron permitieran una integración del sistema acuífero que gobierna la presencia y funcionamiento de las aguas dulces subterráneas aprovechables de la Isla.

#### OBTENCION DE MUESTRAS DE AGUA

Durante los recorridos por la Isla, se registraron 123 aprovechamientos de agua subterránea, cuya localización se muestra en el plano de la figura 2. Estas captaciones corresponden a 14 pozos, 54 norias, 34 cenotes y 21 puyones que constituyen, en conjunto, el abastecimiento de agua de la Isla. Del total de los aprovechamientos, el 20% se encuentra equipado con motores cuyas descargas varían entre 1" y 3", el 45% son explotados por medios manuales y el 35% restante no se utilizan. De dichas captaciones, se obtuvieron 100 muestras de agua, a las cuales se les midió su conductividad eléctrica, y posteriormente fueron enviadas al laboratorio para su análisis químico completo.

#### LECTURAS DE LA PROFUNDIDAD AL NIVEL FREATICO

Con el objeto de configurar la profundidad a la cual se encuentra la superficie del acuífero y re-



Cenote característico de la península de Yucatán y de la isla de Cozumel.



Aprovechamiento del agua subterránea a través de norias.

presentarla gráficamente, se efectuaron mediciones en 40 lugares que tienen acceso a los niveles del manto de agua subterránea.

#### PERFORACIÓN DE POZOS DE SONDEO Y EXPLORACION

Tomando en consideración los pocos e inciertos datos hidrogeológicos de que podría disponerse antes de 1976, la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas de la SARH, perforó 12 pozos de sondeos y exploración, cubriendo la extensión de la Isla, de cuyas muestras, registros y análisis petrologógicos, sedimentológicos y químicos se ha logrado un conocimiento confiable sobre las condiciones geológicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas del subsuelo (figura 3). La perforación de sondeos se llevó a cabo mediante un novedoso sistema de perforación que se comenta en el capítulo siguiente.

#### NIVELACION DE BROCALES

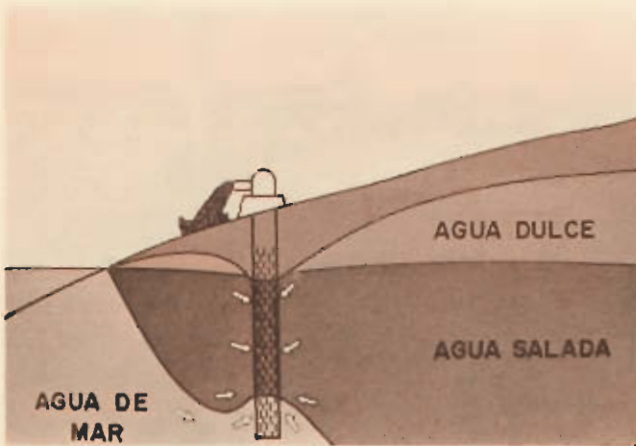
Para precisar con la seguridad requerida las elevaciones de los niveles de agua del subsuelo, con

respecto al nivel del mar, se determinó como indispensable, en la programación y desarrollo del presente estudio, la nivelación de precisión de los brocales de los pozos de sondeo perforados a lo largo del camino transversal, cuyas cotas son las siguientes:

Sondeo número	Cota m.s.n.m.
1	3.183
2	4.146
3	4.160
4	4.823
5	1.503

#### SISTEMA DE PERFORACION DE MUESTREO CONTINUO

Este muestreo se llevó a cabo utilizando, por primera vez en las calizas muy permeables de la Isla



Pozo construido con ademe ranurado, inadecuado para las condiciones acuíferas de la isla de Cozumel.

y en las de la Península de Yucatán, el novedoso procedimiento de perforación exploratoria de muestreo continuo "Con-Cor" que permite obtener, en formaciones de alta permeabilidad, muestras inmediatas y sin contaminación de la roca que se está perforando y del agua contenida en ella a medida que se avanza. Actualmente es el

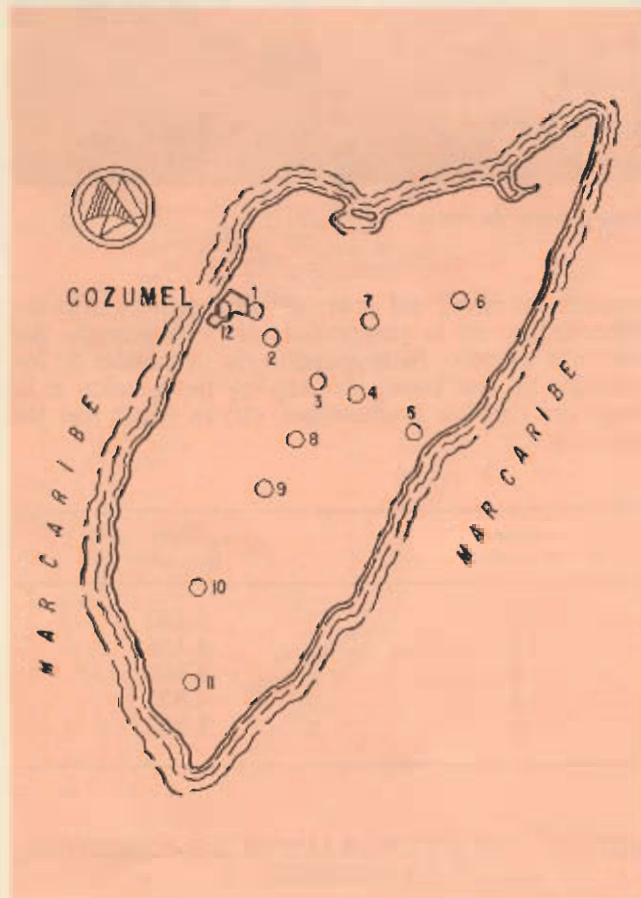


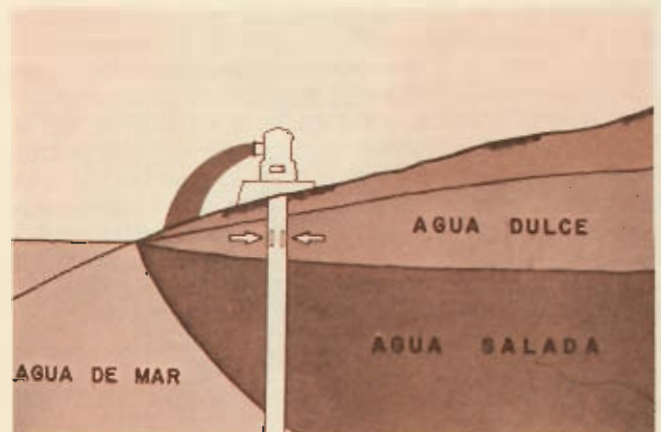
Figura 3. Localización de sondas exploratorias.

único método recomendable para lograr muestreos fidedignos confiables.

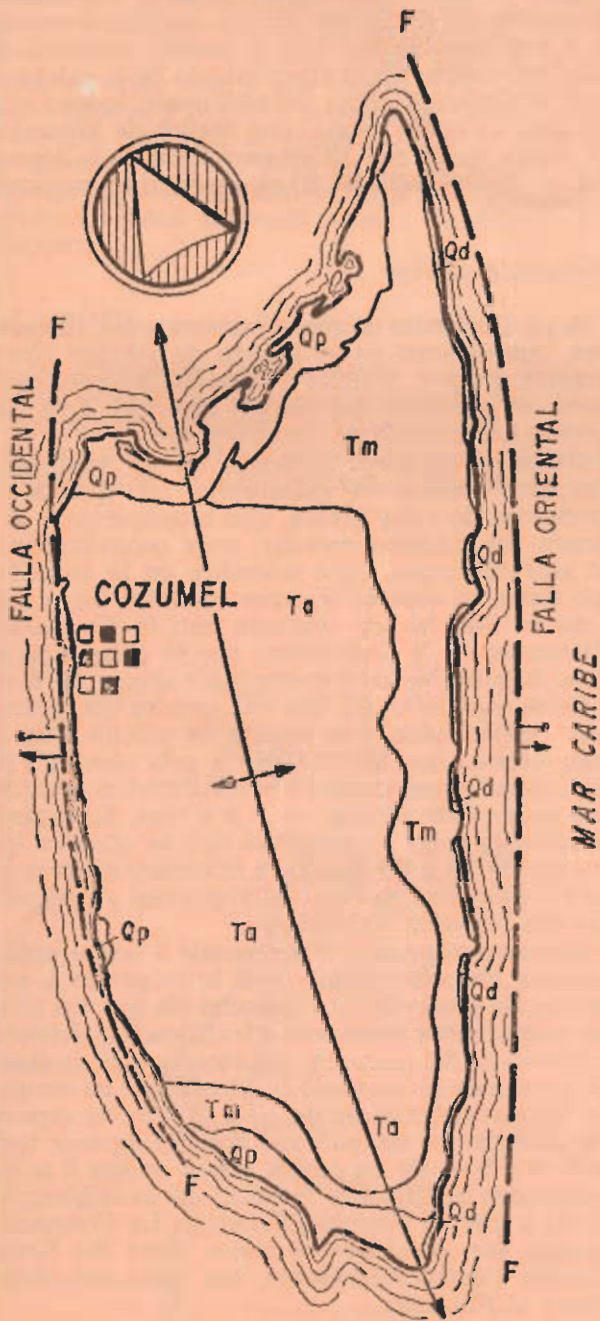
Consiste en utilizar como herramientas de perforación, en el sistema rotatorio convencional, fluidos combinados de perforación, aire-agua-lodos, una tubería doble concéntrica con barrenas y cabezal hidráulico adaptadas para este método. Los fluidos de perforación son inyectados hasta la barrena y fondo del pozo por medio de la bomba de agua-lodos y por la compresora de aire, en un mismo conducto, que pasa por el cabezal hidráulico. La inyección se hace a través del espacio anular de la doble tubería de perforación, delimitado entre los tubos interior y exterior, y por lo tanto dicha circulación de fluidos no tiene contacto con las paredes permeables de la caliza del pozo, pues regresa a la superficie ("circulación inversa") arrastrando de inmediato los recortes de la barrena (muestreo continuo "Cor-Cor") a través y dentro de la tubería interior que, por los efectos de carga hidráulica en el pozo y el aire de sifoneo, sale inmediatamente a presión y alta velocidad a medida que la barrena ataca la roca. Suspendiendo la perforación y ya sin inyección de agua o lodos y, por medio de sifoneo, exclusivamente con aire, se puede extraer agua precisamente del fondo del pozo, a cualquier profundidad bajo el nivel freático y a medida que se avance, para tener muestras para análisis cuantas veces se requiera.

## GEOLOGIA

Durante el mes de abril de 1977 y simultáneamente con las actividades realizadas por los técnicos de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos para este trabajo, la empresa Geólogos Consultores Asociados, S.A., realizó un estudio geológico de la Isla para la Compañía DIRAC, S.A. de C.V. En dicho estudio se presenta, en forma completa y detallada, la geología de la isla, y por lo tanto su información y sus planos han sido



Pozo con ademe ciego y con ventanas en la parte superior adecuada para las condiciones acuíferas de la isla de Cozumel.



**LEYENDA**

CUATERNARIO { MIOCENO PLIOCENO INFERIOR/MEDIO/SUPERIOR RECIENTE	Qd	DUNAS CUATERNARIAS	} GRUPO CARRILLO PUERTO
	Qp	PANTANOS CUATERNARIAS	
TERCARIO { MIOCENO PLIOCENO INFERIOR/MEDIO/SUPERIOR RECIENTE	Tm	FORMACION MIRADOR	} GRUPO CARRILLO PUERTO
	Ta	FORMACION ABRIGO	
	Tch	FORMACION CHANCANAB	
	Tco	FORMACION COZUMEL (no aflora)	

NOTA: Plano obtenido del Estudio Geológico  
 Elaborado por GEOCA, S.A. para DIRAC, S.C.

**SIMBOLOS GEOLOGICOS**

- CONTACTO GEOLOGICO
- ANTICLINAL MOSTRANDO BUZAMIENTO
- FALLA NORMAL INDICANDO BUZAMIENTO Y POSICION DEL BLOQUE CAIDO

Figura 4. Plano geológico.



aprovechados como valioso complemento en la elaboración del presente trabajo.

#### ESTRATIGRAFIA

Las unidades estratigráficas calcáreas de origen marino cuyos afloramientos pueden ser observados en la amplitud de la Isla de Cozumel, fueron divididas en tres unidades correlacionables con la Formación Carrillo Puerto, que se encuentra en la porción Oriental de la Península de Yucatán. La jerarquía litoestratigráfica de esta Formación fue elevada a la categoría de Grupo, y sus diferentes Unidades definidas como las Formaciones Chancanab, Abrigo y Mirador (GEOCA 1977, figura 4). En los sondeos realizados como parte de este estudio, se identificó, subyaciendo a estas Formaciones, a otro horizonte de calizas y dolomitas, el cual se describe y denomina como Formación Cozumel.

#### TERCIARIO

**Grupo Carrillo Puerto.** Fue definido como Formación Carrillo Puerto por Bonet y Butterlin en 1960. Su localidad tipo se encuentra en la Península de Yucatán, sobre la Carretera Peto-Carrillo Puerto, a 112 kilómetros de Peto. Sus niveles inferiores están representados por coquinas de alrededor de un metro de espesor, cubiertas por calizas compactas que pasan, a niveles superiores, a calizas cada vez más impuras, a veces arcillosas. La cima de esta formación está representada por calizas blancas, duras y masivas. Los echados o inclinación de las capas que se observan en sus estratos son débiles, a veces nulos, generalmente orientados al N-NE. Su espesor no se ha medido con exactitud, pero se infiere que alcanza varios centenares de metros. Por su posición estratigráfica, entre la Formación Bacalar del Mioceno Superior y las calizas de moluscos del Pleistoceno, que la cubren, concordantemente, debe corresponder al Mioceno Superior-Plioceno.

#### Formación Cozumel

En las perforaciones exploratorias, se identificaron estos sedimentos subyaciendo a la formación Chancanab. Consisten en una serie de calizas y dolomitas que fueron agrupadas y definidas en este trabajo como Formación Cozumel. Están representadas por dolomitas de color verde oscuro, muy compactas, con estratificación delgada. No fue posible determinar su espesor, puesto que no se cortó su base. Por posición estratigráfica la Formación tiene una edad correspondiente al Oligoceno.

#### Formación Chancanab

Los técnicos de la empresa Geólogos Asociados, S.A., utilizaron este nombre para el paquete de

calizas muy consolidadas que se encuentran aflorando en la caleta localizada inmediatamente al Norte del Hotel Presidente, que está a la altura del kilómetro 6 de la carretera Costera y a 2.5 kilómetros al Norte de la Laguna Chancanab. Los sedimentos están representados por una lodolita arenosa de color crema y en parte gris. Presenta oquedades de disolución de un tamaño promedio de 7 cm, recubiertas con aragonita amarilla de color café claro. En el afloramiento de la caleta, la roca se presenta como un sedimento lodoso consolidado de color crema, con fósiles de *Strombus SP*, hasta de 20 cm. El espesor total de la formación es de alrededor de 20 m. Su edad corresponde al Plioceno.

#### Formación Abrigo

Es un horizonte de rocas carbonatadas, deleznales, que afloran en el Puerto de Abrigo Norte (localidad tipo), situada a unos 2.5 kilómetros al norte del pueblo de San Miguel Cozumel. Esta formación fue dividida en tres miembros:

**Miembro Inferior.** Consiste en un sedimento compacto arenoso de calcarenita, con granos redondeados de color crema, que intemperiza a gris oscuro con aspecto nodular, muy consolidadas y sin estratificación. Este miembro en la localidad tipo tiene un espesor ligeramente superior a 2 m y no se observa su contacto con la Formación Chancanab, a la cual cubre; por lo observado en otras localidades su espesor llega a ser de 6 m.

**Miembro Medio.** Es una calcarenita con granos muy redondeados, con matriz de calcita fina de color crema, que intemperiza a gris oscuro. Presenta poca consolidación y estratificación cruzada. Con capas individuales, de 3 a 4 mm. Su espesor es variable y en su localidad tipo se observa que alcanza de 70 a 80 cm. Este miembro aparece local y regionalmente con interrupciones y adelgazamientos laterales lenticulares.

**Miembro Superior.** Corresponde a una arenisca calcárea de color crema, que intemperiza a gris oscuro. Se presenta más consolidada que los otros dos miembros y presenta estratificación definida, a diferencia del miembro inferior, que no la tiene. En ocasiones se encuentran, dentro de su secuencia, capas lenticulares de 10 a 20 cm de espesor con abundantes lamelibranchios. Su espesor total es de 8 a 9 m, de los cuales más o menos 6 m corresponden al Miembro Inferior, 0.8 m al Miembro Medio y 2 m al Miembro Superior. La Formación Abrigo, por considerarse como parte del Grupo Carrillo Puerto, representa una edad correspondiente al Plioceno.

#### Formación Mirador

La representan un conjunto de rocas calizas muy consolidadas y compactas, que afloran desde el kilómetro 12.7 de la carretera Transversal hasta la costa oriental, donde hay un mirador. Se dividió en dos miembros:

**Miembro Inferior.** Es un cuerpo de calizas y areniscas compactas de color crema, que intemperiza a café y gris oscuro. Se le observa cierta estratificación y se caracteriza por estar tan consolidado que al golpearlo con martillo suena como campana.

**Miembro Superior.** Está constituido por sedimentos calcáreos compactos pero suaves, que se presentan de colores crema y café claro, e intemperizan a color café y gris oscuro. Tiene estratificación gruesa y también produce un sonido metálico como campana al golpearlo con el martillo. Su espesor es de unos 10 m, de los cuales 3 m corresponden al Miembro Inferior y el resto al Superior. La edad asignada a esta Formación fue Plioceno.

**CUATERNARIO**

Los sedimentos pertenecientes a esta designación de cronología geológica se encuentran representados principalmente por médanos de arenas y depósitos de pantano. Los médanos son típicos de acumulaciones de playa costera, formados por las

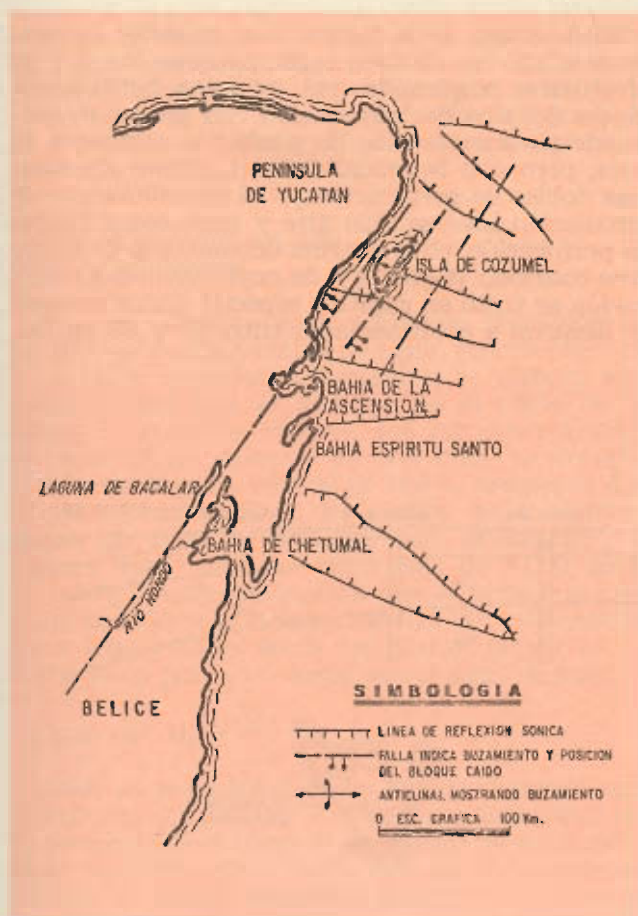


Figura 5. Plano tectónico.

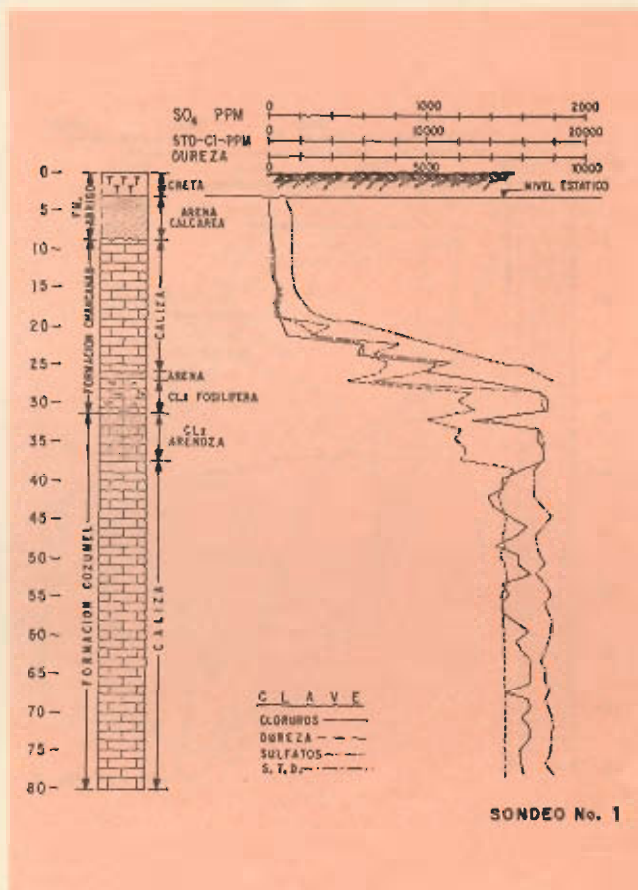


Figura 6. Gráficas de salinidad y corte litológico.

acciones combinadas del viento y oleaje y están constituidas por calcarenitas sueltas de grano medio y fino, y formadas por fragmentos de conchas y otros organismos e intraclastos o pedaceras arredondadas de arenas y gravillas calcáreas de color blanco. La Formación se observa en forma de fajas alargadas, principalmente en la Costa Oriente. Estos sedimentos llegan a tener hasta unos 5 m de altura y una anchura hasta de 400 m. Por lo que respecta a los sedimentos de pantano, éstos se encuentran en zonas inundadas por aguas salobres, donde crece abundante vegetación del tipo mangle. La mayoría de estos sedimentos, que tienen reducido espesor, son limos y humus derivados de la vegetación.

**TECTONICA**

En la Isla de Cozumel existen evidencias de una alineación tectónica preferencial, dada por la orientación que descubre su examen geológico, por la presencia de dos fallas o dislocaciones que delimitan la Isla en sus bordes oriental y occidental y además por la presencia de una estructura de ple-

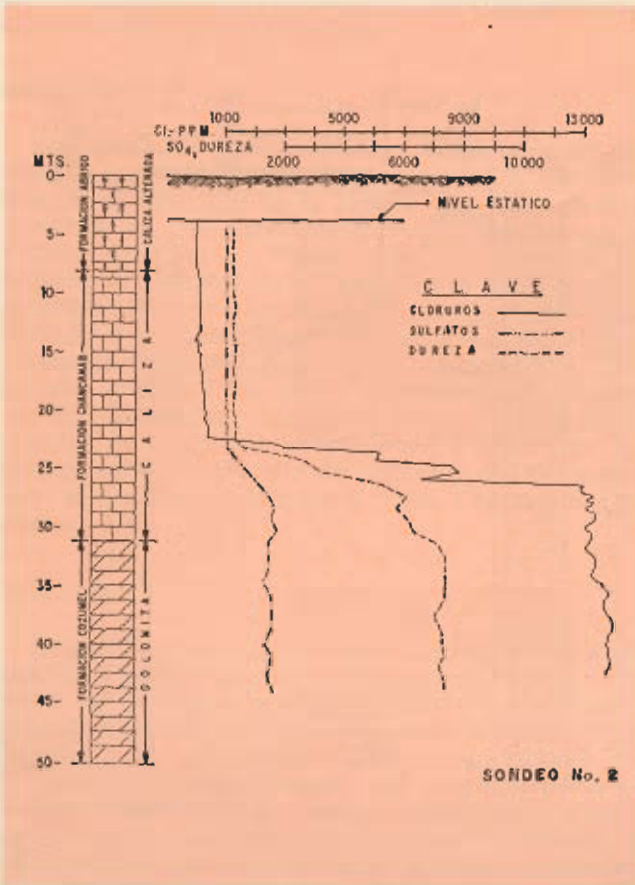


Figura 7. Gráficos de salinidad y corte litológico.

tectónicos regionales peninsulares, que se han definido también como accidentes geológicos de fracturamiento que favorecen los fenómenos de disolución. Estos alineamientos tienen sus manifestaciones a lo largo de la costa oriental de la Península de Yucatán y están, por otra parte, evidenciados por la existencia de la fosa marina que bordea la Isla hacia el Oeste, en la que se han desarrollado una serie de fallas escalonadas, registradas en los estudios magnetométricos realizados por Petróleos Mexicanos y, asimismo, por el alineamiento persistente, que es muy notable en la posición del Río Hondo, las Lagunas de Bacalar y las Bahías de Chetumal y a Ascensión, en la porción Oriental de la Península (figura 5).

La Isla está limitada en sus bordes NW-SE por esas dos grandes fallas normales antes señaladas, que van sensiblemente paralelas a la costa Oriental de la Península de Yucatán, quedando la Isla a manera de un bloque levantado o "horst".

El elemento estructural dominante de la Isla lo constituye su estructura de plegamiento anticlinal, al que, por consideraciones obvias, se le ha denominado: "Anticlinal Isla de Cozumel".

**CORTES LITOLÓGICOS DE LOS SONDEOS DE EXPLORACION**

En el plano de la figura 3, se muestra la localización de los sondeos exploratorios, los que se efectuaron empleando una máquina perforadora de las del tipo de barrenación con brocas de diamante para extracción de núcleos o corazones de roca, pero con la modalidad del empleo de tuberías dobles de perforación y del procedimiento de circulación inversa, con aire y agua como fluidos de perforación, en el sistema denominado de muestreo continuo (Con-Cor), de cuyas ventajas y operación se trató en capítulo especial. Estos sondeos se llevaron a profundidades entre 25 y 80 m. Du-

gamiento anticlinal formadora de su amplitud. El eje de plegamiento de ese anticlinal está orientado NE-SW, en el mismo sentido de uno de los dos ejes

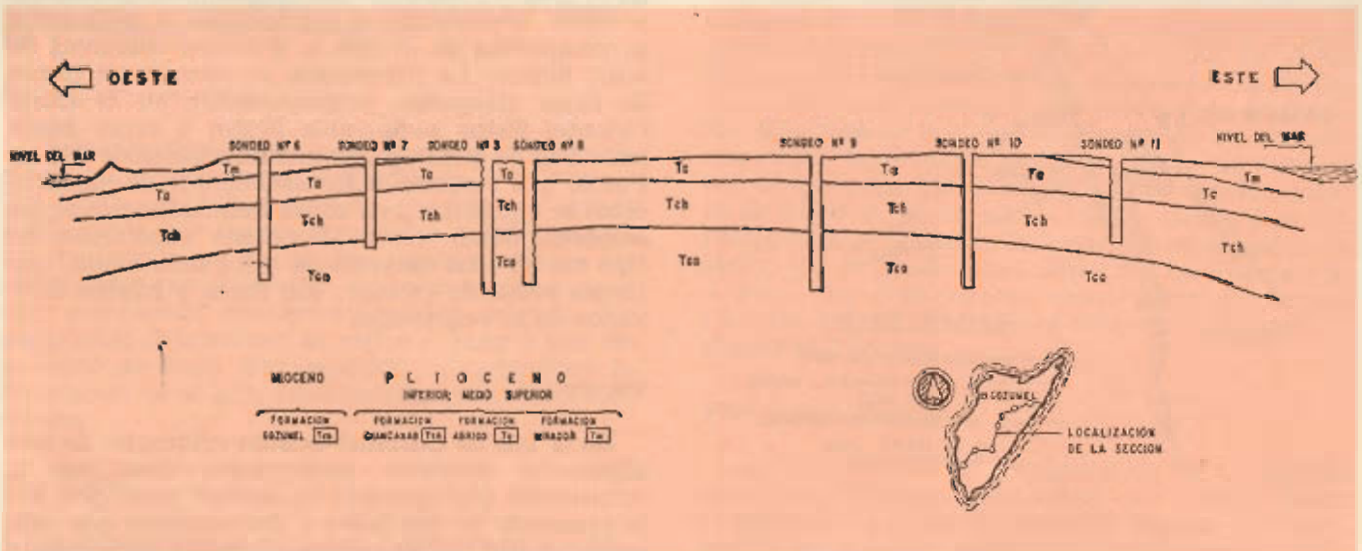


Figura 8. Sección geológica longitudinal.

rante la perforación, se obtuvieron núcleos de roca, que fueron clasificados petrológicamente.

En las figuras 6 y 7 se presentan los cortes litológicos de 2 de los 12 sondeos. Con esta información se formó una sección geológica longitudinal a la Isla (figura 8), en ella se presenta una correlación litológica y estratigráfica, en la que se identificaron las Formaciones Mirador, Abrigo, Chancanab y Cozumel. Representan un espesor prácticamente constante de 6 m para la Formación Mirador, 12 m para la Formación Abrigo y 20 m para la Formación Chancanab.

### HIDROGEOQUIMICA

Para definir las características químicas del agua subterránea de la Isla y a partir de ellas conocer y delimitar el espesor y extensión del acuífero de agua dulce susceptible de aprovecharse, considerando las características teóricas de: la presencia y distribución de aguas dulces y saladas en una isla y en materiales con permeabilidad homogénea, se muestrearon y analizaron 100 aprovechamientos distribuidos en toda su amplitud, que incluyen pozos, norias y cenotes. Su localización se muestra en la figura 2. También se llevaron a cabo, en los sondeos de exploración, 447 análisis químicos de aguas obtenidas mediante los procedimientos de perforación especiales que se describen. Estas muestras fueron tomadas a diferentes profundidades, con las que se formaron gráficas de salinidad para todos los sondeos. En este trabajo se presentan sólo las gráficas correspondientes a dos sondeos (figuras 6 y 7).

#### CONFIGURACION DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

Con los sólidos totales disueltos obtenidos en los 100 aprovechamientos de agua, representativos de la parte superior del acuífero, se elaboró una configuración que se muestra en el plano de la figura 9, donde se observa que las concentraciones más bajas, menores de 500 ppm, se encuentran hacia la parte central de la isla, formando dos curvas cerradas. Hacia las costas, las concentraciones de sales se incrementan, encontrándose lugares donde el agua tiene más de 3 000 ppm. La configuración demuestra que el agua dulce de lluvia se infiltra principalmente en la parte central de la isla, y fluye hacia las costas, donde se va degradando por la cercanía con el agua de mar.

#### CALIDAD DEL AGUA

Como ya se ha señalado, la Isla de Cozumel está constituida por calizas que tienen continuidad en su permeabilidad hidráulica, en toda su extensión, hasta su perímetro costero. Por lo tanto, el agua marina, de mayor densidad, penetra dentro de la isla, debajo del agua dulce del acuífero. Este acuífero dulce, como ya se indicó, tiene forma de una



Figura 9. Configuración de sólidos totales disueltos.

delgada capa lenticular, de mayor espesor en su parte central, adelgazándose hacia su perímetro costero, y está flotando sobre el agua salada.

Tomando en cuenta lo anterior y con el objeto de determinar la presencia y dimensiones reales medias de ese lente de agua dulce, se obtuvo la calidad química del agua a diferentes profundidades en 9 de los 12 sondeos hechos, lo cual se comenta en los dos siguientes incisos.

#### GRAFICAS DE SALINIDAD

A partir de las conductividades eléctricas, medidas en el agua estática contenida en los sondeos después de su perforación, y por medio de un conductímetro especial y, además, con las muestras directas logradas durante la perforación, por medio de sifoneos, se obtuvieron registros y análisis que permitieron revisar los parámetros correspondientes a sólidos totales disueltos, los que, junto con los datos de los análisis químicos, fueron graficados, y a manera de ejemplo se muestran dos, en las figuras 6 y 7. En ellos se observó que el agua dulce tiene únicamente espesores que varían de 16 a 22 m, y que la interfase salina se localiza entre 15 y 23 m de profundidad.

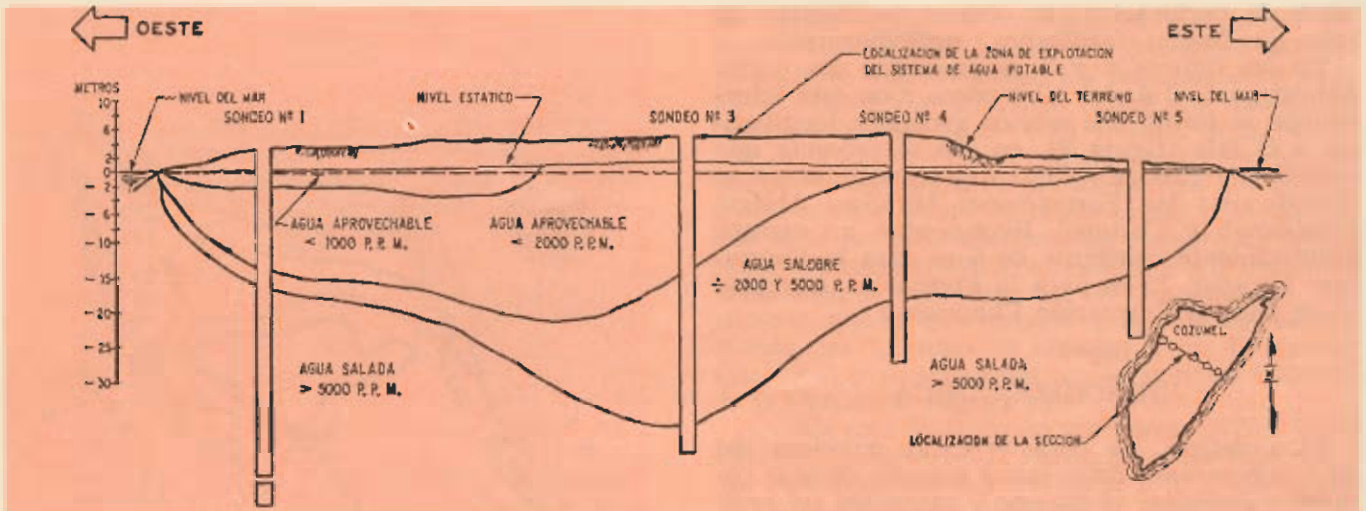


Figura 10. Perfil transversal de calidad del agua.

#### PERFILES DE CALIDAD DEL AGUA

Con los valores de sólidos totales disueltos, se formaron los perfiles de calidad del agua de las figuras 10 y 11, que corresponden, una a la sección transversal y la otra a la longitudinal de la isla, donde se delimitaron tres tipos de agua. El primero corresponde al agua dulce aprovechable, que contiene menos de 2 000 ppm de sólidos totales disueltos. Este horizonte se pudo subdividir en agua con menos de 1 000 ppm y agua conteniendo entre 1 000 y 2 000 ppm. Bajo ese lente de aguas dulces y salobres, se encontró y delimitó un horizonte de agua más salobre, cuya concentración está entre 2 000 y 5 000 ppm de sólidos disueltos. Estos horizontes se encuentran descansando sobre agua más salada, que contiene concentraciones de más de 5 000 ppm.

En la sección transversal (figura 10) se observa que el lente de agua dulce aprovechable tiene un espesor máximo de 22 m en el centro de la Isla, que disminuye en forma asimétrica hacia las costas. Rumbo al Este, su espesor disminuye,

hasta alcanzar alrededor de un metro en el sondeo Nº 4.

El agua aprovechable tiene un espesor mayor en la parte Oeste de la Isla con respecto al extremo Este, lo cual puede ser debido a la interferencia y combinación de los factores siguientes:

1. Hacia el flanco Este se encuentra la zona de captación de agua potable de la Isla, cuya explotación, mal controlada, ha provocado el ascenso del agua salada subyacente y la contaminación indeseable de las captaciones existentes por mal diseño en su construcción y lo inadecuado de su operación, como se señala más adelante.

2. En la zona Costera Oriental, la topografía baja hasta elevaciones de alrededor de 1.5 msnm, desde 5 kilómetros antes de la línea de costa, y esta condición determina que el lente de agua dulce se adelgace exageradamente. Lo anterior ocurre hacia el Este de la Isla. Esta asimetría topográfica influye en el gradiente hidráulico, el cual a su vez repercute en la presencia de un espesor menor de agua dulce.

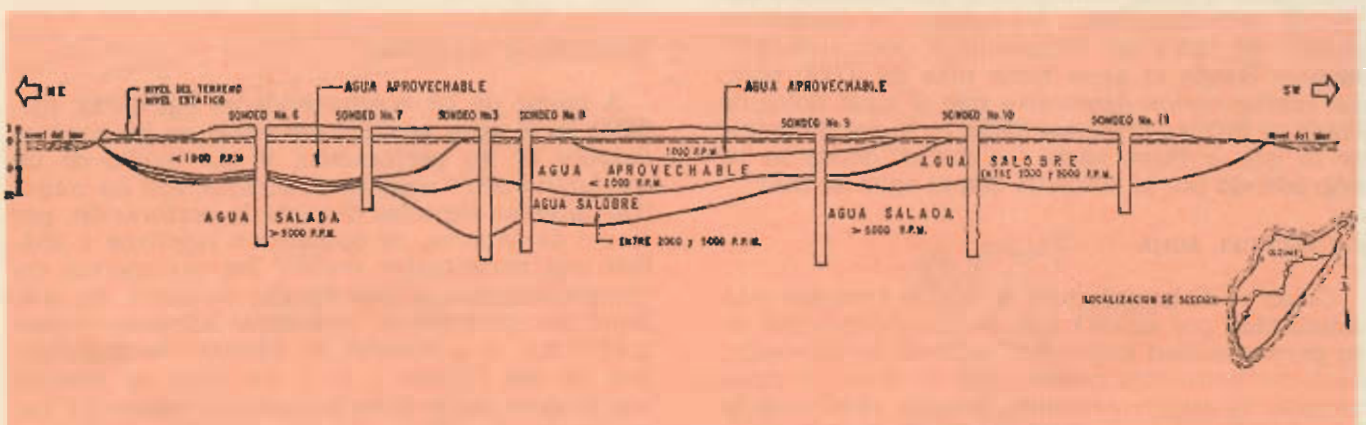


Figura 11. Perfil longitudinal de calidad del agua.

3. En el flanco Oeste de la Isla afloran calcilulitas semipermeables de la Formación Abrigo, las cuales impiden, en parte, el avance del frente de la intrusión de agua de mar, ocasionando que el espesor del lente de agua dulce sea mayor hacia esa zona.

Por lo que respecta al perfil longitudinal (figura 11), el espesor máximo de agua aprovechable es de 20 m y se localiza en el sondeo N° 3, en la zona donde intersecta al perfil transversal (figura 10). El agua salobre se encuentra alrededor de 16 m de profundidad en casi toda la Isla, adelgazándose al llegar a la punta Sur. Hacia la punta Norte no se detectó agua aprovechable, debido, entre otras cosas, a que esta zona presenta una topografía baja respecto al resto de la Isla y por lo tanto el nivel freático tiene muy poca elevación con respecto al nivel del mar, así mismo, el espesor del lente de agua dulce es mucho menor o casi nulo y, consecuentemente, sin posibilidades de contar con una acumulación de agua dulce aprovechable de consideración práctica.

En la parte central del perfil, a la altura de los sondeos 3 y 8, el agua aprovechable tiene entre 1 000 y 2 000 ppm en la parte superior, mientras que a los lados se tiene agua con menos de 1 000 ppm de STD. Esto se atribuye a que se localiza cerca de la zona de captación de agua potable que, como se indicó en párrafos anteriores, está mal captada y la operación de su explotación se hace sin control adecuado.

## HIDROLOGIA

### FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO

La Isla de Cozumel presenta un sistema acuífero en rocas calcáreas de gran permeabilidad, su recarga tiene lugar exclusivamente por la infiltración del agua de lluvia que se precipita sobre ella, y debido a la gran permeabilidad que presentan esas rocas, ésta se infiltra rápidamente al subsuelo, sin dar lugar a la formación de corrientes superficiales, lo cual es una característica típica, tanto de la Isla, como de la mayor porción de la Península de Yucatán, donde se ha originado, como consecuencia fisiográfica, una topografía cárstica que incluye la presencia de fenómenos de disolución tan típicos como los cenotes.

El acuífero lo forman sedimentos marinos calcáreos del Terciario, los cuales se encuentran estratificados y levemente plegados. Los estratos tienen permeabilidades variables lo cual hace que, en algunos casos, el acuífero se presente semiconfinado; pero, en general, para la mayor parte de la isla, debe considerarse como acuífero del tipo libre de aguas freáticas.

Se han observado confinamientos locales en las excavaciones de los bancos de préstamo para extracción de rocas y grava, localizados a 3 kilómetros al norte del poblado de Cozumel, donde al

remover en ellos la Formación Abrigo, brotó agua en la parte inferior de la excavación hecha en ese lugar.

Por otra parte, en el pozo que para agua potable fue perforado en el Cedral, ésta fue encontrada a los 5.60 m de profundidad, pero subió con artesianismo a 4.00 m bajo la superficie del terreno.

El acuífero, como ya se ha señalado, descarga en forma natural hacia el mar y consecuentemente los volúmenes de infiltración y recarga que recibe, en las temporadas de lluvia, llenan rápidamente su almacenamiento, con ligeras elevaciones de su nivel freático, que siempre es superior al nivel del mar; el resto de su recarga se drena y fluye sin control y aprovechamiento, saliendo al mar en esos ciclos naturales de efluencia.

### PROFUNDIDAD DEL MANTO FREÁTICO

Se registraron profundidades del nivel freático del agua a partir de la superficie del terreno, en 40 aprovechamientos, y con dichos registros se formó la configuración que se presenta en la figura 12. Los niveles más someros, menores de 1 m se encuentran en la parte este de la Isla, mientras que los más profundos, de 5 m, hacia su parte central y central-sur. En la mayor parte



Figura 12. Configuración de la profundidad al nivel del agua.

de la Isla, los niveles se encuentran entre 3 y 5 m de profundidad.

De lo anterior se desprende que el gradiente del flujo es notablemente pequeño a causa de la alta transmisibilidad del acuífero.

#### EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

La extracción principal al acuífero que se realiza en la Isla, es la que proviene de las instalaciones de puyones del sistema de agua potable. Hay también otros pozos, de la ex Dirección de Agua Potable y Alcantarillado, que entrarán en funcionamiento en un futuro próximo, y 15 pozos adicionales equipados que están localizados en rancherías, además algunos pozos costeros de la zona hotelera que, en forma particular, se han hecho como parte de las instalaciones de esta importante actividad. En la cuantificación se tomó en consideración la extracción por medios manuales de muchas norias y cenotes esparcidos por toda la Isla.

De acuerdo a los datos obtenidos al recorrer y censar los aprovechamientos de agua subterránea de la Isla, se obtuvo una cifra de extracción en números redondos de 40 lps, o sea un volumen medio anual de 1 300 000 m<sup>3</sup> por año, aproximadamente.

#### CLIMATOLOGÍA

Las características climáticas generales de la Isla son las siguientes: tiene una precipitación media anual de 1 570 mm. La temporada de lluvias se presenta desde los meses de mayo a junio hasta septiembre y octubre. Por lo que respecta a la temperatura, ésta alcanza un promedio anual de 25.5°C, con máximas en el mes de agosto y mínimas en enero.

El clima, de acuerdo con la clasificación de Koeppen, modificada por E. García, es del tipo "Am W" (I), o sea cálido húmedo con lluvias en verano y otoño.

#### BALANCE HIDROLÓGICO

La Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas en el estudio que ha venido realizando durante los últimos 2 años, de los acuíferos calizos de la Península de Yucatán e Islas del Caribe y de la revisión de registros de precipitación e hidrológicos disponibles, ha detectado carencia de ellos por periodos largos y, por lo tanto, no es posible realizar actualmente un balance hidrológico subterráneo de precisión aceptable, por lo que, para dar una idea de la magnitud de los recursos hidráulicos de la Isla, se optó por establecer un balance hidrológico superficial.

Para ello se obtuvo el volumen precipitado, el cual resultó ser de 714 millones de metros cúbicos anuales. A este volumen se le aplicó un coeficiente

de infiltración de 0.20, el cual se infirió a partir del criterio adquirido después de varios años de trabajos y observaciones cualitativas de campo, obteniéndose que la recarga del acuífero es de alrededor de  $140 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año. Parte de esta recarga eleva hasta sus niveles máximos, el lente de aguas dulces, y el resto fluye hacia el mar, sin control.

#### ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO DE AGUA DULCE

El plano de la figura 13 ilustra la distribución del espesor saturado con agua de salinidad menor de 2 000 ppm de sólidos totales disueltos; como puede observarse, este espesor varía entre 0 y unos 15 m, siendo mayor en la porción centro-occidental de la Isla. El espesor de acuífero saturado con agua de salinidad menor de 1 000 ppm, es todavía más pequeño, como puede verse en la figura 14; el agua de esta calidad se presenta en pequeñas "lentejas" de espesor menor de 10 m, encontrándose la mayor de ellas en la porción norte de la Isla.

Dadas sus reducidas dimensiones, estas "lentejas" almacenan una cantidad relativamente peque-



Figura 13. Espesor saturada con agua de calidad aprovechable.

ña de agua dulce. Cubicando los volúmenes de acuífero saturado con agua de las calidades señaladas, y considerando un rendimiento específico de 0.05 a 0.1, resulta que en el subsuelo de la Isla existe un almacenamiento de 42 a 84 millones de  $m^3$  de agua con salinidad menor de 1 000 ppm, y de 155 a 310 millones de  $m^3$  con salinidad menor de 2 000 ppm. Desafortunadamente, de estos volúmenes, ya de por sí pequeños, apenas de 9 a 17 millones de  $m^3$  están almacenados a elevaciones arriba del nivel del mar.

#### VOLUMEN Y ÁREA DE EXPLOTACIÓN RECOMENDABLES

Desafortunadamente, el volumen existente de agua dulce no es aprovechable más que en una mínima parte; de hecho sólo puede disponerse de una fracción del volumen almacenado a elevaciones arriba del nivel del mar. En efecto, los abatimientos que pueden provocarse en las captaciones, sin deteriorar la calidad del agua extraída, son muy pequeños.

El área recomendada para emplazar las captaciones se muestra en el plano de la figura 15. Dadas las características hidráulicas de la Isla, es indispensable que los abatimientos provocados en



Figura 14. Espesor saturado con agua de buena calidad.

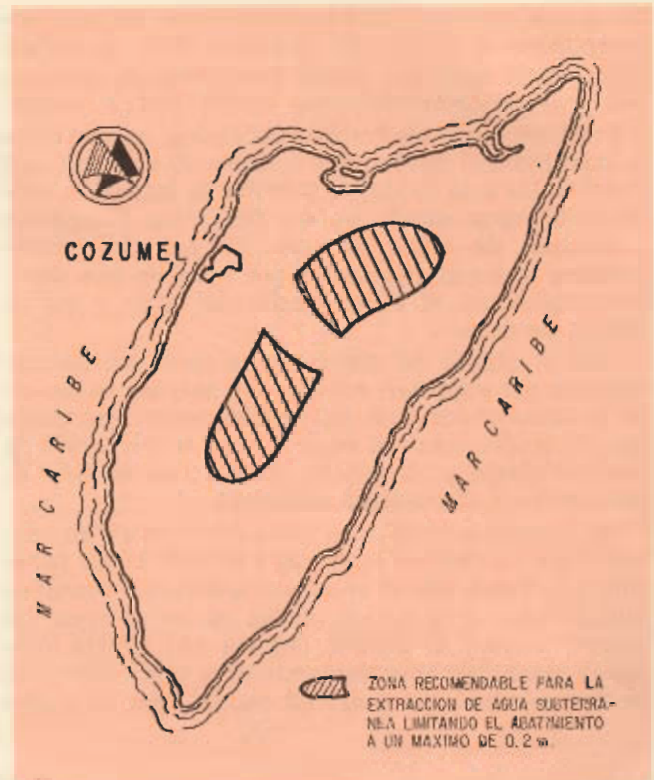


Figura 15. Zona recomendable para la extracción de agua subterránea.

los pozos no sean mayores de 0.1 a 0.20 m, en el área señalada en la figura 15.

Es sabido que en acuíferos de alta transmisibilidad, los abatimientos se propagan lateralmente con rapidez, no propiciando la formación de conos locales de abatimiento; esto sucede especialmente en acuíferos calizos como el de la Isla de Cozumel. Por tanto, si las captaciones se distribuyen ampliamente en el área recomendada, se provocará un abatimiento más o menos uniforme de los niveles de agua. Considerando un abatimiento medio de los niveles freáticos de 0.2 m en una área de unos 100  $km^2$  y un rendimiento específico (porosidad efectiva) de .05, el volumen de agua liberado anualmente por el acuífero será del orden de 1 millón de  $m^3$  adicionales al volumen actual de extracción. Es probable que al abatirse los niveles freáticos se disminuya en cierta medida la disponibilidad de agua; sin embargo, esto sólo podrá precisarse mediante la observación del comportamiento de los niveles freáticos, una vez que se inicie la extracción de los volúmenes aquí recomendados.

#### CAPTACIÓN DEL AGUA DULCE EN ZONAS COSTERAS

La mayor parte de las extracciones de agua subterránea que se habían venido realizando en



las zonas costeras, principalmente en las que corresponden al Estado de Quintana Roo, se hacían extrayendo agua por medio de equipos de bombeo con profundidades cercanas a la interfase salina.

Por otra parte las bombas succionan agua a cierta profundidad desde unos 2 hasta 20 m y abatian el nivel. De este modo, se provoca la intrusión vertical del agua salada ya sea de forma inmediata o después de cierto tiempo. Lo anterior puede evitarse si los abatimientos por bombeo son siempre superiores al nivel medio del mar y nunca debajo de éste.

Con el objeto de controlar la cantidad óptima de agua por explotar, así como el extraer solamente el agua dulce que se encuentra en espesores muy delgados sobre el agua salada, la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, de la SARH, ha ideado el dispositivo siguiente:

Se introduce en el pozo o cenote natural, un ademe ciego en toda su longitud y sellado en su parte inferior. En el ademe se abren orificios o ventanas exclusivamente a través de las cuales el agua del acuífero entra al ademe (figura 16). Estas ventanas quedarán invariablemente a una altura superior al nivel del mar. El caudal que se puede

extraer, se restringe al que entre por dichas ventanas, controlando así los abatimientos excesivos.

#### DESECHO DE AGUAS NEGRAS

Uno de los principales problemas de la Isla, son los métodos para eliminar las aguas negras de las poblaciones, las que, actualmente, se infiltran al acuífero por medio de fosas sépticas muy superficiales, o se descargan al mar contaminando así tanto el acuífero de agua dulce como las playas.

La solución más factible que se propone para resolver este problema es un tratamiento primario de las aguas negras y su inyección en pozos de absorción de profundidades tales que la salinidad del agua supere las 2 000 ppm de sólidos totales disueltos, donde el agua adquiere una densidad elevada y los desechos pierden su tendencia a subir.

Actualmente, la Ciudad de Cozumel cuenta con un pozo de absorción para aguas pluviales construido a una profundidad de 60 m y 17½" de diámetro, donde se cementó una tubería PVC de 10" de diámetro hasta 15 m de profundidad. Con este pozo, se eliminan las aguas pluviales, evitando inundaciones en la Ciudad.



Debido a la gran permeabilidad del terreno, las aguas negras se infiltran y contaminan el acuífero.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los factores geológicos y climáticos que prevalecen en la Isla, determinan que su geohidrología presente características muy especiales en el acuífero de aguas dulces, que se encuentra contenido en rocas calizas de alta permeabilidad. Este acuífero puede clasificarse como del tipo libre de aguas freáticas. Tiene forma lenticular y flota sobre agua salina de mar. El estudio efectuado, complementado con sondeos directos, permitió delimitar la configuración del lente de aguas dulces.

La recarga del acuífero proviene exclusivamente de la infiltración de agua de lluvia, mientras que la descarga es por explotación y por salidas naturales al mar en el perímetro costero.

Se delimitaron tres tipos de agua. El primero corresponde a agua dulce aprovechable que contiene menos de 2 000 ppm, de sólidos totales disueltos, bajo este lente se encontró y delimitó un horizonte de aguas salobres cuya concentración fluctúa entre 2 000 y 5 000 ppm de sólidos disueltos. Estos horizontes se encuentran descansando sobre agua más salada, que contiene concentraciones de más de 5 000 ppm.

Los principales datos hidrológicos son los siguientes: El agua subterránea se encuentra a profundidades entre 3 y 5 metros en la mayor parte de la Isla. El gradiente hidráulico es muy pequeño, de alrededor de  $1 \times 10^{-4}$ , de donde se deduce que la transmisibilidad del acuífero es muy grande. La extracción de agua subterránea es de 40 litros por segundo o sea 1.3 millones de metros cúbicos anuales. La precipitación media anual asciende de 1 570 milímetros. El volumen medio anual de precipitación es de 714 millones de metros cúbicos anuales. El volumen almacenado de agua con salinidad menor de 1 000 ppm, está entre 42 y 84 millones de metros cúbicos y el agua con salinidad menor de 2 000 ppm, entre 155 y 310 millones de metros cúbicos; de éstos, sólo de 9 a 17 millones de metros cúbicos están almacenados a elevaciones arriba del nivel de mar.

Es factible extraer un volumen adicional de 1 millón de  $m^3/año$ , siempre y cuando su explotación se lleve a cabo en el área señalada, controlando los abatimientos y utilizando el dispositivo especial de extracción de agua, todo ello conforme se trata en capítulos especiales de este trabajo.

La solución más factible que se propone para resolver el problema de la eliminación de aguas negras, es un tratamiento primario y su inyección en pozos de absorción, a profundidades tales que la salinidad del agua supere las 2 000 ppm de sólidos totales disueltos, donde el agua adquiere una salinidad elevada y los desechos pierden su tendencia a subir.

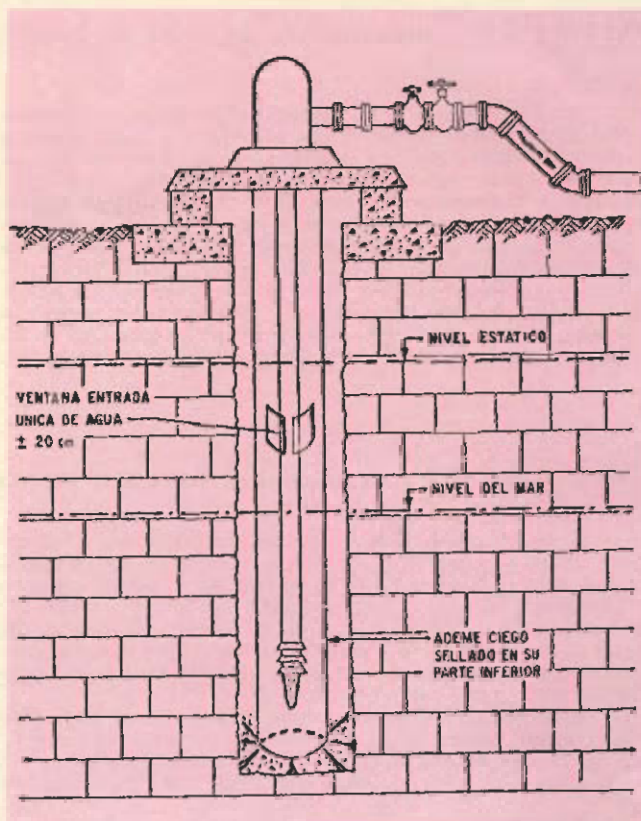


Figura 16. Dispositivo para extraer agua de la parte superior de un acuífero libre, por medio de pozos.

Los resultados y recomendaciones del estudio que se exponen en el presente trabajo, pueden hacerse extensivas a los acuíferos costeros de agua dulce que se encuentran en la Península de Yucatán.

## BIBLIOGRAFIA DE CONSULTA

- DISEÑO RACIONAL, INGENIEROS CONSULTORES, S.A. 1976. "Estudio Geohidrológico para una Zona de 130 has., con fines Agropecuarios, Cozumel, Q.R."
- GEÓLOGOS CONSULTORES ASOCIADOS, S.A. 1977. "Estudio Geológico de la Isla de Cozumel, Q.R."
- LESSER ILLADES, JUAN MANUEL, 1976. "Estudio Hidrológico e Hidrogeoquímico de la Península de Yucatán. D.G.Z.A."
- NEW ORLEANS GEOLOGICAL SOCIETY, 1974. "Field Seminar on Water on Carbonate Rocks of the Yucatan Peninsula, México."
- PLANIMEX INGENIEROS CONSULTORES, S.A., 1970. "Estudio Hidrológico de las fuentes de Abastecimiento de Agua en Cancún, Isla Cozumel y Chetumal, Q.R."

## Síntese HIDROLOGIA DA ILHA DE COZUMEL, QUINTANA ROO

A ilha de Cozumel, Q.R., tem características geológicas, litológicas e estruturais muito especiais, o qual originou a presença dum aquífero calcáreo subterrâneo, de grande permeabilidade, que se encontra em contacto com a água de mar e floresce sobre esta pela sua densidade menor ocasionando que a obtenção de água doce para o abastecimento da sua população seja um problema que encara condições limitantes. Com o fim de conhecer o funcionamento do aquífero doce existente e planejar a forma apropriada da sua exploração, conservação, e evitar a diminuição das condições difíceis de contaminação, a direcção de Geohidrologia e do Zonas Áridas tomando em

conta as instruções de superioridade da SARH, levou a cabo o Estudo Hidrológico e Hidrogeoquímico da ilha mencionada. Os resultados, condições, recomendações e medidas de control sobre aspectos tão importantes são expostos no trabalho presente.

As características geohidrológicas que aqui se descrevem —pois a ilha foi considerada como modelo para o estudo representativo de aquíferos em rocas calcárias— devem tornar-se extensivas as zonas costeiras turísticas de toda a Península de Yucatán, onde se apresentam condições semelhantes de disponibilidade de águas doces e da atracção das suas praias.

## Synthèse HYDROLOGIE DE L'ILE DE COZUMEL, QUINTANA ROO

L'île de Cozumel, Q.R., a des caractéristiques géologiques, lithologiques et de structure très spéciale, ce qui a donné lieu à la présence d'une couche aqueuse calcaire souterraine, de grande perméabilité qui se trouve en contact avec l'eau de mer et qui affleurant au-dessus de celle-ci, en raison de sa moindre densité, fait que l'approvisionnement en eau douce de la population soit un problème aux conditions difficiles.

Dans le but de connaître le fonctionnement de la couche d'eau douce existante et d'envisager la forme appropriée de l'exploiter et de la conserver, éviter ou diminuer les conditions difficiles de contamination, la Direction de

Géohydrologie et de Zones Arides, et selon les instructions de la SARH, s'est livrée à une étude hydrologique et hydrogéochimique de cette île. Le présent ouvrage en expose les résultats, les conditions, les recommandations et les mesures de contrôle prises.

Les caractéristiques géohydrologiques qui sont décrites ici —car l'île a été considérée comme modèle d'étude representative de couches aqueuses en roches calcaires— doivent être étendues aux zones côtières touristiques de toute la péninsule de Yucatan qui offrent des conditions similaires (disponibilité d'eau douce et beauté de ses plages).

## Summary HYDROLOGY OF COZUMEL, ISLAND, STATE OF QUINTANA ROO

Cozumel Island in the State of Quintana Roo has quite special geological, lithological, and structural characteristics, originating a highly permeable, subterranean, calcareous aquifer, in contact with seawater, floating above the latter because of its lesser density, and causing the supply of fresh water for its population to be a problem facing limiting conditions. In order to learn the functioning of the existing fresh water aquifer and correctly plan its exploitation and conservation, and avoid or limit the difficult contamination conditions, the Direction of Arid Zone Geohydrology, in obedience to instructions from its

superior, the Secretariat of Agriculture and Hydraulic Resources, performed an hydrological and hydrochemical study of the Island. The results, conditions, recommendations, and control measures of such important aspects are set out in this paper.

The geohydrological characteristics here described —as the Island is considered to be a representative study model of aquifers in calcareous rock— should extend to all of the costal, touristic zones of the Yucatan Peninsula, where similar conditions of the availability of fresh water and attractiveness of its beaches exist.