



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio geohidrológico de Playa Mujeres,  
municipio Isla Mujeres, Quintana Roo**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geólogo**

Presenta

Félix Martín Duarte Álvarez

**DIRECTOR DE TESIS**

M. en C. Emiliano Campos Madrigal



Ciudad Universitaria, Cd. MX., 2019

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE  
PLAYA MUJERES,  
MUNICIPIO ISLA MUJERES,  
QUINTANA ROO.**

# **ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE PLAYA MUJERES, MUNICIPIO ISLA MUJERES, QUINTANA ROO.**

## **ÍNDICE**

<b>CAP.</b>	<b>SUB CAP.</b>	<b>TEMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁG.</b>
		<b>RESUMEN</b>		
<b>1.</b>		<b>INTRODUCCION</b>		<b>1</b>
<b>2.</b>		<b>OBJETIVOS DEL ESTUDIO</b>		<b>2</b>
<b>3.</b>		<b>LOCALIZACIÓN,ACCESO Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b>		<b>3</b>
<b>4.</b>		<b>MÉTODO DE TRABAJO</b>		<b>5</b>
	4.1	Actividades de Campo		5
	4.1.1	Sondeos Eléctricos Verticales (SEV´s)		5
	4.1.2	Análisis de las Características Físicas de los Materiales que Conforman a la Zona de Estudio (Verificación Geológica – Hidrogeológica), Censo de Obras de Captación y Determinación de la Variación de la Calidad del Agua		5
	4.1.3	Toma de Muestras para Análisis Químicos y Medición de Perfiles de Conductividad Eléctrica		6
	4.2	Actividades de Gabinete		7
	4.2.1	Planteamiento del Modelo Geológico Preliminar de la Zona de Trabajo		7
	4.2.2	Planteamiento del Modelo Conceptual Hidrogeológico e Integración de Resultados		7

<b>5.</b>	<b>GEOLOGÍA</b>	<b>9</b>
5.1	Geología Regional	9
5.2	Geología Local	10
5.2.1	Formación Carrillo Puerto (Mioceno – Plioceno) (M – P (CP))	10
5.2.2	Calizas con Moluscos y Sedimentos Calcáreos (Pleistoceno – Holoceno)	11
<b>6.</b>	<b>EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO</b>	<b>13</b>
6.1	Geofísica de Resistividad	13
6.1.1	Procesamiento de los Datos Obtenidos en Campo	13
6.1.2	Descripción de las Secciones Geoeléctricas	14
6.1.3	Interpretación e Integración de Resultados	14
6.1.4	Descripción de Unidades Geológico – Geofísicas	15
6.1.5	Descripción de las Secciones Geológicas	16
<b>7.</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA</b>	<b>19</b>
7.1	Unidades Hidrogeológicas	19
7.2	Modelo Conceptual de Funcionamiento Hidrogeológico	20
7.2.1	Modelo Conceptual de Funcionamiento Hidrogeológico Regional	20
7.2.2	Modelo Conceptual de Funcionamiento Hidrogeológico de la Porción Costera Norte de Quintana Roo y del Área de Estudio	21
7.3	Identificación de Cuerpos de Agua por su Conductividad Eléctrica	22
7.4	Comportamiento Hidrogeológico de los Diferentes Horizontes de Agua	24

<b>8.</b>	<b>HIDROGEOQUÍMICA</b>	<b>26</b>
8.1	Hidrogeoquímica Regional	26
8.2	Hidrogeoquímica Local	27
8.2.1	Distribución de la Calidad del Agua en el Subsuelo	27
<b>9.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>29</b>
9.1	Integración para dar Respuesta a los Objetivos	29
9.1.1	Aspectos Hidráulicos	29
9.1.2	Aspectos Hidrogeoquímicos	29
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>32</b>
<b>11.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>34</b>
<b>12.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>35</b>
<b>13.</b>	<b>ANEXO DE PLANOS Y FIGURA</b>	<b>36</b>

## RESUMEN

La zona de estudio en Playa Mujeres Quintana Roo se localiza en una zona donde el suministro y abastecimiento de agua potable es escaso, motivo por el cual, una alternativa viable desde el punto de vista técnico – económico para eliminar esta deficiencia, es la extracción de agua salobre del subsuelo y su tratamiento para ser utilizada, lo cual está permitido por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Con el objeto de verificar que la alternativa antes mencionada puede llevarse a cabo, sin afectar las condiciones ambientales de la zona, se realizó un estudio de hidrogeología en la zona de estudio para definir:

La potencialidad hidrogeológica de la zona y evaluar la profundidad a la que se puede extraer en forma constante, agua salobre con sólidos totales disueltos (STD), entre 2,500 y 10,000 mg/l.

Número y distribución de las obras necesarias dentro del predio, para obtener un caudal mínimo de 120 litros por segundo.

Recorridos de campo en el entorno y dentro del área de estudio, con el objeto de conocer las características de las norias y pozos existentes, obteniendo la variación de la calidad del agua, mediante mediciones de conductividad eléctrica.

Realización de ocho sondeos eléctricos verticales para conocer la variación del tipo de materiales que conforman el subsuelo en esos sitios de acuerdo a sus características eléctricas.

Toma de muestras de agua para determinar la calidad y contenido salino del agua del subsuelo de la zona, así como para evaluar las concentraciones de sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico).

Los resultados del estudio son los siguientes:

Se detectó en la zona de estudio la presencia de dos acuíferos, el primero del tipo libre, ubicado en los materiales granulares localizados entre la superficie y el estrato de calizas alteradas (“sascab”); su permeabilidad es alta, por lo que constituye una excelente zona de recarga de agua de lluvia, coexistiendo en él agua dulce, salobre y marina de baja concentración salina (5,000 a 20,000 mg/l de STD).

El segundo acuífero es de tipo semiconfinado; se ubica en la caliza fracturada y con zonas de disolución de la Formación Carrillo Puerto, está limitado en su parte superior por el “sascab” y en la inferior por las calizas sanas y dolomías; en este acuífero siempre se tiene agua marina con diferentes rangos de concentración, de intermedia a alta, (20,000 a más de 40,000 mg/l de STD).

De los resultados de los aforos que se llevaron a cabo se observaron que en la zona se puede extraer un caudal superior a los 120 lps requeridos por Playa Mujeres, debido a que los dos acuíferos que se tienen en el subsuelo, están constituidos por materiales de permeabilidad media a muy alta, y son alimentados en forma directa por el agua marina de la Laguna de Chacmochuch y el Mar Caribe. Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona con mayor potencialidad se ubica en la parte sur y oeste de la zona de estudio.

De acuerdo con los resultados del estudio, se llega a las siguientes conclusiones y recomendaciones generales:

1) Considerando de que en todo el subsuelo de la zona de estudio se encuentra agua con concentraciones superiores a 10,000 mg/l de STD, a una profundidad que varía aproximadamente entre 3.50 m al norte de la zona de estudio y 7.00 m al sur, se concluye que puede explotarse el acuífero superior, mediante pozos construidos hasta una profundidad aproximada de 15 m. El diámetro de la excavación deberá ser de 45 cm (18"), y la tubería para ademe del pozo se propone de 30 cm (12"),

Se recomienda que el caudal de 120 lps requerido, se extraiga mediante 5 pozos separados entre sí a 250 m de distancia, y que se localicen en la zona sur poniente del predio como se muestra en el plano 2, lugar donde se encuentra agua de mejor calidad.

2) Debido a que se detectó la presencia de ácido sulfhídrico, en los cuerpos de agua superficial, se concluye que en el predio se encuentra este gas con diferentes concentraciones, que además de producir un olor desagradable, al oxidarse de manera natural se transforma en un compuesto sumamente corrosivo.

## **1. INTRODUCCION**

El uso del agua subterránea en México ha tenido un desarrollo acelerado en las últimas cuatro décadas, dada la importancia económica que reviste y la escasez cada vez mayor de agua de buena calidad a nivel superficial.

Este acelerado desarrollo, sin estudio ni planeación, ha creado contrastes muy diversos en el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos, generando la sobre-explotación de acuíferos, algunos con consecuencias graves, sin embargo, existen áreas con un potencial hidrogeológico aun no explotado.

En las zonas cercanas a la playa desde el punto de vista económico existe la posibilidad de explotar zonas cársticas para proveer de agua a zonas con proyectos de desarrollos turísticos y poblaciones donde existe enorme escases de agua potable, haciendo nuevamente hincapié en un estudio hidrogeológico previo.

En la actualidad una de las alternativas que ofrece mayor perspectiva al geólogo, es la explotación enfocada a la investigación hidrogeológica, al definir las condiciones geológicas y físico-químicas de los acuíferos, determinando la naturaleza de estos.

Además, permite inferir la ocurrencia y evaluar la potencialidad de los cuerpos acuíferos, desde su proceso de formación y desarrollo hasta proponer técnicas racionales de explotación.



## **2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

Este trabajo fue realizado a fin de cumplir con los siguientes objetivos:

1. Estudiar la zona donde se ubica el Predio de Playa Mujeres para establecer su potencialidad hidrogeológica y evaluar si es posible extraer del orden de 120 lps.
2. Evaluar a que profundidad se puede extraer agua con una concentración de entre 2,500 y 10,000 ppm de sólidos totales disueltos.
3. Establecer cuantos pozos serían necesarios para extraer 120 litros por segundo de agua salobre, con una concentración de 2,500 y 10,000 ppm de sólidos totales disueltos.

### **3. LOCALIZACIÓN, ACCESO Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio se encuentra ubicada en la porción Noreste del estado de Quintana Roo, aproximadamente a 10 kilómetros al norte de la ciudad de Cancún, entre las coordenadas 21°14' a 21°16' de latitud norte y 86°48' a 86°50' de longitud oeste (figura 1.1).

Geográficamente se encuentra delimitada hacia el oriente por el Mar Caribe, al poniente por la Laguna de Chacmochuch, al norte por los terrenos del Municipio de Isla Mujeres y al sur por el embarcadero (ferry) de Punta Sam.

La topografía del terreno es prácticamente plana, con elevaciones entre 1 y 2 m sobre el nivel del mar (msnm); el relieve está representado por lomeríos muy bajos y alargados, los cuales corresponden a una serie de dunas, paralelas entre sí y alineadas conforme a la línea de costa actual. Localmente se presentan zonas de inundación, alojadas en depresiones alargadas; el suelo es escaso y de poco espesor.

El material superficial está constituido por arenas de granulometría fina a media, que cubren a una capa de material calcáreo-limoso localmente conocido como "sascab", el cual es producto de la alteración de las calizas.

De acuerdo con la clasificación de climas descrita por W. Köppen y modificada por Enriqueta García (1964) para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la zona es de tipo cálido - subhúmedo, con una temperatura media anual de 25 °C y lluvias en verano. Ocurriendo la máxima durante el mes de agosto con 27°C y la mínima en febrero con 19° C, Los meses más húmedos son junio, septiembre y octubre, y el mes más seco marzo.

Las altas temperaturas y la vegetación tan abundante son la causa de que se pierda alrededor del 85% del agua de lluvia, el otro 15% se infiltra en el subsuelo.

El acceso al área de estudio se lleva a cabo por varias vías importantes. La carretera federal no. 307 que conecta a la ciudad de Chetumal capital del estado con Cancún, la autopista Mérida Cancún y la carretera federal Mérida Cancún que conecta con las ciudades de Valladolid y Leona Vicario.

# Localización

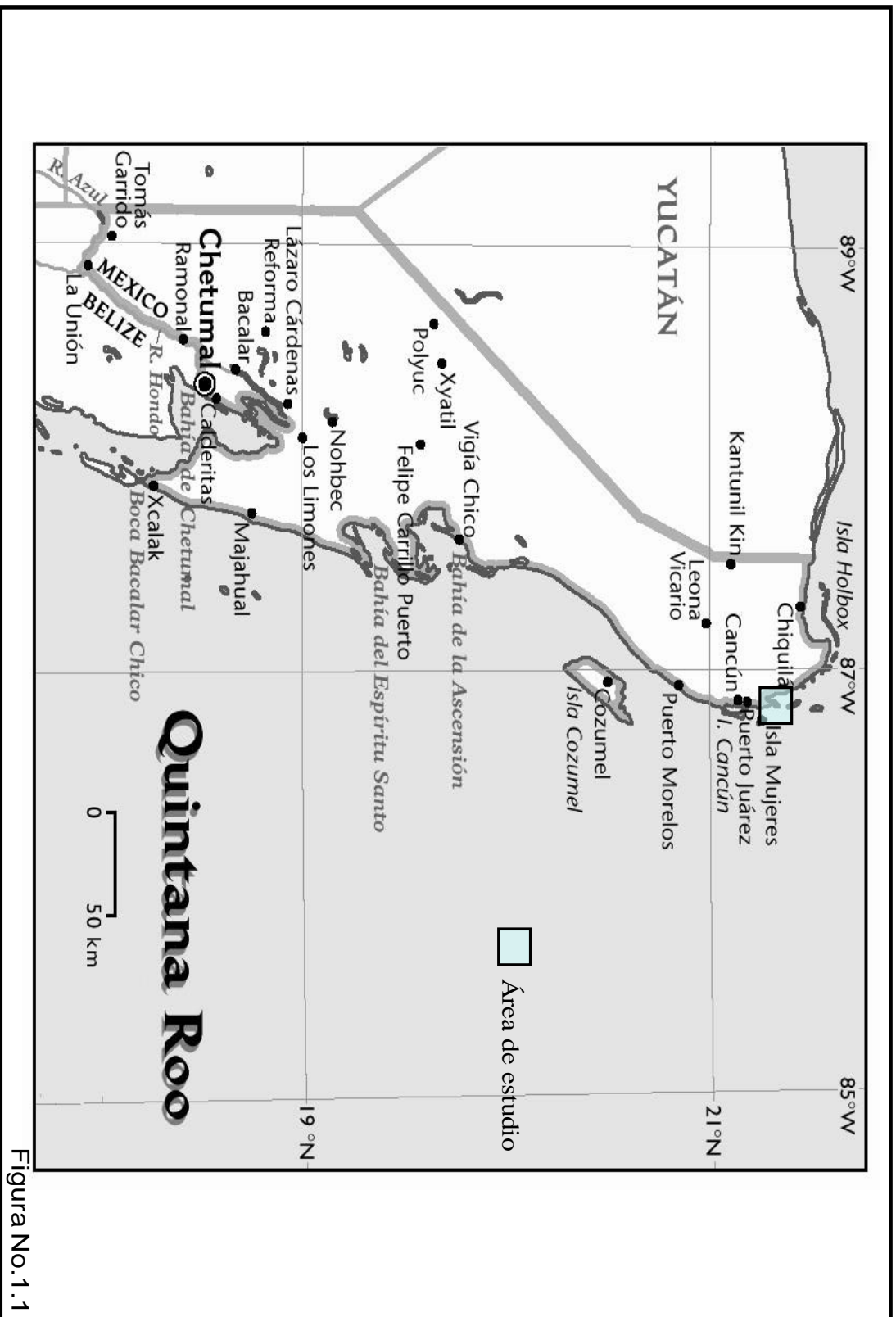


Figura No.1.1

## **4. MÉTODO DE TRABAJO**

Con el propósito de cumplir los objetivos propuestos, se realizaron una serie de actividades de campo y gabinete, que se describen a continuación:

### **4.1 Actividades de Campo**

#### **4.1.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's)**

Se realizó un estudio geofísico a fin de obtener mayor información sobre las características físicas y la distribución de los materiales en el subsuelo, así como para conocer la respuesta eléctrica que producen éstos y la calidad química de los fluidos que contienen.

El método geofísico utilizado fue el de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's), con un arreglo electródico tipo Schlumberger, el cual permitió realizar una buena zonificación de la resistividad de los materiales, con base en su litología y en la salinidad del agua que contienen; los valores de resistividad obtenidos permitieron identificar la posición del nivel freático, la zona donde existe agua dulce y la profundidad a la que se tiene agua de mar.

Se realizaron un total de ocho SEV's, distribuidos de tal forma que permitieran construir dos secciones, una perpendicular y otra paralela a la línea de costa; con éstas se pudo visualizar la distribución de los diferentes tipos de roca, y la calidad del agua que contienen.

En el plano 2 se muestra la ubicación de los SEV's, y la orientación de las secciones geoelectricas realizadas; en el capítulo 6 se presenta la tabla 6.1.1, en donde están las coordenadas UTM de cada uno de los SEV's.

#### **4.1.2 Análisis de las Características Físicas de los Materiales que Conforman a la Zona de Estudio (Verificación Geológica – Hidrogeológica), Censo de Obras de Captación y Determinación de la Variación de la Calidad del Agua.**

Se realizaron recorridos de campo en el predio; en la región ubicada al oeste del mismo, entre las poblaciones de Guadalupe y Sueño Guajiro; en la región localizada entre Puerto Juárez y el Puerto de Punta Sam; así como al norte de la zona de estudio, en la región conocida como Punta Blanca. Estos recorridos permitieron identificar las unidades de roca, así como las condiciones de fracturamiento y disolución que presentan.

Durante el reconocimiento se visitaron: lagunas, pozos, piezómetros, norias y cenotes cercanos al predio, así como en el interior de la zona de estudio; todos se posicionaron geográficamente mediante el uso de un geoposicionador satelital (GPS).

Adicionalmente en cada sitio se midió la profundidad al agua subterránea, así como su conductividad eléctrica (CE) en la parte superficial (a la profundidad a la que se encuentra el nivel del agua); en donde fue posible se midió también la variación de la CE a diferente profundidad, mediante la realización de perfiles de conductividad eléctrica (PCE), con el propósito de establecer de forma indirecta, los cambios en la concentración de la CE, la

existencia de agua dulce y salobre, así como la profundidad a la que iniciaba el agua marina.

Durante los recorridos de campo se visitaron 61 sitios, 32 de ellos se localizan dentro del predio o en su periferia inmediata; del total de obras de extracción de agua visitadas, el porcentaje más alto fueron norias.

En la tabla No.4.1.2.1 se resumen las zonas de trabajo y el tipo de obras. En los planos 1 y 2, se muestra a escala regional y local, respectivamente, la ubicación de las obras visitadas.

Tabla No. 4.1.2.1 Obras visitadas

Zona de Trabajo	Total Obras	Pozos Y Piezóm.	Sondeos Mixtos	Norias	PCAR	Cenotes	Lagunas
Zona de estudio en Playa Mujeres	32	5	5	--	15	--	7
Región Guadalupe – Sueño Guajiro	25	--	--	19	--	6	--
Puerto Juárez – Puerto Punta Sam	4	--	--	4	--	--	--
<b>TOTAL</b>	<b>61</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>23</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>7</b>

Nota: PCAR = Pozos a cielo abierto

#### 4.1.3 Toma de Muestras para Análisis Químicos y Medición de Perfiles de Conductividad Eléctrica

En esta actividad se tomaron 16 muestras de agua para conocer las concentraciones de los siguientes parámetros: Calcio, Sodio, Magnesio, Potasio, Nitratos, Cloruros, Sulfatos, Carbonatos, Bicarbonatos, Sílice, Hierro, pH, Sólidos disueltos, Conductividad eléctrica y Dureza total.

Las muestras se tomaron en los siguientes sitios:

En la laguna frente al muelle El Paso.

En la laguna frente al sitio denominado “Los Pinos”.

Una en el Mar Caribe.

Otra actividad importante realizada en las visitas de campo fue la “zonificación” de los diferentes horizontes de agua presentes en el subsuelo, mediante la realización de perfiles de conductividad eléctrica (PCE).

Para desarrollar este estudio se utilizaron los siguientes equipos: para efectuar lecturas hasta 30 m de profundidad se utilizó una sonda marca YSI modelo 63, que proporciona datos de forma digital; esta sonda de acuerdo al rango de salinidad permite obtener lecturas desde décimas de  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (unidad internacional de la CE) para salinidades menores a 10,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , hasta valores de decenas de ésta, cuando la salinidad es mayor a 10,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Para conocer la salinidad por debajo de los 30 m de profundidad, se utilizó una sonda marca *Solinst*, la cual proporciona datos de forma analógica, a través de la lectura de la ubicación de una aguja dentro de un intervalo de valores; la ventaja de esta sonda es el rango que permite leer que llega hasta 80,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , así como la profundidad de alcance que es de 100 m.

En los casos en donde fue posible se tomaron además datos de la profundidad a los niveles de agua, y temperatura.

Es importante citar que los microsiemes por centímetro son unidades que miden la facilidad del paso de energía eléctrica a través de un medio (en este caso el agua), y son unidades equivalentes a los micromhos por centímetro; para el caso del agua dulce hay una relación aproximada entre la concentración salina medida en laboratorio a través de los miligramos por litro (mg/l) de sólidos totales disueltos (STD), con las unidades de CE representadas por las unidades  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , esta es de  $(0.7 * \text{CE en } \mu\text{S}/\text{cm}) = \text{concentración salina en mg/l de STD}$ ; esta relación deja de ser lineal para el agua con alta concentración salina.

## **4.2 Actividades de Gabinete**

### **4.2.1 Planteamiento del Modelo Geológico Preliminar de la Zona de Trabajo**

Se efectuó una recopilación de los diferentes estudios realizados en la zona, con el propósito de integrar esta información con los resultados de los trabajos de campo.

La información que sirvió como punto de partida para asentar las bases del modelo geológico del sitio fueron los estudios realizados por la empresa Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C.V. en el año de 1993, y el de la compañía IMASA, en septiembre de 1998; posteriormente fueron analizados e integrados los resultados del “Estudio Geológico” realizado por el Ing. Sergio Herrera, en abril del 2001; esta información fue revisada en conjunto y procesada, para establecer de forma preliminar el comportamiento de los diferentes tipos de roca presentes en la zona.

### **4.2.2 Planteamiento del Modelo Conceptual Hidrogeológico e Integración de Resultados**

Se recopiló y analizó la información hidrogeológica existente, para tener un conocimiento preliminar del acuífero de la localidad.

Posteriormente se integraron los resultados de este análisis a los datos obtenidos en campo, para definir el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico, la variación

vertical de la calidad del agua y su caracterización hidrogeoquímica; de igual forma, se establecieron las alternativas para captar agua subterránea, y se realizaron las recomendaciones para efectuar la explotación de agua subterránea de forma adecuada.

## 5. GEOLOGÍA

Con base en los estudios analizados y con los resultados de los trabajos de campo, se hace una descripción de la geología de la región y de la zona de estudio.

### 5.1 Geología Regional

El área de estudio se localiza en el extremo noreste de la provincia fisiográfica denominada como “*Península de Yucatán*”, la cual se caracteriza por ser una región estable (no ha sido deformada por procesos geológicos compresivos), por lo que tiene una topografía suave, en la que no existen corrientes fluviales provenientes del interior del continente.

En la mayor parte de esta provincia fisiográfica afloran rocas de edad *Cenozoica* (plano 3) constituidas por calizas y dolomías, con algunas intercalaciones de evaporitas (sales precipitadas por procesos relacionados con la intensa evaporación de agua); toda esta secuencia litológica carece de deformaciones geológicas significativas, pues se encuentra dispuesta en estratos y capas prácticamente horizontales.

Durante el Paléogeno-Neogeno, los movimientos a escala regional del nivel del mar favorecieron el depósito de materiales en una plataforma marina somera, así como en algunas zonas con circulación restringida, todo en un ambiente sedimentario de alta energía.

Esto dio como resultado que los materiales se distribuyeran en la Península de la siguiente manera: (Fig.5.1) hacia el suroeste sedimentos arcillo-arenosos; hacia el sur, arcillo-calcáreos; y hacia el noreste rocas predominantemente calcáreas. De esta forma las rocas están distribuidas en edad y litología de la siguiente forma:

Las rocas cenozoicas más antiguas son calizas, margas y yesos, con algunas intercalaciones de lutitas de edad *Paleoceno-Eoceno*, correspondientes a la Formación Icaiché; estas rocas afloran en las porciones sur y central de la Península.

En dirección a la línea de costa afloran rocas del período *Eoceno al Reciente*, las cuales corresponden a las formaciones Chichén-Itzá, Bacalar, Estero Blanco y Carrillo Puerto, constituidas principalmente por calizas y dolomías, con algunos lentes de margas y areniscas, e intercalaciones de calizas arenosas.

En 1991, la CONAGUA perforó en la parte oriental de la Península, una decena de pozos someros con fines exploratorios; los resultados de estas perforaciones indican que hacia el norte del estado de Quintana Roo (en el área de Cancún-Nuevo Xcan), a profundidades someras se encuentran calizas arrecifales, muy fracturadas y con un alto desarrollo de estructuras cársticas (estructuras provocadas por la disolución del carbonato de calcio que constituye a las calizas), con espesores entre 30 y 60 m.

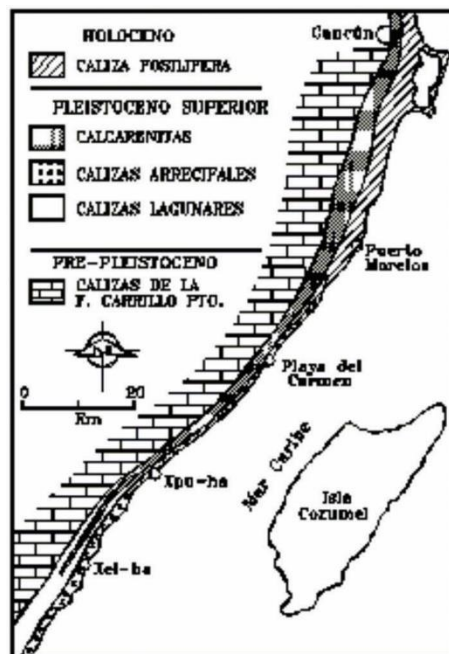


Fig.: 5.1 Mapa geológico general de la costa este de la Península de Yucatán. (Modificado por W. C. Ward y J. Brady 1979)



Estructuralmente, la Península se encuentra afectada por una serie de fallas y fracturas, orientadas en una dirección preferencial NNE-SSW; estos rasgos estructurales mayores se encuentran agrupados y alineados de la manera siguiente:

1. Zona de fallas Reforma-Campeche. - orientada en dirección N NE-S SW.
2. Zona de fallas Chemax-Catoche. - alineada en dirección NE-SW.
3. Falla Ticul. - orientada en dirección NW 55°SE.
4. Zona de fracturas Holbox. - orientada en dirección NE 05°-10°SW.
5. Zona de fallas Bacalar-Río Hondo. - alineada en dirección NE 30°SW.

Los rasgos estructurales citados forman estructuras geológicas producidas por fallas, como son las fosas tectónicas (hundimientos) y pilares (altos topográficos), lo que da una apariencia escalonada al terreno.

Algunas de las fosas tectónicas conforman depresiones que gradualmente se han transformado en bahías o lagunas, este es el caso de las bahías de Ascensión, Espíritu Santo y San José, así como la laguna de Bacalar.

Por el contrario, la Isla de Cozumel es un pilar tectónico limitado por fallas normales.

## **5.2. Geología Local**

La región en donde está localizada la zona de estudio, se ubica dentro de la provincia geomorfológica denominadas como Unidad Costera, la cual debe su aspecto topográfico a factores litológicos (tipos de roca) y estructurales (fallas y fracturas).

Esta Unidad Costera forma una franja irregular, de 1 a 10 km de ancho, que bordea a la Península y se desarrolla de manera adyacente a la costa del Caribe; está constituida por arenas depositadas en la playa (eoleanitas), asociados a la acción de las mareas y a la erosión marina.

Se subdivide en tres miembros:

1. Zona de playas. - Consta de playas largas y angostas.
2. Área de mareas. - Corresponde a lagunas de inundación.
3. Zona costera del caribe. - Constituida por costas abruptas y rocosas; playas angostas, caletas semicirculares y algunos manantiales submarinos.

Por otra parte, en el área de estudio aflora solo una unidad litológica (descrita en el punto 5.2.2), mientras que, en el subsuelo, a profundidades someras se encuentran presente otra unidad; a continuación, se describe cada una de ellas, de la más antigua a la más joven:

### **5.2.1 Formación Carrillo Puerto (Mioceno-Plioceno) (M – P (CP))**

La parte basal de esta formación está constituida por calizas fosilíferas (coquinas), en tanto que su parte superior consta de calizas compactas; la pureza del carbonato de calcio que conforma a estas rocas es mayor en su parte baja y conforme asciende hacia su cima son cada vez más impuras, hasta llegar a ser calizas arcillosas y margas (arcillas

calcáreas), con algunos lentes de areniscas (arenas cementadas) intercaladas. Esta situación es importante debido a que cuando una caliza es más pura, tiene mayor capacidad para ser disuelta al estar en contacto con el agua, proceso que a su vez incrementa la permeabilidad.

Son notables los fenómenos de disolución en estas rocas, lo cual propicia el desarrollo de estructuras cársticas (cenotes y depresiones alargadas), que están controladas por un sistema de fracturamiento orientado en dirección NE-SW; estas formas cársticas se desarrollan aún más hacia el poniente que hacia el oriente.

El desarrollo de los conductos de disolución le confiere una permeabilidad muy alta a esta unidad, constituyéndose como un acuífero de potencial elevado.

### **5.2.2 Calizas con Moluscos y Sedimentos Calcáreos (Pleistoceno-Holoceno)**

Esta unidad aflora en una franja irregular de 1 a 10 km de ancho, a lo largo de la porción costera del caribe; al igual que la unidad anterior, presenta cambios litológicos desde su base hacia la cima.

La parte basal consiste de calizas coquiníferas (calizas conformadas por abundantes restos de conchas) masivas, de color blanco a crema, mientras que su parte superior consiste esencialmente de arrecifes de coral, sedimentos calcáreos y depósitos de playa.

En las costas de Quintana Roo, los depósitos más recientes están representados por una franja angosta de sedimentos de playa, constituidos por arena de grano fino a medio, muy bien clasificada y de color blanco a crema, a los cuales se les denomina como eolianitas (estos materiales son los que cubren la totalidad de la zona de estudio); están conformados casi en su totalidad por oolitas (estructuras circulares formadas por la acumulación de carbonato de calcio de forma concéntrica); sus tamaños normalmente varían de 100 a 350 micras de diámetro. Estas arenas contienen en menor proporción pequeños fragmentos de conchas y coral.

La textura y buena clasificación granulométrica de estos sedimentos se deben a los procesos eólicos que actuaron sobre las arenas de playa, las cuales fueron transportadas y depositadas selectivamente en forma de dunas.

Ward y Wilson (1974) sugieren que el núcleo y las partes principales que conforman a las islas de Cancún, Isla Mujeres y Contoy, corresponden a un cinturón remanente de eolianitas, formadas por crestas de dunas, las cuales se depositaron cerca del borde externo de una terraza formada hace 30,000 años, ubicada actualmente a 10 m de profundidad.

Excelentes afloramientos de éstas eolianitas pueden observarse a todo lo largo de la costa del Caribe, desde Puerto Juárez hasta Tulum; en esta última localidad conforman acantilados de hasta 15 m de altura.

El espesor de esta unidad varía entre 12 y 30 m, acunándose tierra adentro hasta desaparecer en el contacto con la Formación Carrillo Puerto; el contacto entre estas dos formaciones presenta cierto paralelismo con la línea de costa, lo cual implica que ha habido una regresión del mar desde el Pleistoceno hasta el Reciente. La permeabilidad de

toda esta unidad varía de alta a muy alta.

En la tabla siguiente se describe la columna litológica local, la cual fue conocida por medio de la descripción de los materiales perforados en los pozos ya existentes.

Tabla 5.2.2.1 Columna litológica local y litoestratigrafía.

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>LITOLÓGÍA</b>	<b>FORMACIÓN</b>
0.0 a 6.0	Arenas de grano fino a medio, de color blanco y constituida exclusivamente por pequeñísimos fragmentos de conchas y coral.	Calizas con moluscos y Sedimentos Calcáreos
6.0 a 9.5	Fragmentos de coral.	
9.5 a 15.0	Material arenoso-limoso carbonatado, con alto contenido de fragmentos (angulosos) de caliza color crema a blanco; los cuales localmente reciben el nombre de "sascab".	
15.0 a 24.0	Calizas de color blanco, con desarrollo de cavidades de disolución en su parte intermedia, las cuales se encuentran total o parcialmente rellenas de arena de grano fino a medio.	Carrillo Puerto
24.0 a 30.0	Dolomías de color café claro a rosa claro y textura sacaroide.	Carrillo Puerto

## 6. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

### 6.1 Geofísica de Resistividad

A fin de tener conocimiento de la geometría y características físicas de los materiales en el subsuelo, así como establecer los diferentes tipos de agua que contienen, se realizaron 8 sondeos eléctricos verticales (SEV's), utilizando un arreglo electródico tipo Schlumberger, con una abertura entre electrodos ( $AB/2$ ) que varió entre 100 (sólo en el SEV 2) y 200 m, lo cual permitió obtener información del subsuelo a profundidades que variaron entre 29 y 66 m, respectivamente. La ubicación de los sondeos se ilustra en el plano 2, y sus coordenadas geográficas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6.1.1 Localización geográfica de los SEV's realizados

SEV No.	X	Y	PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN (m)
SEV-1	517,683	2'350,499	53.64
SEV-2	518,424	2'349,750	29.80
SEV-3	518,698	2'349,736	53.64
SEV-4	518,951	2'349,806	59.60
SEV-5	519,505	2'349,965	66.22
SEV-6	520,108	2'348,738	66.22
SEV-7	519,826	2'349,606	66.22
SEV-8	519,204	2'349,948	28.51

Con objeto de representar el comportamiento de los materiales en el subsuelo, se realizó una sección perpendicular a la línea de costa (*Sección Geoeléctrica I - I'*), así como una paralela a la línea de costa (*Sección Geoeléctrica II - II'*). En el plano 4 se presentan las secciones citadas.

#### 6.1.1 Procesamiento de los Datos Obtenidos en Campo

La información obtenida de campo fue procesada utilizando el programa de interpretación de sondeos RESIX - PLUS, el cual permite determinar un modelo de capas u horizontes eléctricos, con los valores de resistividad real, espesores y profundidades de cada una de ellas.

Posteriormente, se procedió a elaborar perfiles geoeléctricos vaciando los valores de la resistividad real obtenidos a diferentes profundidades (plano 4); con esta información se efectuó una agrupación de las resistividades que permitieron definir las unidades con comportamiento eléctrico similar, denominadas *Unidades Geoeléctricas*.

Por último, se llevó a cabo una correlación de las unidades geoelectricas con la información geológica disponible, con lo cual se logró realizar una mejor caracterización de estas unidades.

### 6.1.2 Descripción de las Secciones Geoelectricas

La sección geoelectrica I – I' quedó integrada de oeste a este por los SEV's 2, 3, 4, 8 y 5; la sección geoelectrica II – II' por los SEV's 5, 7 y 6 (de norte a sur).

El análisis de la distribución de las resistividades permite concluir que existe una gran heterogeneidad en los valores de resistividad, ya que de un SEV a otro hay variaciones grandes en las magnitudes obtenidas; sin embargo, se puede destacar como se indica en la sección I – I', que en sentido oeste – este hay una variación progresiva de la resistividad, de tal forma que los valores menores se encuentran en el SEV 2 y los más grandes en el SEV 5, este último además presenta los valores más altos de todos los SEV's realizados.

**Como se explicará más adelante en este mismo capítulo, estas modificaciones se asocian** a cambios en la litología y en la permeabilidad de los materiales.

Por otra parte, la forma que tiene la configuración de la sección I – I', contrasta con la configuración de la sección II – II', debido a que el arreglo de los materiales en sentido oeste – este y norte – sur es diferente, lo cual corresponde con el tipo de sedimentación que se da en zonas costeras, en donde los contactos entre unidades litológicas son más continuos en sentido paralelo a la costa, que en el sentido perpendicular a esta, pues en este último caso, los ambientes de sedimentación se modifican al variar la profundidad del piso oceánico.

A continuación, se ilustra en la tabla siguiente los rangos de resistividad encontrados.

*Tabla 6.1.2.1 Unidades geoelectricas*

UNIDAD GEOELECTRICA	RESISTIVIDAD (Ohm/m)	ESPESOR (m)
U <sub>1</sub>	28.30 – 526	0 – 7
U <sub>2</sub>	2.09 – 39.39	0 – 3
U <sub>3</sub>	0.25 – 14.66	2 – 13
U <sub>4</sub>	1.03 – 26.97	12 – 21
U <sub>5</sub>	2.03 – 1.991	7 a más de 20
U <sub>6</sub>	4.60 – 18.09	14 a más de 50
U <sub>7</sub>	26.97 – 1,991	Más de 50

### 6.1.3 Interpretación e Integración de Resultados

Una vez analizados los resultados desde el punto de vista geofísico, se integró la información relacionada con la litología, lo cual permitió la interpretación conjunta de la información geofísica y geológica; como resultado las secciones geoelectricas se transformaron en secciones geológicas (plano 4) y se identificaron cinco unidades geológico - geofísicas, con las características presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 6.1.3.1 Unidades geológico - geofísicas

UNIDAD GEOELECTRICA	RESISTIVIDAD (ohm/m)	ESPESOR (m)	DESCRIPCIÓN
U <sub>I</sub>	28.30 – 526	0 – 7	Arenas sin agua
U <sub>II</sub>	2.09 – 39.39	0 – 3	Arenas de la porción superior de la zona saturada del acuífero; manifiestan un cambio brusco de resistividad por pasar de un medio seco a uno húmedo. Contiene agua que varía en calidad de dulce a salobre.
U <sub>III</sub>	0.25 – 14.66	2 – 13	Arenas con agua salobre y/o marina.
U <sub>IV</sub>	1.03 – 26.97	12 - 21	Coral, sascab, calizas alteradas y calizas sanas, con agua marina.
U <sub>V</sub>	2.03 – 1,991	No detectado por estar en la parte inferior de la sección	Dolomías con agua marina.

#### 6.1.4 Descripción de Unidades Geológico - Geofísicas

##### UNIDAD U<sub>I</sub>

Esta unidad se presenta en la parte superficial del terreno y se distribuye en casi toda la zona de estudio; se caracteriza por presentar resistividades altas (28.30 - 526 ohm-m); que se han asociado con arenas de grano fino a medio, sin agua, en algunos sitios estas arenas tienen capas delgadas de caliche altamente resistivas. Esta unidad se encuentra aflorando desde la línea de costa y en toda la superficie del predio en estudio; en algunos lugares como la zona inmediata al muelle Los Pinos la unidad no se presenta, en otros sitios su espesor llega a ser de 7 m (SEV 7).

##### UNIDAD U<sub>II</sub>

Se presenta en el subsuelo en la mayor parte de la zona de estudio, con excepción de la zona del muelle Los Pinos, donde prácticamente aflora; está debajo (subyace) de la unidad U<sub>I</sub> y se caracteriza por formar una franja de transición entre la zona no saturada y el acuífero, por lo que en comparación con la unidad U<sub>I</sub> presenta resistividades bajas (2.09–39.39 ohm-m); está constituida también por arenas y su espesor es reducido, normalmente de 0.50 m, aunque en el SEV 7 llega a tener hasta 3 m. La calidad del agua que contiene varía de dulce a salobre.

##### UNIDAD U<sub>III</sub>

Esta unidad se localiza en toda la zona explorada a través de SEV's, siempre por debajo de la unidad U<sub>II</sub>; se distingue por tener las resistividades más bajas que van de 0.25 a

14.66 ohm-m, aunque predominan por mucho las que están entre 0.25 y 2.71 ohm-m; la razón por la cual presentan estos valores de resistividad es porque tienen una elevada porosidad en la que está almacenada agua con muy alta salinidad (agua salobre a marina). Sus espesores varían de 2 a 13 m; su base se ubica entre los 4 y los 15 m.

#### **UNIDAD U<sub>IV</sub>**

Esta unidad está debajo de la unidad **U<sub>III</sub>**; se distingue por presentar resistividades que varían entre 1.03 y 26.97 ohm-m; se dividió en tres partes: la superior conformada por arrecifes de coral, de extensión vertical y lateral variable y restringida; la parte media está conformada por el material resultante del intemperismo de la caliza (sascab), así como por calizas alteradas por procesos atmosféricos; finalmente la parte inferior está representada por calizas sanas. Todos estos materiales contienen agua marina. La unidad se encuentra a una profundidad que varía de 4 a 15 m, con espesores de 12 a 21 m.

#### **UNIDAD U<sub>V</sub>**

Es la unidad inferior en las dos secciones; está por debajo de la unidad **U<sub>IV</sub>**; presenta resistividades muy variadas, debido tal vez a variaciones en su permeabilidad y en el contenido de agua; sus resistividades oscilan entre 2.03 y 1,991 ohm-m; se asocia por posición estratigráfica y resistividad con dolomías que contienen agua marina; se encuentra a profundidades de 20 a 35 m, sus espesores se desconocen porque no existen pozos o sondeos que hayan cortado su base.

### **6.1.5 Descripción de las Secciones Geológicas**

#### **Sección I - I'**

Esta sección tiene una orientación perpendicular a la costa; inicia a 400 m del mar y llega hasta 1.5 km tierra adentro; por su orientación permite observar la distribución de las unidades geoeléctricas y de las unidades geológico - geofísicas.

En esta sección se observa que existen dos zonas radicalmente diferentes, una localizada al centro – oeste, en donde las resistividades son en general bajas, y otra ubicada al este en donde las resistividades tienen valores muy altos.

Como resultado se tiene que las arenas cambian rápidamente de espesor en el sentido oeste – este, debido a que descansan sobre un antiguo arrecife coralino (parte superior de la unidad litológica U<sub>IV</sub>) que tiene forma irregular y extensión restringida; cuando este arrecife pierde continuidad, las arenas cubren directamente a la caliza intemperizada (sascab). Otro aspecto observado es la forma de la superficie del sascab o de la caliza alterada (parte media de la unidad litológica U<sub>IV</sub>), la cual es irregular debido a los procesos de erosión que actuaron sobre ella (paleotopografía); de igual forma el contacto entre la caliza alterada y la caliza sana es irregular.

Por otra parte, el contacto entre la caliza sana y la dolomía es poco conocido, se infiere su ubicación con apoyo de los resultados de los SEV's.

Otra conclusión importante obtenida del análisis de esta sección es la continuidad lateral

de las unidades litológicas, así como la relacionada con el incremento de la resistividad en sentido horizontal oeste – este, de tal forma que en el sitio donde se ubica el SEV 2 se tienen los menores valores de resistividad, los cuales se van incrementando continuamente hasta llegar al SEV 5, donde se registraron las mayores magnitudes de esta propiedad.

Debido a que en esta dirección la litología es casi uniforme (con excepción del arrecife de coral), la variación en la resistividad se asocia a variaciones en el fracturamiento y disolución de los materiales, factores que están directamente relacionados con la permeabilidad del medio y con la cantidad de agua que pueden contener; de esta forma, se considera que hacia el oeste los materiales son más permeables y por lo tanto contienen, relativamente hablando, un mayor volumen de agua que los materiales que se encuentran al este, por esta razón la resistividad en este sentido se incrementa.

En la sección el inicio de la zona saturada está ubicado entre las unidades  $U_I$  y  $U_{II}$ , donde se localiza un pequeño horizonte saturado con agua dulce a salobre con espesores de máximo 0.50 m; por debajo el agua es salobre (aproximadamente un metro) y después se tiene agua marina con diferentes grados de concentración salina; esto significa que el agua marina inicia a una profundidad que está entre 1.5 y 2 m.

### **Sección II - II'**

Esta sección se realizó de forma paralela a la línea de costa, a una distancia de la playa de entre 200 (SEV 7) y 400 m (SEV 5). La correlación geológica – geofísica, se realizó principalmente con base en los conocimientos adquiridos en la zona de la primera sección y en los resultados de la geofísica eléctrica.

En las secciones geoelectricas y geológicas se observa que las unidades geológico – geofísicas de la sección II – II', tienen una mayor continuidad lateral que en la sección I – I'; en este caso se observa también que existe una variación lateral de la resistividad eléctrica, la cual es menor hacia el sur donde se localiza el SEV 6.

Otro aspecto relevante con relación a los valores de resistividad se presenta en la parte superior del SEV 7, en donde se tienen valores anormalmente altos, en comparación con las resistividades vecinas, esta situación se asocia a un mayor espesor de la zona no saturada y a un mayor contenido de agua dulce.

De esta forma la sección II – II' consideró en la correlación aspectos de tipo litológico (tipo de material) y calidad del agua que contienen; así se observa que hay continuidad lateral en los materiales, y que la parte superior constituida por arenas sin agua de la unidad  $U_I$ , tiene su mayor espesor en la zona donde se ubica el SEV 7, donde alcanza 7 m; su espesor más reducido esta al sur, en el SEV 6, donde prácticamente desaparece.

La unidad  $U_{II}$  representada por arenas saturadas con agua dulce a salobre, está debajo de la anterior, alcanza del orden de 4 m, bajo el SEV 7, y en la zona de los SEV's 5 y 6 tiene alrededor de 1 m.

Las unidades que están debajo de la anterior tienen ya todas agua salobre y salada, como la unidad  $U_{III}$  que contiene arenas de espesor muy reducido, saturadas con agua salobre, así como a las mismas arenas, pero saturadas con agua marina. Esta unidad tiene un



espesor que varía entre 5 y 9 m.

La unidad subyacente es la  $U_{IV}$ , la cual ya contiene siempre agua marina; esta unidad está representada por el arrecife de coral, sascab, calizas alteradas y calizas sanas; a pesar de que la litología que la representa es variada, la resistividad obtenida para esta unidad en cada uno de los SEV's no lo es tanto, debido a que predomina la resistividad del agua sobre la del material; en cambio si se hace una comparación lateral de las resistividades reportadas para la misma unidad en diferentes SEV's de la sección, se observa que hay diferencias notorias, por ejemplo en el SEV 5 la unidad tienen valores de entre 8 y 26 ohm/m, y en el SEV 6 la resistividad varía entre 1.62 y 3.85 ohm/m; esta diferencia se atribuye a cambios en la permeabilidad de las rocas que conforman a la unidad, lo que se traduce en variaciones en las cantidades de agua marina que almacena la misma. Sus espesores van de 11 m al norte a 25 m al sur de la sección.

Finalmente se tienen a la unidad  $U_V$ , que está localizada en la base de la sección; esta unidad está representada por dolomías saturadas con agua marina, se ubica a profundidades que están entre 21 y 50 m, siendo menores hacia el sur.

## 7. HIDROGEOLOGÍA

En este capítulo se describirá cómo funcionan los materiales desde el punto de vista hidrogeológico, para lo cual las unidades litológicas serán agrupadas de acuerdo a su permeabilidad y a la calidad del agua que contienen.

Como punto de referencia para clasificar la calidad del agua que existe en la zona de estudio, se utilizará como referencia la siguiente tabla:

Tabla No. 7.1 Clasificación del agua. Según Gorrel, en Davis y De Wiest (p. 167)

<b>Clasificación</b>	<b>Concentración total de STD (mg/l)</b>
Agua dulce	0 – 1,000
Agua salobre	1,000 – 10,000
Agua salada	10,000 – 100,000
Salmuera	Más de 100,000

Donde: STD = Sólidos totales disueltos

Como complemento vale la pena comentar que otros autores como E. Custodio y M. R. Llamas, (en Hidrología Subterránea, apéndice 10.1, p. 1080), reportan que en el Mar Mediterráneo hay valores promedio del orden de 34,481 mg/l de STD y rangos para la CE de 44,000 a 67,000  $\mu\text{S/cm}$  (valores medidos en diferentes muestras).

### 7.1 Unidades Hidrogeológicas

Para conocer la respuesta de los materiales al paso del agua, se integró la información: geológica, geofísica, del censo de aprovechamientos y los perfiles de conductividad eléctrica (PCE); como resultado se identificaron tres unidades hidrogeológicas, cada una con diferente permeabilidad; a continuación, se describen:

#### Unidad Hidrogeológica 1 (UH1)

Está formada por las arenas localizadas en toda la superficie de la zona de estudio; la unidad en general presenta una permeabilidad alta, por lo que en superficie constituye una excelente zona de recarga, mientras que en el subsuelo conforma acuíferos de buena potencialidad.

Las obras someras que existen en la zona extraen agua de esta unidad. La calidad del agua que contiene en la porción más superficial del acuífero, varía en función de la zona geográfica; por ejemplo, en la parte centro y sureste de la zona de estudio tiene agua que va de dulce a salobre en los primeros tres metros, mientras que en el resto del área desde el nivel freático contiene agua salobre o marina.

#### Unidad Hidrogeológica 2 (UH2)

Está representada por el coral y las calizas alteradas (sascab) y sanas de la Formación Carrillo Puerto; su permeabilidad varía de alta a media, por lo que en el subsuelo conforma acuíferos de buena potencialidad.

Siempre contiene agua de mar, con variaciones en la concentración salina de acuerdo a la profundidad.

### **Unidad Hidrogeológica 3 (UH3)**

Está conformada por las rocas que se localizan a mayor profundidad y que corresponden a las dolomías; su permeabilidad varía de media a baja.

## **7.2 Modelo Conceptual de Funcionamiento Hidrogeológico**

En este apartado se describirá la forma en que se mueve el agua en la zona, se identificarán las zonas de recarga y la trayectoria preferencial del agua.

Con objeto de establecer un marco de referencia se iniciará con una descripción a escala regional.

### **7.2.1 Modelo Conceptual de Funcionamiento Hidrogeológico Regional**

La elevada precipitación pluvial, la gran capacidad de infiltración del terreno y la reducida pendiente topográfica, favorecen la rápida renovación del agua subterránea y propician que prácticamente no existan escurrimientos superficiales o que sean de muy corta longitud. Al sur de la Península se presenta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficial.

Gran parte de la precipitación pluvial se infiltra al subsuelo a través de fracturas, oquedades y conductos cársticos (de disolución) en las calizas y evaporitas, posteriormente, parte de ésta se pierde mediante la evapotranspiración, y el resto fluye por el subsuelo alcanzando las costas por donde es descargada al mar.

A escala regional la dirección del flujo subterráneo se lleva a cabo desde las porciones internas de la Península en sentido radial (siguiendo la dirección del fracturamiento y desarrollo del carst), hacia las planicies; cuando existen zonas con topografía relativamente baja el agua subterránea aflora y da lugar a lagunas y áreas de inundación; de aquí sigue su trayectoria de forma subterránea hacia el mar. En las planicies internas de la Península el agua se dispersa hacia el norte y noroeste y a partir de la zona de Xcan- Leona Vicario (*zona de máxima precipitación pluvial del noreste de la Península*), se extiende radialmente hacia las costas llegando al mar a lo largo del litoral.

En el subsuelo el agua, como ya se mencionó, puede seguir diferentes direcciones de flujo, controladas siempre por el desarrollo o evolución del carst. A su vez la génesis y desarrollo de la carstificación está relacionada con las fluctuaciones eustáticas (cambios a escala mundial) del nivel medio del mar durante las últimas glaciaciones; estos cambios generaron diferentes niveles topográficos de carstificación y propiciaron mayor desarrollo del carst en los materiales más antiguos, ubicados en niveles topográficos más profundos. En la zona de Mérida, se han encontrado a profundidades de 15 y 30 m grandes conductos cársticos. En estas estructuras se registran variaciones súbitas de la salinidad y temperatura.

En la zona costera de Quintana Roo, se han observado también estos sistemas

preferenciales de flujo que generan grandes turbulencias, lo que incrementa el proceso de dispersión hidrodinámica aumentando el espesor de la zona de agua salobre, sobre todo durante los períodos posteriores a la lluvia.

De igual forma, los cambios estacionales en la cantidad de agua almacenada en el acuífero provocan oscilaciones de los niveles del agua (abatimientos en el estiaje y ascensos en la temporada de lluvias) y cambios en su calidad química.

Por otro lado, la evapotranspiración, los cambios de la presión atmosférica y la influencia de las mareas en la franja costera, propician fluctuaciones piezométricas diarias y estacionales; estas oscilaciones provocan cambios en la posición del agua dulce, la zona de mezcla y la interfase marina. La importancia de este fenómeno radica en que un descenso de 10 cm en el agua dulce teóricamente puede provocar un ascenso de la interfase marina en alrededor de 2.4 m; valor 40% menor que el propuesto por la relación de Ghyben-Herzberg para medios porosos (*Moore e.t. a.l., 1992*).

Este movimiento tiene también una componente horizontal en las porciones superficiales del acuífero, sobre todo hacia las franjas costeras, en donde la posición vista en planta de la interfase salina presenta cambios estacionales de varios kilómetros.

Es decir, a diferencia de los acuíferos en medios granulares, en donde la “intrusión marina” es un proceso irreversible, en el medio cárstico de la Península de Yucatán se presenta como un proceso reversible, con invasiones entre 10 y 20 kilómetros tierra dentro durante el estiaje, para retornar hacia las costas durante la temporada de lluvias (*CONACYT, 1976*).

En conclusión, en los acuíferos cársticos como el de la Península, el frente de intrusión de agua salada marina experimenta cambios transitorios en su posición bajo la influencia de patrones estacionales de recarga, movimiento de las mareas y fluctuaciones del nivel freático por el bombeo, entre otros.

### **7.2.2 Modelo Conceptual de Funcionamiento Hidrogeológico de la Porción Costera Norte de Quintana Roo y del área de estudio.**

De acuerdo con Moore, et. al., 1992, en la zona costera oriental de la Península de Yucatán, existen dos principales tipos de sistemas de flujo en el acuífero costero, que presentan gradaciones entre ellos; un sistema es el que está contenido en materiales granulares, el cual está integrado por las rocas del Cuaternario (Pleistoceno); el segundo sistema se localiza en los materiales del Terciario (Pre-pleistoceno, F. Carrillo Puerto), conformado por rocas fracturadas y con cavidades cársticas. Ambos sistemas se identificaron dentro del área de estudio; en general el primero funciona como un acuífero libre, mientras que el segundo actúa como un acuífero semiconfinado, debido a que en su cima se tiene un espesor promedio de 5 m de sascab y calizas alteradas y reducidas a arcillas, que funcionan como un acuitardo (materiales muy poco permeables por los que el agua subterránea se mueve muy lentamente, del orden de mm por día).

La columna de agua observada donde se localiza la zona de estudio en Playa Mujeres se divide en tres cuerpos: un lente de agua dulce, un horizonte delgado con agua salobre, y debajo agua de mar con diferentes rangos de salinidad proveniente de la intrusión marina.

### **7.3 Identificación de Cuerpos de Agua por su Conductividad Eléctrica**

La columna de agua se divide en tres cuerpos: un lente de agua dulce, resultado de la infiltración de agua de lluvia y del flujo proveniente tierra adentro, que descansa sobre una zona de agua salobre la cual a su vez sobreyace a agua de mar proveniente de la intrusión marina.

En la base del delgado horizonte de agua dulce, se localiza un límite que se conoce técnicamente con el nombre de "haloclina" (*se puede identificar en campo porque es la zona en donde el cambio en salinidad es muy rápido con la profundidad*); su posición es variable con respecto al tiempo y su salinidad está entre el 5 y 95%, en comparación con el agua de mar (constituye una zona de mezcla o interfase). Bajo ésta se encuentra agua subterránea cuyo origen es el Mar Caribe, por lo que su composición y salinidad es típica del agua de mar (Back W, 1974; Velázquez A Luis, 1986).

#### **Horizonte de Agua Dulce (CE <2,000 $\mu$ S/cm)**

Este cuerpo presenta espesores muy variables, e inclusive en muchos sitios no se le identificó, en el PCAR-9 se encontraron espesores de hasta 3.44 m; esto permite concluir que el espesor del agua dulce no sólo se adelgaza conforme se acerca a la costa como sería su comportamiento normal, sino que en algunos sitios dentro del área de estudio no existe.

Lo anterior contrasta con el modelo tradicional regional que se mencionó en párrafos anteriores; sin embargo, la ausencia del cuerpo de agua dulce, se explica debido a que gran parte de la zona de estudio está entre la laguna de Chacmochuch y el Mar Caribe, por lo que su funcionamiento aquí es como el de una isla circular (figura 7.3.1.1), en la que el agua de lluvia se precipita sobre su superficie y se infiltra; posteriormente el agua fluye de forma continua hacia sus flancos, lo que provoca que gran parte de esta se haya drenado hacia el mar, varios meses después de terminada la temporada de lluvias; por otra parte, la existencia de zonas muy carstificadas de alta permeabilidad (desarrolladas a través de fracturas o fallas), representan vías de acceso del agua de mar hacia tierra adentro, cuando los vientos fuertes actúan sobre el agua marina de la laguna o del mar, lo cual provoca que la poca agua dulce contenida en las arenas, se contamine en las zonas inmediatas a esas alineaciones geológicas.

En los sitios donde se tiene un aporte permanente de agua dulce del continente o donde la comunicación entre la laguna y el mar no existe, se tiene la presencia de este pequeño horizonte de agua dulce.

Finalmente es importante citar que el agua dulce en la zona de Estudio se aloja siempre en las arenas, y está flotando y rodeada por cuerpos de agua de mayor salinidad, pudiendo conservarse sólo bajo condiciones como las descritas arriba.

Otro proceso identificado en estudios anteriores desarrollados en la región, fue el de encontrar CE equivalente a la del agua dulce o salobre a profundidades en las que sólo debería de existir agua marina; esta situación se asocia con aportes provenientes del continente desde grandes distancias; el proceso fue comprobado a través de la realización de perfiles de temperatura; en este caso siempre coincidió que un descenso de algunas décimas de grado en la temperatura, correspondió con un descenso del orden

de 1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en la CE.

El movimiento de agua dulce a esas profundidades (siempre variables), se relaciona con conductos de disolución por lo que el agua se mueve sin mezclarse con otra de calidad diferente; esta es otra prueba de la elevada heterogeneidad de las calizas.

#### **Horizonte de Agua Salobre (CE entre 2,000 y 5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

Este cuerpo se localiza por debajo del agua dulce; de manera similar a ésta también su espesor es variable y disminuye hacia la franja costera.

En ocasiones puede estar ausente, mientras que en el PCAR-9 llegó a tener 1 m de espesor.

El agua con esta salinidad se encuentra almacenada en las arenas, en el arrecife de coral y en el sascab.

#### **Horizonte de Agua de Mar de Baja Concentración Salina (CE entre 5,000 y 20,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

Se caracteriza por encontrarse a mayor profundidad conforme se adentra en el continente; en las regiones internas no se ha detectado, excepto en el pozo perforado por la CONAGUA en Nuevo Xcan, a 100 m de profundidad, en donde la CE fue del orden de 7,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En la zona de estudio el espesor de este cuerpo de agua es variable, va de 1 a 19 m. En la zona los materiales que almacenan este tipo de agua son el arrecife de coral y las calizas.

#### **Horizonte de Agua de Mar de Concentración Salina Intermedia (CE de entre 20,000 y 30,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

Los materiales en donde se almacena este tipo de agua son las calizas con espesores de 5 a 9 metros.

#### **Horizonte de Agua de Mar con Alta Concentración Salina (CE de 30,000 a 45,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

El agua de este tipo es almacenada en calizas y dolomías.

#### **Horizonte de Agua de Mar con muy Alta Concentración Salina (CE de 45,000 a 100,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

Es el cuerpo de agua más profundo su base no fue detectada.

También es un horizonte con agua que tiene muy poca dinámica, se ubica en calizas y dolomías

### **7.4 Comportamiento Hidrogeológico de los Diferentes Horizontes de Agua**

Una vez identificados los distintos acuíferos que existen en la zona y la posición de los diferentes horizontes de agua que en ellos se encuentran, es importante explicar la modificación que sufren los espesores de agua en los horizontes con diferente calidad, ante el bombeo, la perforación, y la presencia de cuerpos de carga constante como son la laguna de Chacmochuch y el Mar Caribe, recordando que estos últimos son dinámicos (efecto de las mareas y del viento).

Bajo las condiciones geográficas de la zona, cuando se perfora un pozo o noria que está diseñado para extraer agua en materiales que conforman un acuífero libre (caso de la parte superior de las arenas), y que contiene sólo agua dulce y salobre, se extraerá como es de esperarse agua con esas características químicas, y como consecuencia se disminuirá el espesor del horizonte que contiene ese tipo de agua.

Los procesos son diferentes cuando se perfora un pozo que capta agua tanto del acuífero libre como del semiconfinado, ya que en el interior del pozo al modificar la carga hidráulica del acuífero semiconfinado, se forma una mezcla de las salinidades del agua que contiene cada acuífero; con el tiempo y bajo condiciones estáticas (sin bombeo), se tiende a llegar a tener una estratificación del agua de acuerdo a su densidad; sin embargo al llevar a cabo un bombeo la estratificación se modifica de forma importante, y se tiene en consecuencia una disminución del cuerpo de agua de menor salinidad y a la formación de una zona de dispersión (zona de salinidad intermedia entre la calidad original del agua de cada acuífero) más amplia, donde se ubican los cuerpos de agua salobre y marina; en este caso los cuerpos inferiores de mayor salinidad permanecen prácticamente sin cambios (siempre y cuando la cantidad de agua extraída no supere la capacidad del medio para proporcionar el volumen requerido).

Por otro lado, es importante volver a mencionar el efecto que causa tanto en condiciones estáticas como de bombeo, el agua dulce a presión que se mueve a través de cavidades de disolución en la zona de agua salobre y por debajo de ella, lo cual provoca cambios abruptos en la salinidad a profundidad pudiéndose identificar en ocasiones cuerpos de agua dulce entre cuerpos de agua salobre o marina.

Este comportamiento ha sido identificado también en otras zonas, como en la región norte de la costa oriental de la Península y hacia tierra adentro, donde no se presentan los sedimentos arenosos que conforman la parte granular del acuífero, y en donde los volúmenes de agua que se mueven en el subsuelo son variables en función de la carstificación de las rocas de la Formación Carrillo Puerto; es decir, a profundidad se encuentran grandes cavidades por donde el agua salada marina penetra, o bien por los que el agua dulce sale a presión, generando que los volúmenes y calidades de agua sean variables.

Finalmente, en lo que se refiere a la identificación de las zonas de recarga del acuífero con agua dulce, ésta proviene del suroeste de la región y sigue una dirección asociada a las grandes estructuras (SW-NE), así como a la presencia propia del carst, teniendo como destino final la línea de costa

## 8. HIDROGEOQUÍMICA

### 8.1 Hidrogeoquímica Regional

La calidad del agua subterránea del acuífero calcáreo de la Península de Yucatán está controlada por los siguientes procesos hidrogeoquímicos (CONAGUA, 1998):

- a) Dilución del agua de lluvia.
- b) Contaminación local por desechos residuales.
- c) Disolución de minerales de carbonato y sulfato que predominan en la zona.
- d) Mezcla con agua salobre que subyace al lente de agua dulce.

La variación en el contenido de sales disueltas en el acuífero es originada por la dilución que produce el agua de lluvia; la aportación de fluidos y desechos residuales, son considerados como procesos poco significativos a escala regional.

El efecto de la lluvia es de carácter temporal y permite, por un lado, la renovación y depuración del acuífero, esta condición establece la presencia de un proceso reversible; por otro lado, las características hidráulicas y la cuantiosa recarga del acuífero propician el rápido tránsito hacia el mar de los contaminantes superficiales contenidos en el agua subterránea.

La disolución y precipitación de minerales (*principalmente carbonatos*), y la mezcla con agua salada, son los procesos dominantes que caracterizan la calidad del agua subterránea de la Península de Yucatán, y se manifiestan por la aportación notable de sales disueltas, determinando así los diferentes grados de salinidad.

La figura 8.1.1 ilustra la distribución del contenido de Sólidos Totales Disueltos (STD) en las porciones superficiales del acuífero de la Península de Yucatán, e indica que éste varía entre 500 y más de 4,000 miligramos por litro (mg/l). En general, las menores concentraciones de sólidos disueltos totales se localizan en la planicie interna, con valores entre 500 y 1,000 mg/l, incrementándose gradualmente hacia el mar, hasta alcanzar concentraciones mayores a 4,000 mg/l, sobre todo en las cercanías de la costa.



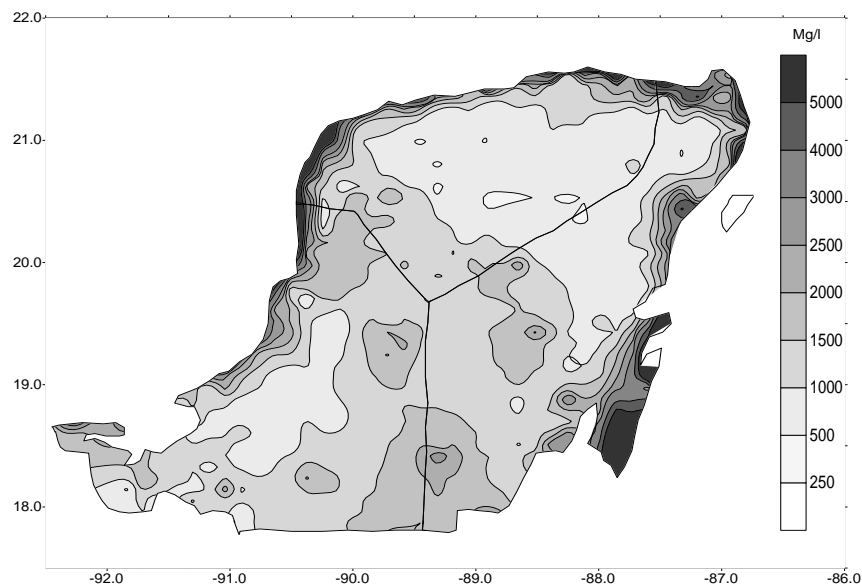


Figura 8.1.1 Configuración regional de sólidos totales disueltos (STD)  
(modificado de CNA 1998)

Por otro lado, en el acuífero costero oriental de la Península de Yucatán, el fenómeno de intrusión de agua marina se lleva a cabo de manera estacional, en función de la cantidad de agua recargada, que produce un incremento de la carga hidráulica hacia el interior del continente.

Por esta razón en la temporada de estiaje, al disminuir la carga hidráulica en la parte continental como producto de la descarga de agua dulce hacia la costa, en zonas de alta permeabilidad se dan invasiones de agua de carácter oceánico tierra dentro.

## 8.2 Hidrogeoquímica Local

### 8.2.1. Distribución de la Calidad del Agua en el Subsuelo

La distribución espacial de los principales parámetros fisicoquímicos analizados permite evaluar la calidad del agua subterránea de la zona de estudio.

#### a) Concentración salina

Para conocer de forma indirecta el contenido salino del agua subterránea, se realizaron mediciones de la conductividad eléctrica (CE) en las obras y cuerpos de agua censados. Los valores indican que el agua dulce ( $CE < 2,000 \mu S/cm$ ) en el predio tiene espesores muy reducidos, siempre menores a 2 m, y en una gran parte del área este tipo de agua no está presente.

Este aspecto puede observarse claramente en el plano 5, denominado “Configuración de Conductividad Eléctrica”, en donde se observa que el agua que está por debajo de los  $2,000 \mu S/cm$  se presenta en:

Esquina noroeste, donde se localizan los cuerpos de agua L-2 y L-3.

La zona centro – este en donde se ubican la laguna L-7 y el PCAR-9.  
La zona sur donde están las obras: PCAR-14 y PCAR-15.

### **b) Descripción de los Resultados de los Análisis Químicos**

Para conocer la calidad química de los diferentes cuerpos de agua y obras de la zona de estudio, se tomaron 3 muestras de agua y se realizaron sus análisis químicos.

Las muestras fueron tomadas en.

Tres cuerpos de agua (2 de la laguna de Chacmochuch y una de agua de mar).  
Los resultados muestran que el agua tiene muy alta salinidad.

Esta situación se debe a que las muestras de los cuerpos de agua superficiales fueron obtenidas en la parte superior del mismo.

La familia de agua a la que pertenece las muestras tomadas es la clorurada – sódica, lo que confirma la fuerte influencia del agua mar.

### **c) Concentración de Ácido Sulfhídrico**

La presencia de esta sustancia es muy evidente en la zona de estudio, y se manifiesta a través de un fuerte aroma a gas sulfhídrico; este aroma se percibe en prácticamente los cuerpos de agua censados, sean someras o profundas, con agua dulce, agua salobre o agua marina.

Durante las diferentes actividades realizadas se obtuvieron muestras para determinar la concentración de ácido sulfhídrico en laboratorio.

Con respecto a esta sustancia, es importante complementar los datos obtenidos en este estudio, con más análisis químicos que permitan identificar si existe un patrón que muestre hacia dónde se ubican los valores más altos; o bien confirmar la hipótesis planteada hasta este momento, que indica que es un proceso que se presenta en toda la zona, independientemente del tipo de agua.

## **9. RESULTADOS**

Con todo lo comentado hasta este punto, se realizará una integración que permita dar respuesta a los objetivos que dieron origen al estudio.

### **9.1 Integración para dar Respuesta a los Objetivos.**

#### **9.1.1 Aspectos hidráulicos**

Las actividades realizadas permiten concluir que la zona tiene la potencialidad hidrogeológica para proporcionar 120 lps y mucho más, debido a que los dos acuíferos que contiene (libre y semiconfinado), están constituidos por materiales con permeabilidad media a muy alta, que son alimentados de forma directa por el agua marina de la Laguna de Chacmochuch y el Mar Caribe, por lo que nunca habrá problemas de disminución del agua almacenada en ellos.

Desde este punto de vista, el hidráulico, la zona con mayor potencialidad hidrogeológica, de acuerdo a los resultados de la geofísica se localiza al oeste, por lo que las obras de extracción deberán localizarse hacia esa porción de la zona de estudio, y evitar la zona donde se ubicaron los SEV's 5 y 7 que pueden estar en zonas con poco desarrollo cárstico, lo que podría provocar que se obtuvieran pozos que proporcionaran caudales reducidos.

El número de obras a perforar para obtener el caudal deseado, depende del caudal máximo que se pueda obtener de un solo pozo; como se propone perforar pozos someros de 7 M. de profundidad, que aprovecharán el agua almacenada en el acuífero libre en donde la permeabilidad es alta, se recomienda separar las obras a una distancia de 250 m; esta cifra que se considera sobrada deberá de ser comprobada cuando se realicen las obras relacionadas con las perforaciones.

#### **9.1.2 Aspectos hidrogeoquímicos**

En este apartado se dará respuesta al 2º. objetivo, Las actividades relacionadas con calidad del agua, y la estratificación de la misma, consistieron en la realización de PCE's, análisis de la variación de la calidad del agua.

En la parte norte del predio, donde se ubica el piezómetro PI-1, con base en la CE se conoce que el agua dulce tiene un espesor de 2.21 m y llega hasta una profundidad de 3.44 m; que el agua salobre constituye un horizonte muy delgado de casi 10 cm de espesor, y que el agua marina de concentración intermedia (de 20,000 a 30,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) se localiza a 3.50 m de profundidad.

Estos datos permiten concluir que en grandes extensiones de la zona de estudio el agua dulce no existe, y que es difícil encontrar horizontes de espesor potente con agua con concentraciones entre 2,500 y 10,000 mg/l de STD; de igual forma se concluye que la zona que tiene el mayor espesor con agua de 10,000 mg/l o menos de STD es la sur, con alrededor de 7 m, es la porción de la zona de estudio que recibe aportes del agua de recarga regional provenientes de tierra adentro.

Esta situación debe mejorar en época de lluvias, sin embargo, muchos meses tendrían circunstancias similares a las aquí expuestas.

Por esta razón lo más adecuado es extraer agua marina de concentración salina media, esto significaría aprovechar el recurso que tiene concentraciones de STD del orden de 20,000 mg/l; este tipo de agua se localiza para esta época a profundidades del orden de 7 m, lo cual llevaría a explotar el acuífero granular de tipo libre.

Como se ha comentado la permeabilidad de las arenas y bancos de coral es alta, sin embargo no como la de las calizas; por ejemplo las arenas que conforman acuíferos de tipo libre tienen permeabilidades del orden de  $5 \times 10^{-3}$  cm/seg (aproximadamente 4 m/día), sin embargo las calizas alcanzan valores de cientos de metros por día. Por esta razón, y bajo la premisa de que en la porción sur del predio existe cuando menos un límite de carga constante, el Mar Caribe, se recomienda que los pozos tengan una profundidad de hasta 15 m, pero con tubería ranurada sólo de los 3 a los 7 m, lo que obligará a que penetre agua de la calidad señalada; la razón por la cual se propone que el pozo llegue hasta 15 m, es para que su parte final que va de los 7 a los 15 m funcione como cárcamo de bombeo.

Con este diseño se obliga a que el agua que penetra a la obra no exceda en mucho los rangos de calidad del agua citados, con lo cual este parámetro (calidad del agua que se extrae) se mantiene prácticamente constante; sin embargo, este diseño también obliga a que no se tengan abatimientos mayores a 3 m, lo cual disminuye la cantidad de agua que se pueda extraer de cada pozo.

Es importante que cuando se perfore la primer obra de extracción previamente se construya un piezómetro con un equipo de perforación tipo Long Year 34, que permita la toma continua de núcleos de material, la evaluación directa de la conductividad hidráulica, y la instalación de un piezómetro permanente, terminado con tubería de PVC ranurada de principio a fin, para que se puedan realizar PCE's, cuyos resultados aunados al conocimiento de la litología y de la conductividad hidráulica, permitirán establecer el diseño definitivo del pozo de extracción, el cual deberá perforarse a no más de 2 m de distancia.

Una vez que sea perforado el pozo de explotación, a 2 m del piezómetro, se deberán realizar pruebas de bombeo para evaluar de forma directa su radio de influencia, y con ello verificar si la cifra de 250 m de separación entre pozos de explotación es correcta.

Finalmente, el caudal de agua que se recomienda explotar es de 20 a 25 lps, pues de esta forma se garantizará que las arenas tengan la capacidad acuífera para mantener este gasto sin que se generen descensos importantes que lleguen a estar por debajo de la tubería ranurada; la cantidad de agua almacenada en el acuífero no se considera un problema, debido a la cercanía del Mar Caribe.

Con base en estas consideraciones se requerirán entonces de 5 pozos para obtener el caudal de 120 lps (ver ubicación en el plano 2).

Por otra parte para descargar el agua residual con muy alta concentración salina derivada de la planta de tratamiento, se recomienda usar el pozo de 60 m de profundidad, pues está probado que a 40 m tiene valores de cloruros superiores a los que solicita la CONAGUA, sin embargo es necesario que previamente se corra una videograbación del mismo, pues es necesario conocer que tramo(s) están ranurados para garantizar ante CONAGUA que el agua se filtrará sólo a niveles inferiores a los 40 m.

Por otra parte, se propone que los pozos de absorción a utilizar para la inyección de aguas residuales sean ubicados a lo largo de la costa, porque es el sitio en donde de forma natural estará más cerca de la superficie el nivel acuífero con 19,000 o más mg/l de cloruros; también estar cerca de la costa garantiza que no haya mucha fluctuación de la calidad química del agua contenida en este nivel acuífero, con la estación climática; sin embargo es necesario para seleccionar el o los sitios para perforar los pozos de absorción de aguas residuales, realizar previamente sondeos eléctricos verticales (SEV's), pues como se comentó en apartados anteriores, hacia la zona próxima al SEV 5 (este del predio) puede haber rocas con baja permeabilidad.

En lo que respecta al agua pluvial está puede ser descargada en pozos que deberán tener una profundidad de entre 5 y 10 m, según la concentración salina que haya en cada zona, siempre cuidando que se tengan más de 5,000 mg/l de sólidos totales disueltos; de esta forma se garantizará que el agua que se inyecta es de mejor calidad que el agua del horizonte acuífero donde penetra; También en este caso la capacidad de absorción de los pozos dependerá de las propiedades del medio en el sitio en donde se localicen; si el pozo se diseña para que las aguas pluviales ingresen directamente a las calizas, los pozos tendrán una mayor capacidad de absorción, que si son construidos para que el agua penetre en las arenas.

## 10. CONCLUSIONES

Con los ocho SEV's, se pudieron realizar secciones que permitieron visualizar la distribución de los materiales en el subsuelo y la calidad del agua que contienen.

En sentido oeste-este en la sección I-I' existe una variación progresiva de la resistividad, donde los valores más bajos están hacia el oeste, esta situación se correlaciona con cambios laterales en el tipo de materiales y en su permeabilidad.

El arreglo de los materiales en sentido Norte –Sur sección II-II' es más continuo debido a que esta sección es paralela a la línea de costa, por lo que los contactos entre formaciones o unidades litológicas son más continuas.

La zona está conformada por los siguientes materiales:

En el subsuelo por la Formación Carrillo Puerto del Mioceno – Plioceno, que está conformada por calizas puras en su base y hacia su cima por calizas arcillosas o arcillas calcáreas (margas); ocasionalmente llega a presentar arenas intercaladas. En estas calizas se han desarrollado procesos cársticos que han provocado la disolución de la roca y la formación de conductos de disolución, razón por la cual su permeabilidad es muy alta. En algunos sitios las calizas cambian lateral y verticalmente a dolomías que tienen permeabilidad baja o media. Este conjunto de variaciones provoca que la formación sea muy heterogénea.

Sobre la formación anterior hay rocas del Paleoceno, conformadas por calizas coquiníferas (observadas fuera del predio, en la zona de Sueño Guajiro) en su base, que son cubiertas por un arrecife de coral en su parte superior la unidad presenta arenas compactas pero no cementadas, de color amarillo claro, constituidas por sedimentos de grano fino a medio, muy bien seleccionadas y con espesores de unos 12 m. La permeabilidad de la unidad en conjunto es alta.

El modelo conceptual de comportamiento hidrogeológico para la zona donde se ubica la zona de estudio, es el siguiente: se presentan dos tipos de acuíferos, uno de tipo libre contenido en los materiales granulares que tienen como base el sascab y las calizas arcillosas, y otro de tipo semiconfinado que está debajo en la caliza de la Formación Carrillo Puerto.

Dentro de estos acuíferos existe agua de diferente composición química; en el acuífero libre coexiste agua dulce, salobre y marina de baja concentración salina. En el acuífero semiconfinado siempre hay agua marina con diferentes rangos de concentración.

La ausencia de agua dulce en muchas partes del área de estudio se debe a que gran parte del mismo está entre la laguna de Chacmochuch y el Mar Caribe, por lo que su funcionamiento allí es como el de una isla circular (figura 7.3.1.1), en la que el agua de lluvia se precipita sobre la superficie del terreno y se infiltra; posteriormente el agua fluye de forma continua hacia sus flancos, lo que provoca que gran parte de ésta se drene hacia el mar durante varios meses después de terminada la temporada de lluvias; por otra parte, la existencia de zonas muy carstificadas de alta permeabilidad (desarrolladas a través de fracturas o fallas), representan vías de acceso del agua de mar hacia tierra adentro, cuando los vientos fuertes actúan sobre el agua marina de la laguna o del mar,

esto provoca que la poca agua dulce contenida en las arenas, se contamine en las zonas inmediatas a esas alineaciones geológicas. En los sitios donde se tiene un aporte permanente de agua dulce del continente o donde la comunicación entre la laguna y el mar no existe, se tiene la presencia de este pequeño horizonte de agua dulce.

El espesor del agua salobre es también variable y en ocasiones llega a estar ausente. El agua marina se le dividió de forma arbitraria en tres; agua de mar con baja concentración salina cuando su CE varía de 5,000 a 20,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; agua de mar con concentración salina intermedia cuando su CE está entre 20,000 y 30,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; y agua de mar con alta concentración salina cuando la CE es de entre 30,000 y 45,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; cuando la CE es superior a 45,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  el agua se clasificó como de muy alta concentración salina. La primera varía en espesor de 1 a 19 m; la segunda de 5 a 9 m. Estas dos son la de mayor interés para ser explotadas.

Desde el punto de vista hidráulico, las actividades realizadas permiten concluir que la zona tiene la potencialidad hidrogeológica para proporcionar 120 lps y mucho más, debido a que los dos acuíferos que contiene (libre y semiconfinado), están constituidos por materiales con permeabilidad media a muy alta, que son alimentados de forma directa por el agua marina de la Laguna de Chacmochuch y el Mar Caribe, por lo que nunca habrá problemas de disminución del agua almacenada en ellos.

Continuando con el punto de vista hidráulico, la zona con mayor potencialidad hidrogeológica, de acuerdo a los resultados de la geofísica se localiza al oeste, por lo que las obras de extracción deberán localizarse hacia esa porción del predio, y evitar los sitios donde se ubicaron los SEV's 5 y 7 que pueden estar en zonas con poco desarrollo cárstico.

Para la extracción de los 120 lps requeridos, se propone se perforen 5 pozos, ubicados en la zona suroeste de la zona de estudio (ver plano 2); cada pozo deberá extraer un caudal de entre 20 y 25 lps.

Debido a que en la zona, el agua dulce en la mayoría de los casos no existe, y cuando se encuentra presenta espesores muy reducidos, resulta inadecuado utilizar este recurso para el abastecimiento.

Lo aconsejable es extraer agua marina de concentración salina media, esto significaría aprovechar el recurso que tiene concentraciones de STD de hasta 20,000 mg/l; este tipo de agua se localiza para esta época a profundidades del orden de 7 m, con lo cual se aprovecharía el acuífero granular de tipo libre.

## **11. RECOMENDACIONES**

Abastecer la zona a través de la desalación de agua marina, debido a que el agua dulce en grandes extensiones no existe, y en donde se encuentra tiene espesores muy reducidos, normalmente menores a un metro.

Para extraer los 120 lps que se requieren para cumplir con el objetivo, se recomienda perforar cinco pozos, a fin de garantizar que la calidad del agua extraída sea del orden de 20,000 mg/l de STD.

Equipar a las obras de extracción con bombas y tubería de acero inoxidable, a fin de alargar su vida útil.



### **13. BIBLIOGRAFÍA**

CONACYT-NSF 704. Estudio Hidrogeológico e Hidrogeoquímico de la península de Yucatán. Lesser I. J. M., octubre 1976.

CUSTODIO Y M. R. LLAMAS, 1976, Hidrología Subterránea, Editorial Omega, España.

DIRAC, S.A. DE C.V., 2001, Estudio Geológico del desarrollo Turístico Playa Mujeres, Municipio Isla Mujeres, Quintana Roo, realizado por Sergio Herrera Castañeda.

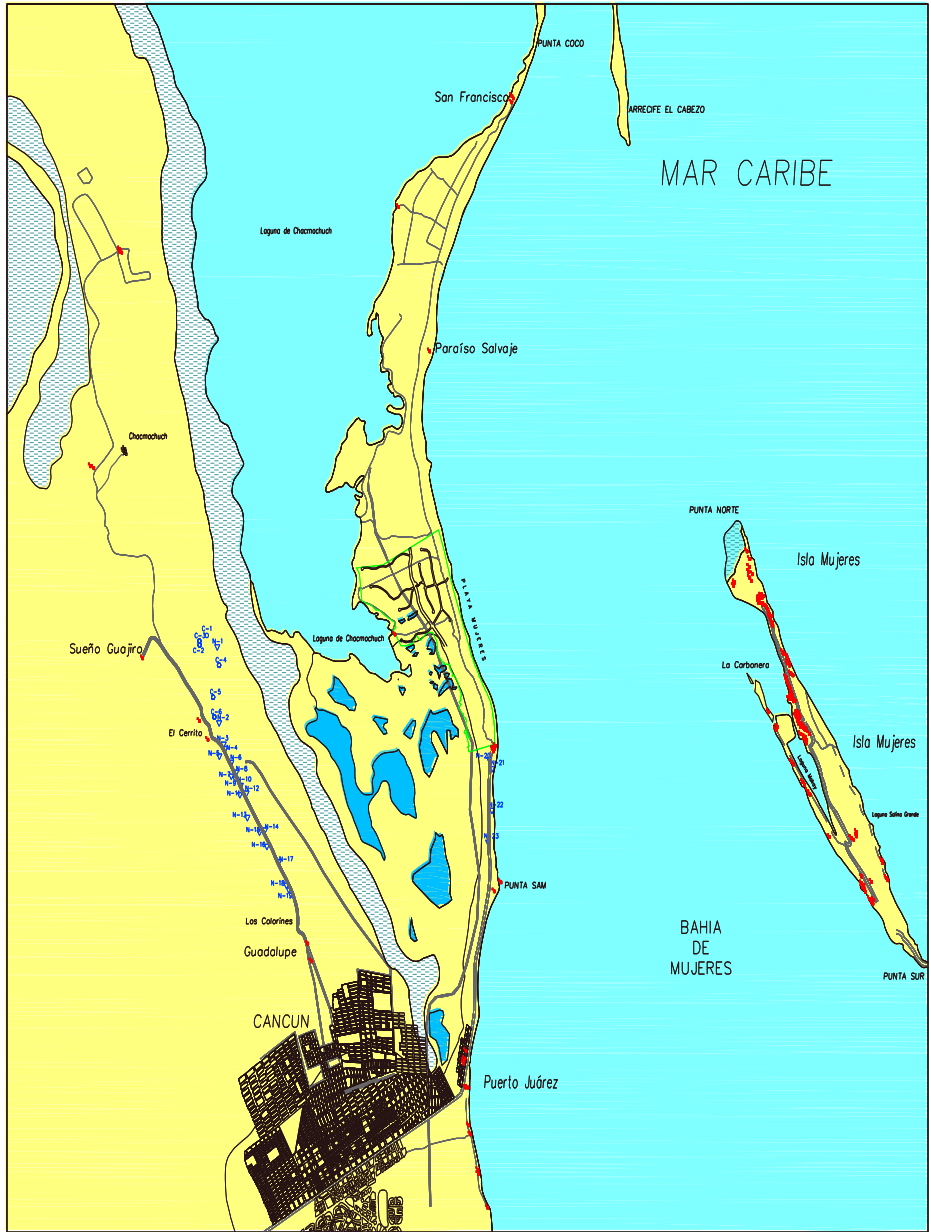
PLAYACAR. \_Estudio geohidrológico para el desarrollo turístico Playacar, Q. Roo. Realizado por EXYCO. S.A., 1987.

SARH. Delegación Estatal. Sondeos Exploratorios: Victoria 1 y Playa del Carmen. Doc. Interno., 1984.

SARH/CNA.- Gerencia de Aguas Subterráneas. Sinopsis Geohidrológica del estado de Quintana Roo, 1992

SPP-INEGI, Cartas Geológicas 1:250,000, 1984  
Cancún F16 – 8. Bahía Ascensión E16-2-5.

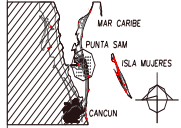
VELAZQUEZ A. LUIS Y ORDAZ A. ANSELMO. Provincias Hidrogeológicas de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LII Nos. 1 y 2 , 1993-1994.



ORIENTACION:



UBICACION:



SIMBOLOGIA

- ==== CARRETERA
- ==== BRECHA
- ==== VEREDA
- LINEA DE COSTA
- ~ CURVA ORDINARIA
- ~ CURVA MAESTRA
- CENOTE
- NORIA
- POBLACIONES
- LIMITE DEL DESARROLLO
- ▨ ZONAS DE INUNDACION
- CUERPOS DE AGUA

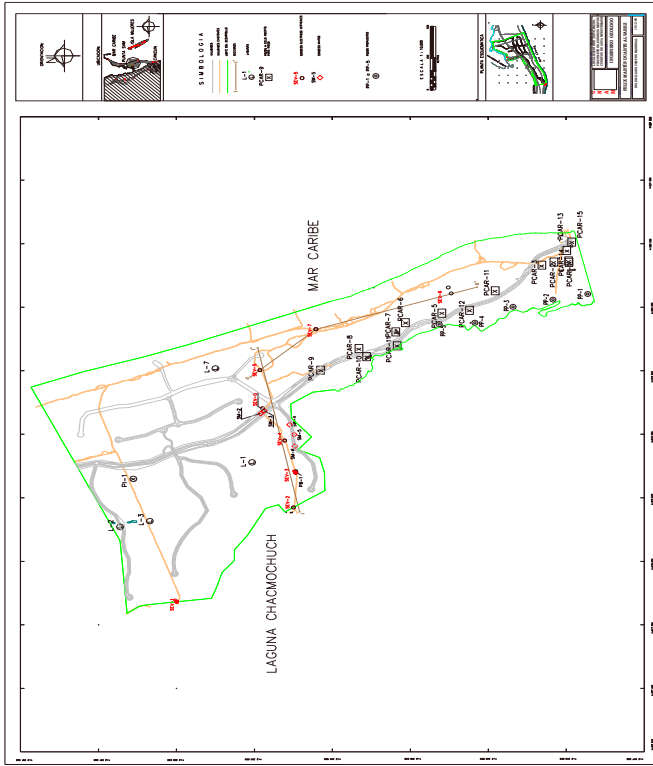
ESCALA GRAFICA

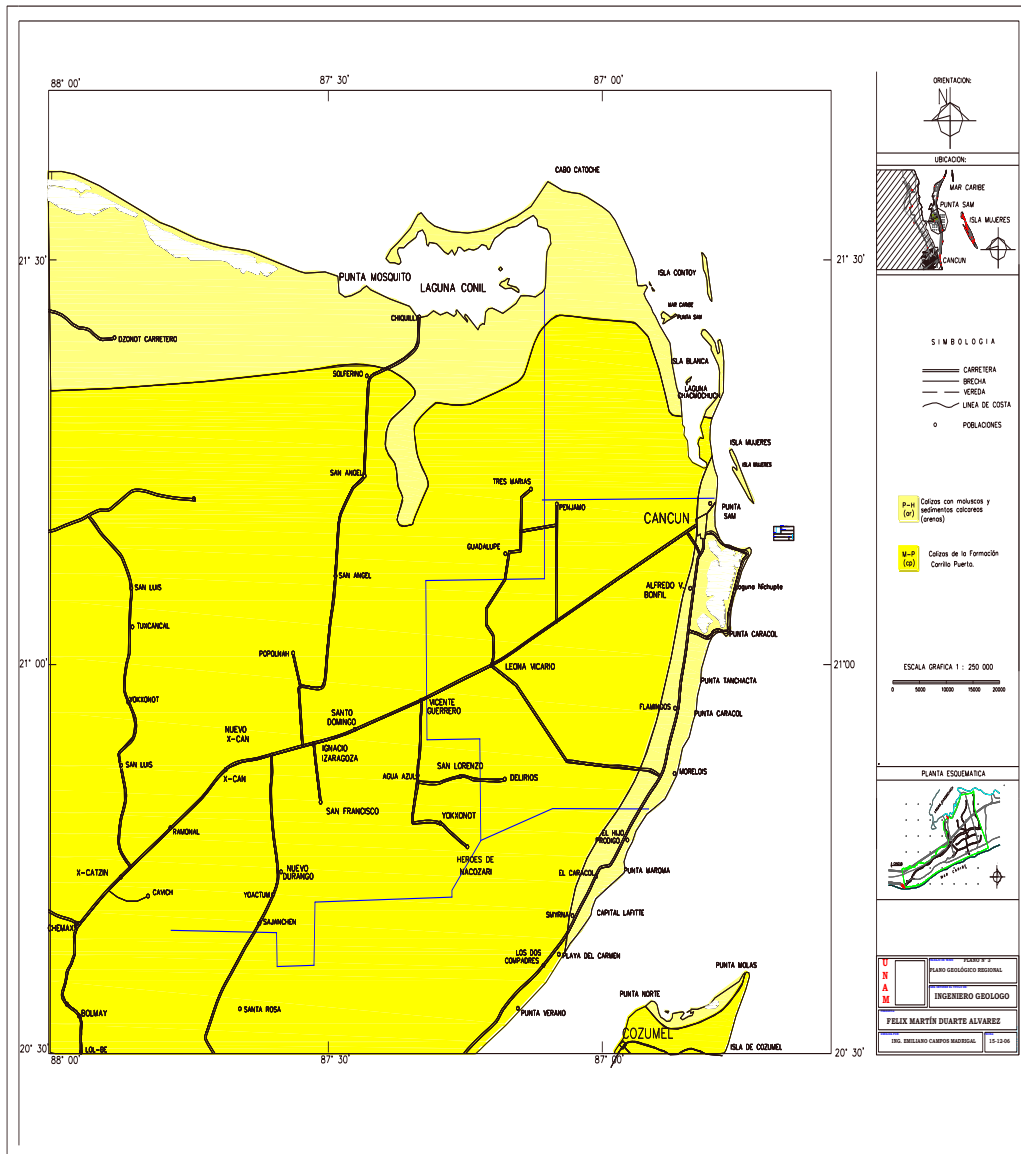


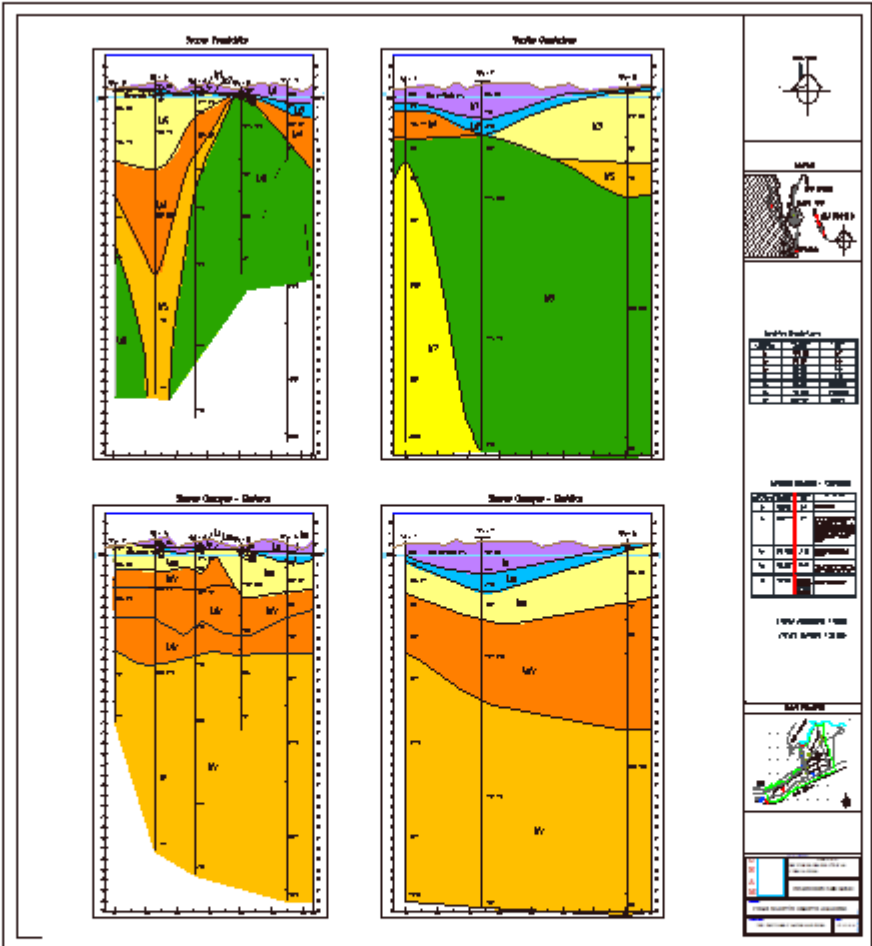
PLANTA ESQUEMATICA

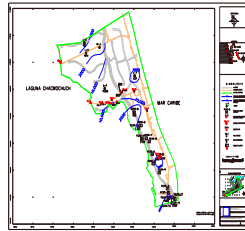


<b>U N A M</b>	PROYECTO DE OBRAS DE CAPTACION Y CUERPOS DE AGUA A ESCALA REGIONAL.
	INGENIERO GEOLOGO
<b>FELIX MARTIN DUARTE ALVAREZ</b>	
ING. EMILIANO CAMPOS MADRIGAL	15-12-06

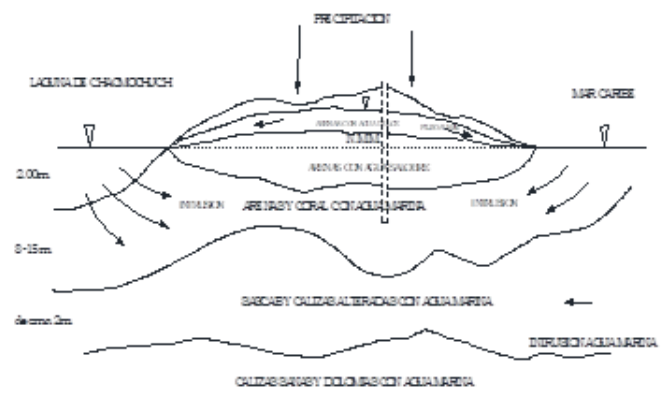








ESEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO



NOTA: ESQUEMA EN SECCIONES VERTICALES Y HORIZONTALES  
 10:100 (VER EL DISEÑO)

Figura 7.3.1.1