



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

Estudio de Exploración Geohidro-
lógica en la Porción Nororiental de
la Península de Yucatán
(Zona Cancun - Tulum - Coba)

T E S I S

Que para obtener el título de
INGENIERO GEOLOGO

Presenta

ROQUE VALENZUELA ESPINOZA



Director: Ing. Héctor Luis Macías González

México, D. F.

1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-004

SR. ROQUE VALENZUELA ESPINOZA
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Héctor Luis Macías González, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero geólogo:

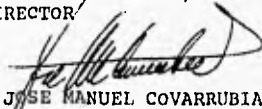
**ESTUDIO DE EXPLORACION GEOHIDROLOGICA EN LA PORCION NORORIENTAL
DE LA PENINSULA DE YUCATAN, ZONA CANCUN-TULUM-COBA**

I	INTRODUCCION
II	GEOGRAFIA
III	GEOLOGIA
IV	HIDROGEOLOGIA
V	HIDROGEOQUIMICA
VI	INTEGRACION Y CORRELACION DE RESULTADOS
VII	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	BIBLIOGRAFIA
	PLANOS E ILUSTRACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 26 de enero de 1994
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*ggt*

Bl.

A MIS PADRES:

ALFONSO VALENZUELA CASTRO,
MA. TERESA ESPINOZA GALLARDO.

MIS HERMANOS.

MI ESPOSA E HIJO.

MIS AMIGOS.

ESTUDIO DE EXPLORACION GEOHIDROLOGICA EN LA PORCION
NORORIENTAL DE LA PENINSULA DE YUCATAN,
ZONA CANCUN-TULUM-COBA

I N D I C E

RESUMEN

1 Introducción

1.1 Objetivos del estudio	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Método de trabajo	3
1.3.1 Actividades de campo y gabinete	3
1.3.1.1 Censo de aprovechamientos	5

2 Geografía

2.1 Localización	6
2.2 Vías de comunicación	7
2.3 Fisiografía	8
2.4 Hidrografía	9
2.5 Climatología	10

3 Geología

3.1 Marco geológico regional de la península de Yucatán	12
3.1.1 Estratigrafía	12
3.1.2 Geología estructural	19
3.1.3 Evolución geológica	21
3.2 Geología del área de estudio	21
3.2.1 Geomorfología	22
3.2.2 Estratigrafía	23
3.2.3 Geología estructural	25

4 Hidrogeología

4.1 Marco conceptual hidrogeológico regional	27
4.2 Modelo hidrogeológico del área de estudio	28
4.2.1 Unidades hidrogeológicas	28

5 Hidrogeoquímica

5.1 Hidrogeoquímica regional	30
5.2 Hidrogeoquímica del área de estudio	31
5.2.1 Muestreo y análisis químico	32
5.3 Caracterización hidrogeoquímica	33
5.4 Concentraciones iónicas	37
5.5 Configuración de la conductividad eléctrica	39
5.6 Relaciones iónicas	43
5.6.1 Relación $rCl/rHCO_3$	43
5.6.2 Relación rMg/rCa	44
5.7 Calidad del agua	44

6 Integración y correlación de resultados

6.1 Piezometría	48
6.1.1 Profundidad del nivel estático	48
6.1.2 Elevación del nivel estático	48
6.2 Integración hidrogeológica	49
6.3 Ocurrencia del agua subterránea	51
6.3.1 Recarga	51
6.3.2 Descarga	53
6.3.3 Extracción	53

7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Áreas favorables de explotación	56
7.2 Definición de zonas de captación	57
7.3 Recomendaciones	58

BIBLIOGRAFIA.....i

ANEXO 1.-TALBAS
ANEXO 2.-FIGURAS
ANEXO 3.-FOTOS
ANEXO 4.-PLANOS

RESUMEN

El estudio consistió en la elaboración de un censo estadístico de aprovechamientos hidráulicos y establecer el marco geohidrológico de la región, ubicándose el área de estudio en la porción Nororiental de la Península de Yucatán, comprendida en el polígono de las ciudades de Cancún-Tulum-Coba, censandose un total de 179 aprovechamientos entre pozos, norias y cenotes, los cuales tienen profundidades de 18 a 25 m, y diámetros entre 10 y 30 cm. La precipitación promedio anual en la zona es de 1266mm, temperatura de 24 grados C y evaporación potencial de 1480mm, respecto de la Geomorfología éstas se ubica en la región costera subdividida en playas, área de mareas, caracterizada por el poco relieve topográfico, escaso desarrollo de suelo y abundancia de cenotes y dolinas, teniendo depósitos de eolianitas.

La geología que caracteriza a la zona, es la Formación Carrillo Puerto conformada por calizas blancas masivas del Plioceno superior y existen depósitos del Pleistoceno-Holoceno los cuales corresponden a ambiente Eólico-Costero, existiendo Eolianitas en los alrededores de Puerto Morelos. Estructuralmente existen evidencias de lineamientos y fracturas en dos patrones principales; una tendencia NE-SW asociada a formas kársticas de grandes dimensiones y otra NW-SE de menor intensidad.

El modelo hidrogeológico del área define dos unidades hidrogeológicas, diferenciadas principalmente por los procesos geoquímicos del agua que en ella tienen lugar, así como por los tipos de discontinuidades que presentan en superficie, siendo los niveles superiores de la Formación Carrillo Puerto, con mayor desarrollo kárstico y fracturamiento que le permite un alta permeabilidad y los depósitos Recientes constituidos por calizas coquiníferas y arenas calcáreas finas en la parte inferior, que tienen una reducida área de exposición y por tanto menor superficie de captación, con profundidad del nivel freático de 0.5 a 7m y elevaciones de 0.13 a 1 m.s.n.m.m. La Hidrogeoquímica de la Península reporta tres principales procesos, como la dilución, la disolución y la mezcla con agua salada, los cuales se identificaron por Velázquez en 1986, destacando en el área de estudio los mismos procesos, reportando valores de concentraciones iónicas en promedio de S.T.D. de 916 concentrándose el 75% del total de 51 muestras con valores menores a 1000 S.T.D., y el 50% entre 400 y 800 S.T.D. La conductividad eléctrica registra valores promedio de 923 umhos/cm, incrementándose estos valores hacia la línea de costa.

Referente a la calidad del agua, el 80% de las muestras analizadas sobrepasan al menos una norma de calidad principalmente de S.T.D. y Cloruros, siendo aun así consumida en la región debido a la escasez y gran demanda que existe.

La profundidad del nivel estático varía entre 0.54 y 19.65 m, disminuyendo gradualmente hacia la costa, como la elevación del nivel estático, que en la zona más alejada de la costa, tiene valores máximos de 4 m.s.n.m.m. y alcanzado valores el gradiente hidráulico de 4.1 E-05 y 4.8 E-05, en los tramos de Naranjal-Coba y Naranjal-Paamul respectivamente.

De acuerdo con toda la información obtenida, se establece que las zonas más favorables de explotación son las retiradas entre 20 y 22 km de la costa, donde la calidad del agua es aceptable y los valores de conductividad eléctrica son menores a 1350 umhos/cm, con concentraciones de S.T.D. de 900 a 1000, además de existir los mayores espesores de agua de buena calidad: estas áreas son, la de Macario Gómez y Manual Antonio hay, a 5 Km al SE de Héroe de Nacozari y la zona localizada tierra adentro como Central Vallarta, Punta Laguna, Santo Domingo-El tinal y la franja de Emiliano Zapata-Agua Azul.

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 grandes en el aprovechamiento de los recursos acuíferos, generando la sobre-explotación de yacimientos acuíferos, algunos con consecuencias graves, sin embargo, existen áreas con un potencial hidrológico aún no explotado.

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

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

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

La presente investigación tiene como meta, analizar la distribución y dinámica de los acuíferos en la región noreste del Estado de Quintana Roo.

Los objetivos particulares del presente trabajo son:

- 1) Elaboración del plano base
- 2) Elaboración de un censo estadístico de aprovechamientos (pozos, norias y cenotes).
- 3) Establecer el marco geohidrológico de la región.
- 4) Definir el comportamiento hidrodinámico del o los acuíferos.
- 5) Determinar las áreas favorables de abastecimiento de agua potable a la infraestructura turística de la zona costera entre Cancún y Tulum.
- 6) Establecer las políticas de explotación más adecuadas en cuanto a calidad en el acuífero costero de la región.

1.2 ANTECEDENTES

Los primeros estudios geológicos sobre la Península de Yucatán, se remontan a fines del siglo pasado, cuando Heilpen, (1891) y Sapper, (1896) (en ISPHORDING, 1975), intentaron describir la geología y estratigrafía a nivel regional de la Península de Yucatán.

Estudios posteriores realizados por J. Butterlin y F. Bonet en 1960, lograron definir las unidades de roca que actualmente se reconocen. Pocos años después en 1965 Lesser Jones, en su trabajo *Geohydrology Problems in the Yucatán Peninsula México*, describe algunas cuestiones geohidrológicas de la Península.

Los primeros intentos de exploración con fines petroleros se inician en los años cincuenta; uno de estos trabajos los realizó A. Villagomez (1953), quien propuso un programa de prospección geológica para la Península de Yucatán.

En los inicios de la década de los setentas, Petróleos Mexicanos impulsó nuevas investigaciones, entre las cuales destaca la elaborada por López Ramos (1969), quien con base a información obtenida a través de pozos exploratorios e interpretación de levantamientos gravimétricos y magnetométricos, estudio las formaciones geológicas en el subsuelo de la Península y propone el nombre de Evaporitas Yucatán, para una secuencia de anhidritas, yesos, dolomías y calizas del Cretácico Medio.

De finales de los años setentas a la fecha, en que las vías de comunicación tienen mejoras considerables, la exploración geológica de la región se ha favorecido, logrando que los estudios geológicos y geohidrológicos se intensifiquen; entre ellos se encuentran los trabajos de Isphording W. (1975), que describen la geología de la península; Back y colaboradores han publicado diversos trabajos sobre las propiedades geoquímicas de los acuíferos de la región. El mismo Back (1980), así como B. Hanshaw (1979), J. Drake (1973) y R. Harmon (1972), L. Plumer (1980) y Velazquez (1986) entre otros autores, han considerado dentro de sus trabajos a el agua subterránea de la Península, como un posible modelo para explicar el comportamiento hidrogeoquímico en terrenos kásticos.

Otros de los trabajos de alcance local que revisten importancia para esta porción de la península son el realizado por Aguayo C. y colaboradores (1980), Hanshaw B. and Back w. (1979) y Plumer L. (1980), en donde proporcionan resultados geoquímicos e hidrogeológicos de la zona de Xel-ha, y de Durón P. (1983) que con el objeto de efectuar una investigación para fines termoeléctricos, describe el comportamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico del agua subterránea en los alrededores de Playa del Carmen.

Se aprecia la gran diversidad de estudios realizados, sin embargo, en muchos de ellos el carácter regional prevalece, básicamente en aquellos relacionados con aspectos hidrogeológicos, por lo que el conocimiento actual de la problemática geohidrológica carece de parámetros fundamentales como mediciones estacionales, tanto del nivel estático como hidrogeoquímico, así como control piezométrico y pruebas de bombeo. Por otro lado, el alcance de los estudios puntuales no permite extrapolar sus resultados dado que sólo satisfacen objetivos muy particulares; no obstante, una integración de éstos y bajo un modelo conceptual apropiado, permitiría extraer aspectos relevantes.

En lo que respecta a la geología, se desconoce a ciencia cierta los espesores y distribución de facies de las unidades litológicas aflorantes, y no se ha establecido aun, un modelo geológico-estructural y su relación con la hidrogeología. En lo que respecta a la zona de interés para el presente trabajo, las necesidades vinculadas con el desarrollo y crecimiento del área han obligado a la realización de diversos estudios, principalmente de tipo geohidrológico. En ese sentido la SARH, ahora Comisión Nacional del Agua, ha generado una cantidad considerable de informes técnicos, a través de compañías privadas y de sus gerencias regional y estatal, donde el abastecimiento de agua de buena calidad para la región es el objetivo principal.

En síntesis, se parte de un conocimiento geohidrológico preliminar y de una incertidumbre del conocimiento geológico; además, por mucho tiempo se han mantenido resultados de carácter preliminar que han cobrado fuerza dado que no se han realizado acciones encaminadas a su actualización.

1.3 METODO DE TRABAJO

1.3.1 ACTIVIDADES DE GABINETE Y CAMPO

Para la elaboración del presente trabajo, se llevó a cabo una secuencia de actividades distribuidas en cinco etapas alternadas, dos de ellas de campo y las tres restantes de gabinete. A continuación se presenta un resumen de dichas actividades:

- GABINETE (primera etapa)

- Adquisición de material cartográfico y fotográfico.
 - Recopilación y análisis de la información geológica y geohidrológica existente.
 - Análisis de fotografías aéreas escala 1:80,000 e imágenes de Satélite Landsat, bandas números 2 y 4 escala 1:250,000.
 - Interpretación fotogeológica y elaboración del mapa respectivo.
 - Programación de los trabajos de campo.
 - Elaboración de los mapas base.
- CAMPO (segunda etapa)
 - Censo de aprovechamientos y piezometría.
 - Recopilación de muestras de agua y determinación en cada una, de la conductividad eléctrica, temperatura, pH y alcalinidad.
 - Verificación y estudio geológico.
- GABINETE (tercera etapa)
 - Selección, envío y análisis físico-químicos de muestras de agua.
 - Vaciado de datos de campo a los mapas.
 - Interpretación de los datos de mapas.
- CAMPO (cuarta etapa)
 - Realización de la segunda fase de piezometría.
 - Verificación de las descargas de agua subterránea al mar
- GABINETE (quinta etapa)
 - Vaciado de los datos de campo a mapas y tablas.
 - Interpretación de los datos de campo.
 - Interpretación conjunta de la información.
 - Dibujo de mapas definitivos.
 - Redacción del texto.

1.3.1.1 CENSO DE APROVECHAMIENTOS

Una de las principales actividades de campo consistió en el levantamiento de un censo de aprovechamientos de agua subterránea con el propósito de conocer la cantidad de aprovechamientos hidráulicos en la zona de estudio (Tabla No. 1.1), sus características de captación y tiempo de bombeo; número de personas abastecidas y uso del agua (Tabla No. 1.2), así como la profundidad al nivel estático (Tabla No. 1.3).

El censo abarcó un total de 179 aprovechamientos (Tabla No. 1.1 y Fotos Nos. 1, 2, 3, 4, 5 y 6). Los aprovechamientos censados sobre el corredor Cancún-Tulum, suman un total de 122; de éstos 81 son norias, 22 pozos y 19 cenotes, de los cuales el 63% cuenta con equipo de bombeo. El censo se dirigió principalmente hacia este corredor por ser la zona de mayor desarrollo y por ende de mayor importancia.

Del total de aprovechamientos censados, el 54% cuenta con equipo de bombeo, entre los cuales 77 están equipados con bomba eléctrica y el resto de gasolina o diesel, contando los de gasolina con potencias de 1/2 H.P. a 25 H.P. predominando las de 2 H.P.; los diámetros de tubería de salida varía de 1.77 a 10.16 cm y el tiempo de bombeo es muy variado. Por lo que respecta al uso de cada aprovechamiento, el 52% son con fines potables, siguiéndole en orden de importancia los de uso doméstico y ganadero.

En lo referente a las características físicas de las obras, se encontró que la profundidad de los pozos varía de 18.0 a 25.0 m, con diámetro de ademe que fluctúan de 10.16 a 30.48 cm, presentando la mayoría de ellos 15.24 cm; las norias presentan diámetros de 63.5 a 144.78 cm y profundidades de 4.0 a 22.0 m.

En relación a los cenotes no existe una variación uniforme ni en diámetro ni en profundidad, puesto que son muy irregulares, el cenote más profundo muestreado tiene una profundidad de 55m a partir la superficie.

La localización de los aprovechamientos censados se muestra en el plano No. 1.

2. GEOGRAFIA

2.1 LOCALIZACION

La Península de Yucatán se localiza en la porción Sureste de la República Mexicana, comprende una superficie de aproximadamente 139,810 Km²; Lo que representa el 12.47% del Territorio Nacional y un 0.18% a nivel mundial.

Su límite Norte hace frontera con el Golfo de México, al Este con la República de Belice y el Mar Caribe, al Sur con la República de Guatemala y el Océano Pacífico, al Oeste con los Estados de Oaxaca y Veracruz.

Está dividida políticamente por tres Estados, al Norte por el Estado de Yucatán (38,402 km²); al Suroeste por el Estado de Campeche (51,196 km²) y al Este-Sureste por el Estado de Quintana Roo (50,212 km²).

El Estado de Quintana Roo se localiza en la porción Oriental de la Península de Yucatán, limitado al Sur con la frontera entre México y Belice representada por el Río Hondo, al Oeste con el Estado de Campeche, al Norte con el Estado de Yucatán, hacia el Este es limitado por el Mar Caribe y al Suroeste con la República de Guatemala (Fig. 2.1).

La superficie que comprende esta entidad la convierte en el décimo noveno estado en extensión territorial; dividido políticamente en siete municipios: Othón P. Blanco, Felipe Carrillo Puerto, José, María Morelos, Cozumel, Benito Juárez, Isla Mujeres y Lázaro Cárdenas.

La zona de estudio se incluye en un polígono delimitado por las ciudades de Cancún, Tulum, Coba y Nuevo X-Can; dentro del territorio de Quintana Roo en su porción Norte, delimitada geográficamente por los paralelos 20° 15' y 21° 15' de latitud Norte y entre los meridianos 86° 44' y 87° 40' de longitud Oeste.

Cubre una superficie aproximada de 4,630 km², que representa el 9% del Estado de Quintana Roo, la cual comprende parte de los municipios de Lazaro Cárdenas, Benito Juárez y Cozumel.

2.2 VIAS DE COMUNICACION

La zona de estudio está comunicada vía terrestre, por las carreteras: Federal No. 307, que une las ciudades de Cancún-Felipe Carrillo Puerto-Chetumal; Federal No. 180, que enlazan a las ciudades de Mérida y Cancún; la Estatal que comunica a las poblaciones de Nuevo X-Can-Cobá-Tulum; Así como algunos caminos de terracería que dan acceso a las principales poblaciones de la región (Fig. 2.2).

En lo correspondiente a vías aéreas, la zona se enlaza a la Red Nacional e Internacional de Comunicación, a través de los Aeropuertos Internacionales, ubicados en las ciudades de Cancún y Cozumel; así mismo, se cuenta con aeropistas rurales en Playa del Carmen, Tulum y otras poblaciones importantes.

Por vía marítima, se cuenta con la empresa Servicios Marítimos y Portuarios de Quintana Roo, que proporciona el servicio de transbordadores con salidas diarias, que unen las ciudades y poblaciones de: Cancún-Isla Mujeres, Punta Sam-Isla Mujeres, Puerto Morelos-Cozumel, Playa del Carmen-Cozumel, con tiempo de recorrido aproximado de 30 a 60 minutos.

Referente a la comunicación telefónica, se cuenta con ésta en la Ciudad de Cancún y mediante casetas telefónicas en Playa del Carmen, Tulum, Ignacio Zaragoza y otras poblaciones importantes. En las Ciudades de Cancún y Playa del Carmen existen oficinas de correos y telégrafos, mientras que en el resto de la zona es muy limitado. La comunicación ferroviaria en la zona de estudio no se proporciona; la estación más cercana se localiza en la Ciudad de Valladolid, Yuc.

2.3 FISIOGRAFIA

-Plataforma de Yucatán:

Dicha península es una plataforma parcialmente emergida, constituida por rocas que litológicamente corresponden a calizas y evaporitas, las cuales comprenden edades desde el Cretácico Tardío hasta el Reciente. De acuerdo con varios autores la Península de Yucatán se divide en dos regiones fisiográficas (Alvarez, 1958; Butterlin y Bonet, 1960, e Isphording, 1975). Una Plataforma Emergida y una Submarina (Figura No. 2.4); la primera a su vez se divide en dos Subprovincias según sus rasgos topográficos: en zonas de Planicies y Elevaciones (ISPHORDING, (1975).

- 1) Una gran plataforma sumergida limitada por escarpes.
- 2) Una plataforma emergida limitada por las costas y dividida por:
 - a) Una planicie interior al Norte y al Este, y
 - b) Un área de elevaciones (cerros y lomas) que se extiende hacia el Sur.

PLATAFORMA SUMERGIDA

La somera y amplia Plataforma Submarina, conocida como Banco Calcáreo (Yucatán-Campeche), es la porción de la Plataforma de Yucatán que está constituida por carbonatos masivos; dicha plataforma se caracteriza por una suave pendiente cuya inclinación preferencial es de Sur a Norte. Se encuentra limitada en sus tres lados por pendientes continentales escalonadas que caen abruptamente hacia las profundidades del Golfo de México. Está conformada principalmente por arrecifes de coral, alojados en la periferia; así como la presencia de estructuras de terrazas sumergidas que denotan antiguas líneas de costa (Logan, 1979).

PLATAFORMA EMERGIDA

La porción emergida de la Península de Yucatán ha sido frecuentemente descrita (Isphording, 1975) como una plataforma masiva de calizas horizontalmente estratificadas, la cual ha sido subdividida por varios autores en dos regiones fisiográficas: una planicie al Norte y una región de colinas al Sur que se extiende hasta el Norte de Guatemala. Se ha demostrado (Isphording, 1975) que no sólo las dos subdivisiones existen sino que al menos cuatro o quizás cinco pudieran reconocerse.

La Plataforma Emergida se presenta como una unidad masiva de calizas y evaporitas cuya estratificación es preferencialmente horizontal. Esta plataforma se divide en Zona de Planicies cuya extensa área se inicia al Sur y Suroeste de la Sierra de Ticul y es limitada al Sur por las Montañas Maya localizadas en la República de Guatemala. Su límite Este y Oeste lo constituyen el Mar Caribe y el Golfo de México respectivamente.

Se caracteriza por tratarse de un terreno plano en partes ligeramente rugoso y ondulado, según sea la roca aflorante y cuyas orientaciones son irregulares; asimismo se presenta algunos lomeríos en la parte Sur y Sureste de Quintana Roo, conformando pequeñas cadenas cuya orientación preferencial es Norte-Sur.

La zona de elevaciones contrasta con la planicie por presentar estructuras topográficas elevadas como la sierra de Ticul, y lomeríos

cuya altura varía de 50 a 100 m con respecto a la planicie, su longitud aproximada es del orden de los 110 km.

Localmente la topografía es suave; muestra sólo corrientes superficiales de tipo embrionario, algunas asociadas a formas kársticas de absorción como son dolinas, uvalas y lapiaz principalmente (Figura No. 2.3), estas estructuras se presentan en casi toda la zona, con variación en cantidad y forma.

Existen gran cantidad de dolinas, cenotes, microcúpulas kársticas, lagunas y llanuras de inundación, éstas últimas con dimensiones de metros hasta kilómetros, presentando formas circulares, alargadas e irregulares, generalmente estas geoformas están asociadas a un fracturamiento y probable fallamiento, manifestándose hacia el área de Cobá el mayor grado de karsticidad, con una orientación muy variada, mientras que hacia la costa se manifiesta un lineamiento muy claro NE-SW, alojado principalmente en el depósito de playa (Eolianita). En la línea de costa se presentan playas angostas y rocosas, playas semicirculares, caletas y algunos manantiales submarinos.

El área muestra un grado moderado de karsticidad, encontrándose un tipo de kárst clasificado como Merocarst de acuerdo a sus características morfológicas y estructurales. Desde el punto de vista hidrogeológico se clasifica como un kárst de plataforma.

2.4 HIDROGRAFIA

El estado de Yucatán cuenta únicamente con un sistema hidrológico de aguas subterráneas, oscilando entre profundidades de 80 m y 120 m para las zonas topográficas más altas, mientras que para las zonas topográficas más bajas es del orden de los 3 a 6 m. Es de hacer mención que los perfiles de las costas están circundados por pantanos y marismas, dichas características hacen denotar en el estado una topografía eminentemente kárstica, dando lugar a la presencia de abundantes dolinas (cenotes).

Asimismo, en el Estado de Quintana Roo la circulación es primordialmente de carácter subterráneo y no existen prácticamente corrientes superficiales, excepto por los Ríos Azul y Hondo; así como pequeñas corrientes que se les conoce con los nombres de San Ramón, Arroyo Sabido y el Arroyo de Chan. El Estado cuenta con 44 lagunas entre las principales se encuentran: La Laguna de Bacalar, Chichancanab y Cobá.

El drenaje de la zona de estudio está configurado por sistemas hidrológicos muy particulares, debido a la conformación geológica y topográfica desarrollándose únicamente corrientes de tipo embrionario asociadas al desarrollo de formas kársticas.

2.5. CLIMATOLOGIA

PRECIPITACION, TEMPERATURA Y EVAPORACION

La Península de Yucatán tiene en general un clima tropical lluvioso con precipitaciones en verano. Solo una pequeña franja costera situada al Noroeste de la península en las vecindades de Progreso, Yuc., presenta un clima seco muy caliente con vegetación de estepa y con lluvias durante el verano. Esta franja es la que tiene menor precipitación en la región, la cual varía entre 500 y 800 mm.

El resto de la península tiene una precipitación variable entre 1,000 y 1,200 mm. En el Suroeste de la misma, alrededor de Ciudad del Carmen, Campeche, la precipitación es más abundante y alcanza hasta 1,500 mm. En general, la península es calurosa a causa de la ausencia de montañas y otras elevaciones, con una temperatura media anual de 26 grados centígrados; los registros mensuales de temperatura, indican que de abril a septiembre se presentan las temperaturas más altas, con valores que oscilan de 27 a 34 grados centígrados (Lesser, 1976).

La precipitación media anual de la región peninsular es de 1,230 mm lo que representa un volumen de 172,000 millones de m³ anuales. Un alto porcentaje de la lluvia se concentra en los meses de junio a septiembre; se presentan lluvias ocasionales en invierno y escasas en abril y mayo. Las precipitaciones de verano se deben a los fenómenos convectivos y a los ciclones, mientras que las de invierno son consecuencia de los nortes.

La evaporación potencial varía de 1,500 a 2,000 mm (Lesser, 1976), los valores más bajos se presentan al Sur de la península y los más altos en la parte Norte.

Para el área del presente estudio, Durón P. (1983) determinó las medias anuales de la precipitación pluvial, temperatura y evaporación potencial, basado en el análisis de datos recopilados en 5 estaciones climatológicas situadas en Leona Vicario, Puerto Morelos, Nuevo X-can, Guadalupe Victoria y Cozumel para un período de 15 años. Así la precipitación media anual es de 1,226 mm, lo que representa un volumen de precipitación anual promedio de 5,676 Mm³, para el área de estudio.

De acuerdo a la información de precipitación media anual reportada por Durón (op cit. 1983), la estación climatológica Leona Vicario (Fig. 2.5), determinó para la región de estudio que la época de lluvias inicia durante el mes de mayo y termina en octubre, precipitando en estos meses el 74.7% del total anual, considerandose como temporada de estiaje el período que comprenden los meses de noviembre al mes de abril.

La temperatura dentro de la zona es en general homogénea, sin grandes variaciones durante el año, aunque se puede apreciar que los meses de abril a octubre se consideran como los de mayor temperatura; obteniendo un promedio anual de 24.3 grados centígrados.

La evaporación potencial está relacionada con la temperatura, por lo tanto, en los meses con mayor temperatura existe una mayor evaporación, esto es de abril a octubre. El promedio anual de este parámetro es de 1,480 mm.

Los valores medios anuales de los parámetros anteriores son menores en la porción Occidental y se incrementan hacia la costa, a excepción de la precipitación pluvial que se manifiesta en mayor cantidad (1,500 mm) en los alrededores de Nuevo X-can e Ignacio Zaragoza (ver Fig. 2.6) y disminuye en forma radial hacia el resto del área, de tal manera que en las porciones Sureste y Noreste se tienen los valores más bajos de precipitación equivalentes a 1,000 y 1,100 mm respectivamente; considerando la presencia de material altamente permeable y la ausencia de corrientes superficiales. Esta distribución de la lluvia da una idea de la ubicación de las posibles zonas de recarga del acuífero.

Respecto a la distribución de la temperatura, ésta es de 23.5 grados centígrados en la zona aledaña a Nuevo X-can e Ignacio Zaragoza y se incrementa hacia la zona costera hasta 26 grados centígrados (ver fig. 2.7).

La evaporación potencial se comporta de manera similar a la temperatura ya que existe una relación directa (ver fig. 2.8), la excepción a esta regla sucede en los alrededores de Nuevo X-can, en donde el valor de este parámetro es de 1,600 mm, mientras que la temperatura registra sus valores menores; la razón de este fenómeno radica en la elevada precipitación en esta zona y por lo tanto existe un mayor volumen expuesto a la radiación solar.

Considerando el comportamiento de los parámetros mencionados, puede anotarse que la temporada regular de estiaje se presenta de noviembre a abril, lo cual tiene un efecto sobre el comportamiento del acuífero en lo que corresponde a la carga piezométrica de los niveles de agua subterránea, y por ende en el espesor de agua dulce factible de captarse para su aprovechamiento, de igual manera, su efecto se manifiesta en la posición de la interfase salina en las zonas cercanas a la costa, ya que al ser época de menor carga hidráulica la cuffa de agua salada se interna en una franja mayor a lo largo de la costa, siendo importante el que se tomen en cuenta estas consideraciones para la determinación de las zonas factibles de explotación para el corredor turístico.

3 GEOLOGIA

3.1 MARCO GEOLOGICO REGIONAL DE LA PENINSULA DE YUCATAN

3.1.1 ESTRATIGRAFIA

El conocimiento de la geología de la Península de Yucatán se encuentra en un estado inicial ya que ha recibido por un lado poca atención de los geólogos y por otro, la densa vegetación y gran alteración de las rocas aflorantes han contribuido a la dificultad del reconocimiento geológico superficial. Los primeros reportes que se conocen fueron los estudios de HEILPEN (1881) y SAPPER (1886) (en Isphording, 1975) que intentaron describir la geología regional y estratigrafía.

SAPPER observó: "En la Península de Yucatán, las capas terciarias predominan y al parecer, de Sur a Norte vienen sucesivamente siendo más recientes hasta encontrar los depósitos costeros Post-Pliocénicos y Cuaternarios".

Esta simplificación fue aceptada por varios decenios hasta que en la década de los sesentas, se demostró (Murray, 1961) que el desarrollo geológico de la Península fue más complejo asociado a eventos estructurales.

En la mayor parte de la Península de Yucatán aflora una secuencia Cenozoica, principalmente calcárea, que no presenta deformaciones significativas y está formada por capas que conservan una posición horizontal. Las rocas más antiguas que afloran son las calizas y evaporitas del Paleoceno (Butterlin, 1960) ubicadas en la porción Sur; están rodeadas por depósitos calcáreos más recientes, de edades que oscilan entre el Oligoceno y el Reciente. Los principales ejes estructurales presentan una orientación WNW-ESE y NNE-SSW, y se asocian con la Sierrita de Ticul y el Sistema Bacalar-Río Hondo, respectivamente (Velázquez, 1985).

En la figura No. 3.1, se presenta la distribución superficial de las rocas aflorantes y la estratigrafía regional generalizada (Aguayo, 1980). A continuación se hace una descripción de las formaciones que afloran en la Península de Yucatán, que integra los resultados de los trabajos de (Lesser, 1976) y (Butterlin, 1960); además, se delimita la distribución espacial de las dos formaciones que ocurren en la superficie del área de estudio, basada en los análisis cartográficos, fotogeológicos y en las observaciones de campo realizadas en los sitios cuyas condiciones lo permitieron.

PALEOCENO (?) EOCENO NO DIFERENCIADO

Abarca un conjunto de rocas que no contienen fósiles índices, sin embargo por relaciones estratigráficas con la Formación Chichen-Itzá, indican que son de la misma edad o más antiguas, posiblemente del Paleoceno.

Son calizas compactas de micro a macrocristalinas, color amarillo a blanco, están generalmente dolomitizadas, silicificadas o simplemente recristalizadas, lo que explica que los fósiles estén ausentes o indeterminables.

Su relación estratigráfica con las Formaciones Icaiche y Chichen-Itzá, indican que por lo menos parte de las calizas en cuestión son de la misma edad que las Formaciones Icaiche y Chichen-Itzá y representan una fase lateral de ellas.

EOCENO INFERIOR

FORMACION ICAICHE (Ei)

Está formada por rocas calizas de origen lacustre, con yeso y anhídrita. Las calizas se encuentran frecuentemente dolomitizadas o silicificadas y solo la presencia de yeso las distingue de las rocas del Eoceno-Paleoceno descritas anteriormente.

Esta Formación ha sido encontrada en el centro de la región meridional, desde 20 km al Norte de Soh-Laguna hasta 30 Km al Sur de Xpujil; pero, hacia el Norte, debe extenderse por lo menos hasta Chumul en donde existen importantes yacimientos de yeso. Hacia el Sur, forma una gran parte de la cuenca septentrional de la provincia de Petén (Durón, 1983). Sobre la carretera Chetumal-Xpujil-Escárcega, su límite Oriental corresponde exactamente a las fronteras entre los Estados de Campeche y Quintana Roo (km 95). Su límite Occidental no se ha precisado al igual que su espesor.

EOCENO

FORMACION CHICHEN-ITZA

Está formada de calizas fosilíferas que presentan ligeras variaciones litológicas las que han permitido dividir las en tres miembros:

Miembro Xbacal (Ex).- Representada por calizas de color amarillo, blanco y gris, se presenta en capas de espesor delgado a mediano, a veces masivas, que pueden pasar a verdaderas margas amarillas o incluso a lutitas verdosas. Estas rocas forman pliegues, con echados que alcanzan 20 grados o más en oposición a los otros miembros de la Formación.

Este miembro Xbacal, aflora al Norte y al Oeste de Escárcega, Campeche. La localidad tipo corresponde a los afloramientos del km 28.5 de la carretera Champoton-Escárcega en donde la microfauna es rica. Su espesor debe llegar a varios cientos de metros.

Miembro Piste (EP).- Representado por calizas blancas o amarillentas, a veces masivas, los echados son nulos o muy débiles (5 a 10 grados) y de orientación variable excepto en el Estado de Campeche en donde las calizas están plegadas en anticlinales, dispuestos regularmente, cuyos ejes tienen una dirección dominante NNW-SSE. Constituye una gran parte de la región central y centro-occidental de la península. Su espesor es difícil de precisar, aunque considerando la extensión de los afloramientos, el espesor debe llegar a varios cientos de metros. La localidad tipo, es la misma que para la Formación Chichen-Itzá y se encuentra en el km 112.8 de la Carretera Mérida-Puerto Juárez, al Oeste del poblado Piste.

Miembro Chumbec (Ech).- Representada por calizas masivas, blancas y cristalinas, con aspecto de mármoles sacaroides, han sido encontradas únicamente en la región del poblado Libre Unión sobre el km 81.7 a 87.9 de la carretera Mérida-Puerto Juárez, su espesor no debe pasar de 100 m.

OLIGOCENO

Las rocas de esta edad solo se han encontrado en la porción Norte de la península, en pozos perforados, por PEMEX y aflorando en una zona ubicada al SE de la Cd. de Mérida (López R., 1969). Según L. RAMOS (1969) el Oligoceno Inferior se presenta como una calcarenita, pulverulenta, quebradiza, suave en partes, de color blanca que pasa a rosado con la presencia de caliche, mal estratificadas, sin echado real en el que solo se aprecian ondulaciones en todas direcciones, dichos bancos son de 1 a 1.5m de espesor y su contenido fraunístico es Eulepidina sp., Nummulitides sp. y Biloculina sp.

El Oligoceno Superior corresponde a una parte de los materiales que localmente se llama "conchuda" precisamente por la abundancia de testas y moldes de moluscos, principalmente bivalvos más o menos bien conservados. Constituye una caliza y calcarenitas pulverulentas, coquinoide, con abundantes restos de moluscos y briozoarios, que subyace a la caliza superficial alterada.

Solo los pozos Yucatán No. 6, Sacapuc No. 1 y Chicxulub No. 1, han atravesado el Oligoceno en la porción Norte de la península, donde se tiene un espesor promedio de 270 m (López R. 1979). Los pozos que se localizan en la porción Noroeste no reportan la presencia de rocas de esta edad y en el borde Occidental de la península, en los pozos Ixin 1, Kukulcan 1, Chac 1, Akal 3 y Abkatun 1A, (Figura No. 3.5) el Mioceno descansa en discordancia sobre el Eoceno (Plummer, 1980).

De acuerdo con estudios paleontológicos realizados, inéditos por PEMEX (J.C. de SANSORES 1966 y O. LOPEZ GOMEZ 1972, op. cit. 1979) ha habido algunos problemas para situar la posición del Oligoceno, que ha cambiado en algunos aspectos; queda en duda la posición estratigráfica de estas capas en el SE de Mérida.

MIOCENO SUPERIOR - PLEISTOCENO

FORMACION BACALAR (mb)

Corresponde a calizas margosas, blancas y amarillentas, poco compactas; hacia las partes inferiores pasan a margas donde en ocasiones, se encuentran finas capas de yesos.

Esta formación aflora en la parte SE del Estado de Quintana Roo, formando yacimientos discontinuos. La localidad tipo se ubica sobre el km 41 de la carretera Chetumal-Carrillo Puerto, al norte de Bacalar y se desconoce su espesor.

FORMACION ESTERO FRANCO (Mef)

Constituida por calizas y dolomitas amarillentas, cristalinas, en capas regulares, a menudo delgadas de 5 a 10 cm de espesor con nódulos de calcita, de textura sacaróide. En el km 21 de la carretera Chetumal-Xpujil, se encuentran intensamente plegadas con un echado máximo de 67 grados.

Estas calizas forman la mayor parte de la orilla izquierda del Río Hondo y afloran sobre la carretera Chetumal-Escárcega, entre los km 20.5 y 40.

La Formación Estero Franco parece cubrir a la Formación Bacalar y su edad debería estar comprendida entre el Mioceno Superior y Pleistoceno; probablemente sea un equivalente lateral, de toda o parte de la Formación Carrillo Puerto. Sin embargo, hay que hacer notar que las calizas que se encuentran en su prolongación estructural en Belice, pertenecen al Eoceno. Su espesor debe ser de alrededor de 100 m.

Referente a la Geología del subsuelo, las secuencias reconocidas en las perforaciones de PEMEX están constituidas principalmente por anhidritas, calizas y dolomias cretácicas con algunos materiales piroclásticos (Figura No. 3.2).

El basamento ha sido alcanzado por cinco pozos exploratorios de PEMEX (1985), cuatro de ellos en la Plataforma de Yucatán, teniéndose su ubicación de manera regional, por ser información interna de PEMEX (Figura No. 3.3).

-Pozo Yucatán No. 1:

Perforación a una profundidad de 3,200m, corta al basamento conformado por esquistos que alojan cuerpos de roca ríalticos (Figura No. 3.2). Se le determinó una edad radiométrica por el método de Rb/Sr de 410 m.a. (Silúrico) y un posible evento metamórfico de 330 m.a. (Misisípico).

-Pozo Yucatán No. 4:

Perforación que cortó por debajo de la Formación Todos Santos, ocho metros de una roca que litológicamente fue clasificada como cuarcita, de color gris claro, muy dura, compacta y cuya edad no fue determinada (Figura No. 3.2).

-Pozo Cobo No. 301:

Localizado en el borde occidental de la Plataforma de Yucatán, alcanzó una profundidad de 5,620m Cortó un granito de biotita cuya edad radiométrica por el método de Rb/Sr, fue de 312+- 25 m.a. (Pensilvánico).

-Pozo Quintana Roo No. 1:

Esta perforación se localiza al Norte de la Ciudad de Chetumal y corta a una profundidad de 2,375m una roca que litológicamente fue clasificada como granodiorita; presenta una estructura masiva y de textura porfídica de grano grueso, su edad no fué reportada.

-Pozo Villa Allende No. 1:

Después de atravesar un paquete de sal, corta a una profundidad de 1,382m una roca que litológicamente fue clasificada como esquistos de cuarzo-sericita, la cuál aportó una edad radiométrica por el método de Rb/Sr de 317 m.a. (Carbonífero Tardío). Asimismo en la porción Sur de la Plataforma de Yucatán se han obtenido los siguientes datos: Pozo Basil Jones-1, a una profundidad de 1,190m se cortaron esquistos. En el Pozo Tower Hill No. 1, a una profundidad de 2,140m se cortó un granito. Como se puede observar se sabe de la existencia de rocas que litológicamente corresponden a esquistos, granitos, granodioritas, cuarcitas y rocas volcánicas efusivas, como parte del basamento en la Península de Yucatán, pero no es posible indicar una distribución general de las rocas que lo constituyen.

Se ha acuñado el término "Basamento Magnético" (More, 1974, en PEMEX, 1985) para incluir en él aquellas rocas que se pueden agrupar con base en sus propiedades sísmicas, gravimétricas y magnetométricas, conformando un basamento tectono-físico. El término se aplica en forma general al zócalo, donde descansan las rocas de carácter sedimentario.

En estudios de geofísica elaborados por PEMEX (1987) el Basamento Magnético se profundiza hacia el Norte del Macizo Granítico-Metamórfico. Con base en la configuración del Basamento Magnético en la Plataforma de Yucatán destacan tres depresiones (Figura No. 3.4).

La primera se localiza al Norte de la Ciudad de Campeche, con una orientación NW-SE, con profundidades del orden de los 9,000 mbnm. La segunda se localiza al Oriente de la Ciudad de Mérida, con una orientación NW-SE y una profundidad de 6,000 mbnm. Es de hacer notar que entre estas dos depresiones existe a profundidad un cuerpo de roca de carácter andesítico (?). Estas rocas han sido cortadas por los pozos Chicxulub-1 a 1,258m de profundidad, Sacapuc-1 a 1,415m de profundidad y el Yucatán-6 a 1,285m de profundidad; es por ello que no se ha podido precisar la profundidad del basamento magnético en dicha zona, ya que el campo magnético es alterado por este cuerpo anómalo. A cambio de ello proporciona evidencia directa de rocas andesíticas a las profundidades antes mencionadas, que podrían corresponder a eventos volcánicos de principios del Cenozoico.

La tercera depresión se ubica en la porción Noreste de la Península de Yucatán, en donde el basamento tiene una profundidad de 7,000 mbnm, con su eje principal orientado sensiblemente de Norte a Sur.

En la figura No. 3.4 se interpretan dos altos; el primero al Oriente de la Ciudad de Mérida, con una orientación NE-SW, y una profundidad mínima del orden de los 3,000 mbnm. El segundo se ubica en la porción Oriental, vecina a las costas del Caribe con una profundidad del orden de los 1,500 mbnm y una orientación NE-SW.

Por otra parte, hacia la Península de Yucatán, por medio de perforaciones profundas se cortaron a los Lechos Rojos o Formación Todos Santos; sobreyace al basamento (pozos Yucatán No. 1 y 4), estimándosele un espesor del orden de los 1,300m a nivel superficial (López, 1979) mientras que los pozos Trinitaria No. 1 y 2 reportaron en el subsuelo un espesor real del orden de los 1,000m (De Gyves, 1981); esto define con cierta reserva, situarla dentro de un rango de edad Triásico-Jurásico Superior.

La Formación Todos Santos está constituida y definida por tres miembros, siendo de carácter arcóscica la base, brechoide de tipo molásico la unidad media y areno-arcilloso-carbonoso la cima. Generalmente presenta color rojizo a pardo claro, granulometría fina a media, con interestratificaciones de areniscas conglomeráticas; ocasionalmente se observan potentes cuerpos de conglomerados, conformados por fragmentos de cuarzo y de rocas graníticas, éstos localizados principalmente en la base del paquete. Basándose en los datos anteriores se deduce que la sedimentación durante el Jurásico Medio-Superior probablemente estuvo controlada por una tectónica de bloques que conforme progresaba la distensión provocó la subsidencia de los mismos.

Durante el Cretácico Inferior se extiende la transgresión marina, se depositan principalmente carbonatos de plataforma (que hacia la Plataforma de Yucatán son evaporíticas mientras que en el Golfo de México los depósitos son de aguas profundas).

Las capas rojas del Triásico-Jurásico (López R., 1969) solo se han cortado en delgadas secuencias en los pozos anteriormente mencionados, en ambas localidades subyacen a las evaporitas cretáceas y sobreyacen a las rocas del basamento. Todos los pozos perforados en la Península de Yucatán evidencian la ausencia del Jurásico Marino, así como de Cretácico Inferior. Son pocos los pozos que han atravesado toda la secuencia cretácica existente; sin embargo, permiten caracterizarla como una secuencia calcárea evaporítica, con asociaciones de bentonita y material piroclástico en la base y hacia su cima se va haciendo más calcárea con presencia de dolomitas, aunque son muy persistentes las evaporitas. La secuencia cretácica va desde el Comancheano al Maestrichtiano.

En la Plataforma de Yucatán continúa el depósito de carbonatos y evaporitas; en la porción Noroeste la sedimentación es de calizas color blanquecino a gris claro, su consistencia es compacta; se encuentran de manera alternada, margas y lutitas, que atestiguan un ambiente de facies de mar abierto. Asimismo hacia la porciones noroeste central y borde occidental, se depositan sedimentos caracterizados por calizas de color blanquecino a pardo claro; con la presencia de alternancia de capas bentoníticas, calizas bentoníticas, dolomitas y horizontes de anhidrita, lo cual infiere un ambiente de plataforma. El tipo de sedimentación en esta área prosigue de igual forma a todo lo largo del Eoceno, denominándose Formación Pisté.

Durante esta época (Terciario) hacia la Plataforma de Yucatán, se generan depósitos que afloran hacia el Sur y Sureste de la Ciudad de Mérida, conformadas hacia la base por calcarenitas, calizas dolomíticas y calizas cretosas; la parte media de esta unidad se caracteriza por contener calizas cretosas y delgadas interestratificaciones de microcoquinas de moluscos y briozoarios, así como de calizas dolomitizadas; la parte superior está conformada por margas, lutitas e intercalaciones de calizas, esta última de ambiente de mar abierto. Se cuantificaron en el subsuelo 270m de espesor total.

En este lapso en la plataforma, pero hacia las porciones Oriental central Norte y borde Oriental se manifiesta una sedimentación de carácter predominantemente calcáreo, constituida por calizas de color blanco y pardo oscuro, con zonas cretosas y dolomitizadas en la base de esta unidad se presentan horizontes de bentonita, calcarenitas y calizas oolíticas. En conjunto a esta unidad se le denomina Formación Chichen-Itzá, formada en un ambiente de plataforma somera.

Principalmente en las rocas más viejas, (Butterlin, 1963) han reconocido una columna que varía desde el Paleoceno hasta el Cuaternario. Esta columna incluye (ver figura No. 3.1) las formaciones Chichen-Itzá e Icaiche del Paleoceno-Eoceno; las Formaciones Bacalar, Estero Franco y Carrillo Puerto del Mioceno Superior-Plioceno y las calizas de moluscos del Pleistoceno-Holoceno.

El Oligoceno no ha sido reconocido plenamente en superficie, pero fue cortado en las perforaciones exploratorias de PEMEX en los pozos Chicxulub No. 1 y Sacapuc. No. 1 en la porción Norte de la Península.

3.1.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

-Provincia de la Plataforma de Yucatán:

La península comprende a los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Se le considera como una plataforma que empezó a emerger a principios del Terciario, no presenta rasgos estructurales relevantes, prevaleciendo los echados muy suaves, prácticamente horizontales. Los rasgos estructurales más relevantes los conforman afallamiento y fracturamiento con una orientación general NE-SW y caída de bloques al SE, donde se alojan el curso del Río Hondo, la Laguna de Bacalar y la zona pantanosa baja de Chetumal y Corozal, todos ellos localizados en la porción Sur del estado de Quintana Roo. En las márgenes del Río Hondo, se observó fracturamiento manteniendo la orientación general y dando lugar a lomeríos bajos; con base en monitoreos de sísmica se consideran a las fallas de tipo regional y que se prolonga hacia la zona marina del Caribe.

Los rasgos superficiales más notables en el estado de Yucatán son al NW la estructura representada por la sierra de Ticul, que presenta un rumbo preferencial NW-SE su altura varía de 50 a 100m. con respecto a la planicie; cerca del poblado de Tekax, llega a tener elevaciones de hasta 150m con una longitud de 118 km, la cual se observa caracterizada por un auténtico escarpe de falla cuya pendiente más suave se orienta hacia el SW. Asimismo, se denota un antiguo límite de costa, hacia el NE se presenta la pendiente más fuerte del homoclinal. En la misma dirección a 16 km se tiene dolinas alineadas, por lo cual se infiere un fracturamiento paralelo a la sierra de Ticul; hacia el SW se tienen afallamientos normales los cuales se intersectan para formar un ángulo agudo con la sierra de Ticul, generándose el valle de la región de Uxmal (CRM, 1985).

Con una longitud de aproximadamente 180 km de diámetro y localizada al NW de la Ciudad de Merida, se ha definido una estructura circular (Chicxulub), la mitad de esta estructura se encuentra a nivel continente y se complementa hacia la zona de la plataforma marina. En el continente es evidenciado por estructuras de dolinas y poljes que conforman el perímetro de la estructura. Esta estructura se asocia a un impacto meteorítico de fines del Cretácico, aunque a la fecha no se ha determinado con exactitud su origen (Dietz, 1991).

Al Sureste de Campeche existe la llamada Meseta Tectónica de Zoh-Laguna, la cual denota esfuerzos verticales. Esta estructura coincide con un cuerpo de yesos de la Formación Icaiche. Se encuentra bordeado por afallamientos de tipo normal y disolución relacionada con uvalas y poljes, las rocas presentan ondulaciones y plegamientos en forma dómica.

Con base en el análisis estadístico de fracturas de la Provincia de Yucatán, por medio de la rejilla de Schmidt, se han definido dos tendencias estructurales, casi perpendiculares entre sí, la primera de rumbo N42W que caracteriza a la porción Occidental y de N380 E definida para la porción Oriental.

Provincia del Banco de Campeche:

Comprende a la Planicie Costera del Golfo en su porción Norte y Occidente de la península, limita al Norte con el mar territorial, al Occidente con la cuenca Marina de Macuspana y el pilar tectónico Reforma-Akal, en su porción Suroriental con la depresión del Canal de Yucatán en el Caribe. Esta provincia funcionó como elemento rígido soportando los esfuerzos durante la evolución tectónica del área marina, por ello no presenta rasgos estructurales importantes.

- Provincia del Canal de Yucatán:

El mar Caribe y áreas adyacentes incluyen prominentes crestas oceánicas y enormes zonas de fallas, lo cual constituye una topografía diversificada y abrupta. El elemento estructural más importante que enmarca dicha provincia es el llamado Canal de Yucatán que es una depresión abrupta cuya profundidad promedio es del orden de los 2,000 m bnm. La zona comprendida entre las cotas batimétricas de 1000m es relativamente paralela a la margen del continente, con excepción de la región cercana al Banco Chinchorro, en donde adopta una forma circular (atolón), la cual bordea a dicho banco (Del Castillo y Vivas, 1973). En dirección hacia el occidente se presentan dos crestas (descritas por Bale, 1970; en Del Castillo y Vivas, 1973) denominadas Cresta Interna y Cresta Externa; estos dos escarpes están separados por una depresión que conforma pequeñas cuencas. La Cresta Interna presenta una orientación paralela al borde continental, sin embargo, la Cresta Externa hacia la Isla de Cozumel cambia su lineamiento al NE y se extiende en dirección de la Isla de Cuba.

3.1.3. EVOLUCION GEOLOGIA

Los eventos geológicos que ocurrieron en la Península de Yucatán se reconstruyen (López R. 1979) a partir de las columnas geológicas de los pozos perforados por Petróleos Mexicanos.

Gran parte de la península era una plataforma submarina en el Paleozoico (Figura No. 3.6a, b), la cual estuvo emergida hasta el Triásico-Jurásico (Figura No. 3.6c), como lo indica la presencia en el subsuelo, de capas rojas de la Formación Todos Santos en los distintos pozos perforados.

Es a partir del Cretácico Inferior (Figura No. 3.6d) cuando se inicia el depósito de grandes masas de evaporitas en la porción Sur de la península que corresponde a la Región Norte de Guatemala; sin embargo en el resto de la península que pertenece a México y Belice, no se ha encontrado sal y tal parece que la sedimentación de las evaporitas, se inicia a partir del Aptiano- Albiano (Comancheano), prevaleciendo estas condiciones de depósito durante el Cretácico Superior en la parte media y Sur de la península y casi todo el Terciario. Es importante hacer notar que las rocas del Cretácico Superior y parte del Terciario al Norte de la península (Figura 3.6.d), son margas indicando una profundización de los mares en ese sentido.

La Península de Yucatán aparece durante el Terciario Medio y Superior como una plataforma sumergida (Figura 3.6e, f), con oscilaciones a poca profundidad y en la que predominantemente se han depositado calizas litorales y neríticas.

Al final del Plioceno y Cuaternario la península adquiere su actual forma, no obstante que siguen desarrollando alineamientos de arrecifes de tipo biostromal al Norte del Banco de Campeche, formado esencialmente de material calcáreo.

3.2 GEOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO

El conocimiento del marco geológico de la zona de estudio es fundamental para entender como se presenta el agua subterránea. Al momento de este trabajo solo se conoce, con la incertidumbre que se ha planteado en líneas anteriores, la distribución de las formaciones geológicas aflorantes; el panorama del aspecto morfológico del kárst superficial y un análisis mas detallado del arreglo geológico-estructural.

Esto último es importante ya que al ser el área de estudio un terreno kárstico, la presencia del agua subterránea se encuentra supeditada al marco geológico-estructural y por ende la interrelación con aspectos geohidrológicos como piezometría y con la geoquímica del agua del subsuelo, son los elementos de estudio para establecer la ocurrencia del agua subterránea en el corredor turístico Cancún-Tulum como se verá mas adelante.

Es adecuado destacar que por el momento, el conocimiento de la geología del subsuelo, así como del modelo hidrogeoquímico a profundidad se conocen muy parcialmente. A continuación se presentan los aspectos geológicos obtenidos de la revisión bibliográfica, del análisis de fotografías aéreas e imágenes de satélite y de la verificación de éstos, realizados durante los recorridos de campo.

3.2.1 GEOMORFOLOGIA

Algunos trabajos (Velázquez, 1986) han publicado la caracterización geomorfológica de la península basados en asociaciones de Kárst y desarrollo estructural.

Las regiones geomorfológicas son:

- I. COSTERA. Subdividida en Playas, Area de Mareas y Costera del Caribe.
- II. PLANICIE INTERIOR. Subdividida en Noroccidental, Centro Norte y Central Inferior.
- III. COLINAS Y VALLES. Comprende la Sierrita de Ticul (Area Puuc) y las Colinas de Bolonchen.
- IV. CUENCAS ESCALONADAS. Subdividada en porción Norte y porción Sur.

El área del presente estudio se encuentra localizada en la parte Norte de la Región IV y en la porción costera del caribe de la Región I. En la tabla No. 3.1 se proporciona la síntesis descriptiva y sus relaciones y en el mapa de la figura No. 3.7 se presenta su ubicación.

La porción Norte del área de estudio se ubica en la Región IV, "Cuencas Escalonadas", se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de poco relieve topográfico, corrientes superficiales embrionarias, escaso y

discontinuo desarrollo del suelo, estructuras laterales kársticas de poco crecimiento y abundantes cenotes y dolinas (ver mapa No. 2). Su desarrollo morfológico kárstico se clasifica en juvenil ligeramente maduro. Se propone (Velázquez, 1986) el origen del kárst a partir del Pleistoceno (hace aproximadamente dos millones de años) y asociado con los movimientos del nivel medio del mar.

En la porción costera del caribe de la Región I se reportan (Villagomez, 1953) eolianitas, que son remanentes de crestas de dunas pleistocénicas, en las zonas de Cancún, Puerto Juárez y en la zona arqueológica de Tulum, donde sus edificios tienen por basamento estas geoformas.

En la región citada, también se destaca la presencia del arrecife en barrera más grande de este hemisferio (Villagomez, 1953), el cual se extiende desde las costas de Belice hasta Punta Nizuc en las cercanías de Cancún. Este arrecife de coral está aproximadamente a 0.5 km de distancia de la playa, frente a las poblaciones de Puerto Morelos, Playa del Carmen y Tulum.

3.2.2 ESTRATIGRAFIA

FORMACION CARRILLO PUERTO (Pcp).

En el área de estudio afloran principalmente calizas de la Formación Carrillo Puerto. Los niveles inferiores de estas rocas están representados por coquinas de alrededor de un metro de espesor, cubiertas por coquinas compactas ricas en Peneroplidae. Pasan más arriba a calizas cada vez más impuras, a veces arcillosas, de color amarillento a rojizo. Los niveles superiores de la formación, están representados por calizas blancas, compactas, masivas, los echados observados son débiles a veces nulos y generalmente orientados hacia el NNE. La localidad tipo corresponde al Km 112 de la carretera Peto-Carrillo Puerto.

Varios pozos perforados por Petróleos Mexicanos en el norte de Yucatán han atravesado esta formación, siendo el máximo espesor encontrado a 240 m en el pozo Sacapuc No. 1. Dentro de los fósiles reconocidos en estudios paleontológicos de rocas de esta formación se pueden mencionar las siguientes especies: Archais Angulatus, Archais sp., Gypsina sp., Lythophyllum, Lytheporella, Sorites sp.

La presencia del Género Archais es lo que determina la edad Plioceno Superior, pues se le considera como fósil índice de la formación (Butterlin, 1960).

El ambiente de depósito de estas formaciones fue marino de circulación abierta, con intervenciones ocasionales de estados de mayor energía como lo sugieren las intercalaciones de partículas arenosas.

PLEISTOCENO-Holoceno

Dentro de esta edad están incluidas calizas de moluscos (Durón, 1983) y varios tipos de sedimentos provenientes de plataforma continental somera, tales como calcarenitas biógenas y calcirruditas, eolitas, eolianitas, arrecifes de coral, lodos calcáreos, así como también yeso y halita (Villagomez, 1953); distribuidas en el área estudiada en un espacio que varía de 1 km desde la línea de costa a tierra adentro, en el tramo Playa del Carmen-Tulum hasta 5.5 km en el tramo Cancún-Puerto Morelos (Plano No. 2 y Foto No. 7).

Las calizas coquiníferas son masivas de color blanco a crema que deben formar una banda de afloramientos, mas o menos amplia, a lo largo de las costas Norte y Oeste de la península, interrumpida solamente al Norte y Sur de Campeche, en donde las formaciones del Eoceno se extienden hasta el mar.

Es probable que las calizas consolidadas pertenezcan al Pleistoceno, pudiendo ser del Holoceno los niveles más elevados.

El medio ambiente de depósito de estos sedimentos fue Eólico-Costero y de Playa en el que las corrientes litorales, la acción del oleaje, las mareas y sobre todo el viento jugaron un papel muy importante (Durón, 1983). Otro factor importante fueron los eventos eustáticos que ocurrieron en las costas de Quintana Roo a fines del Pleistoceno y principios del Holoceno los cuales determinaron la extensión, tierra adentro de estos sedimentos.

Se reportan (Villagomez, 1953) eolianitas como constituyente principal de las Islas Contoy y Mujeres, así como también de Cancún. Estratificaciones cruzadas y formas remanentes de crestas de dunas se observan desplegadas, particularmente en Isla Mujeres y en los alrededores de Puerto Morelos (Foto No. 8). Las eolianitas también contienen zonas de suelo fósil formado por moldes de raíces, costras de caliche y varias especies de gasterópodos terrestres. Eolianitas recientes se están acumulando en las costas de Isla Blanca, Cancún y Puerto Juárez.

Los niveles superiores, o sea los más recientes están representados por sedimentos de playa, constituidos por arenas calcáreas finas, sueltas, de color blanco a crema, moderadas a bien clasificadas, constituidas por eolitas, fragmentos de conchas y bioclastos de corales. Una franja angosta de calcarenitas eolíticas bordea la costa desde Isla Blanca hasta Cancún y en algunos lugares, la corriente marina que fluye hacia el

Norte, a lo largo de la costa, ha arrastrado la arena oolítica (Villagomez, 1953) formando médanos submarinos.

El espesor de estos sedimentos (Durón, 1983) no alcanza más de 25m o tal vez hasta 30m en la costa acunándose hasta desaparecer a 2 Km de ésta, tierra adentro. Se destaca la presencia de depósitos no consolidados de halita y yeso, hasta de 45 cm de espesor (Villagomez, 1953). Asimismo, se observaron en la zona del Cuyo, al Norte de la península en las cercanías de la Laguna Río Lagartos, yesos en delgadas costras y dolomita y se advierte que son altas las probabilidades de que este depósito se continúe hacia el Oeste (Villagomez, 1953).

3.2.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Investigaciones realizadas en la Península de Yucatán por la New Orleans Geological Society en 1967 encontraron tres zonas principales de fracturas y fallas, que caracterizan estructuralmente a la región, estas son: Zona de Río Hondo con orientación preferencial NE-SW caracterizada por una serie de fallas normales, Sierrita de Ticul con dirección NW-SE y Fracturas Holbox presentando una tendencia N-S.

El análisis estructural del área de estudio, realizado sobre Imágenes de Satelite (Landsat) en banda No. 2 y 4 a escala 1:250,000; así como fotografías aéreas escala 1:80,000, indican que los rasgos observados tienen orientaciones preferenciales asociadas a las estructuras mencionadas de dirección NE-SW y NW- SE (Plano No. 3).

A partir del análisis estructural y de las observaciones de campo, se pone en evidencia lo siguiente:

- 1) Una tendencia NE-SW: Es el que se presenta con más intensidad en la zona; muestra mayor densidad hacia la porción Oriental del área de estudio y disminuye hacia el Poniente.

Su manifestación es mediante formas kársticas como dolinas, cenotes y uvalas principalmente, elongadas y alineadas en esta dirección; así como también llanuras de inundación de formas muy similares y paralelas a la línea de costa, las cuales presentan dimensiones muy variables hasta 60 km de longitud. Es de hacer notar, que más del 80% de las depresiones están alineadas en este sentido. Este sistema se apreció físicamente en la población de El Tintal asociado a una gran depresión.

- 2) Una orientación NW-SE: Este sistema de fracturamiento se presenta distribuido principalmente en la porción Occidental del área estudiada, específicamente entre los alrededores de las poblaciones Nuevo X-can, Tres Reyes y Punta Laguna, así como también en la zona de Coba.

Este sistema se aprecia en el km 65.3 de la carretera Caba-Nuevo X-can, en las calizas de la Formación Carrillo Puerto, como fracturas con dimensiones que van desde 1 a 20 cm de abertura, con bandas de CaCO_3 en sus paredes y rellenos de fragmentos de caliza y fósiles moderadamente conservados en sus partes centrales. Además, se observó en alguna zona un alto grado de disolución asociado a estas estructuras (Fotos 9, 10 y 11).

Se manifiesta en superficie a través de lineamientos de cenotes, lagunas y algunas depresiones con dimensiones de hasta 20 km de longitud.

De la roseta general de fracturas (Figura No. 3.8.a) y del diagrama de longitudes (Figura 3.8.b) se concluye que la familia principal es la de dirección NE-SW, donde ocurren el 77% del total de fracturas con longitudes de hasta 60 km; por el contrario, las estructuras con orientación NW-SE corresponden al 23% con longitudes de hasta 20 km. Es de destacar que el 79% de la cantidad total de fracturas observadas, tienen una longitud que varía desde 1 hasta 10 km (Figura 3.8.b).

4. HIDROGEOLOGIA

4.1 MARCO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO REGIONAL

La presencia del agua subterránea en la Península de Yucatán, está asociada y controlada por el amplio desarrollo y evolución del carst. La región de mayor carsticidad, como se ha mencionado (Tabla No. 3.1) se presenta al sur de la península, en los depósitos más antiguos constituidos por calizas y evaporitas del Paleoceno-Eoceno. Por el contrario en las porciones septentrional y oriental de la península, se encuentran calizas más jóvenes con menor desarrollo de carsticidad, lo cual evidencia una diferencia regional en las características hidrogeológicas del medio en el cual circula el agua; no obstante, en ambas se aprecia una carencia de corrientes superficiales. De esta manera, gran parte de la precipitación pluvial se evapotranspira y el resto se infiltra a través de fracturas, oquedades y conductos kársticos en las calizas y dolomías. En la figura No 4.1 se presenta la regionalización acuífera de la península (Velázquez, 1986) y en forma genérica las direcciones de flujo.

La unidad acuífera regional del norte y noreste de la península (acuífero Miocénico) (Velázquez, 1986) se caracteriza por una muy alta permeabilidad y transmisividad que permite un rápido movimiento horizontal del agua subterránea, obviamente con poca carga hidráulica y bajo gradiente hidráulico y nivel freático estable.

El agua subterránea en esta unidad acuífera, se presenta como un cuerpo o lente delgado de agua dulce, menos de 70 m de espesor tierra dentro y unos cuantos metros cerca de la línea de costa, flotando sobre un cuerpo regional de agua salina de composición cercana a la de mar.

La unidad acuífera regional al sur de la península, por el contrario presenta subdivisiones hidrogeológicas y contiene varios acuíferos colgados. Presenta también alta permeabilidad y transmisividad, su nivel freático es profundo (60 a 100 m) y estable, y en los acuíferos colgados, somero y variable (Velázquez, 1986). No se ha encontrado en los sondeos exploratorios realizados, la continuidad del cuerpo regional de agua salina de composición marina; por el contrario, la presencia de evaporitas proporciona una composición rica en sulfatos y calcio. Se encuentra limitada al parecer por discontinuidades estructurales: al Norte-Noroeste por el arco afallado de Mexcaná-Sierrita de Ticul y al Oriente, por el sistema Bacalar-Río Hondo (Velázquez, 1986).

La recarga en ambas unidades acuíferas regionales se produce de manera bastante uniforme siguiendo el patrón de la precipitación pluvial. Así,

en la unidad acuífera del norte-noreste de la península, hacia los pueblos de Leona Vicario y Coba en el estado de Quintana Roo se forma un máximo de precipitación, la que establece hacia esa región el área de recarga.

La descarga natural se efectúa a través de manantiales a lo largo de la Costa Oriental; así como por manantiales y en forma difusa en las costas Norte y Occidental.

El acuífero al sur de la península (Acuífero Eocénico según Velázquez, 1986) se descarga en forma natural a través del sistema de fallas Bacalar-Río Hondo.

4.2 MODELO HIDROGEOLOGICO DEL AREA DE ESTUDIO

En el área que nos ocupa se definen dos unidades hidrogeológicas diferenciadas por los tipos y desarrollo de discontinuidades que presentan en superficie y fundamentalmente por los procesos geoquímicos del agua que en ellas tienen lugar.

Las características del subsuelo de la región, de crucial importancia para definir las unidades hidrogeológicas, se omiten en este trabajo ya que hasta el momento no se han efectuado perforaciones exploratorias distribuidas en el área de estudio.

4.2.1 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

UNIDAD I

Esta unidad esta representada por los niveles superiores de la Formación Carrillo Puerto, caracterizados por calizas compactas y masivas, a veces arcillosas. El espesor de estos niveles se desconoce en el área de estudio, pero se reporta que en un sondeo cercano a Playa del Carmen (Duron, 1983) el espesor total de la formación es menor que 140 m.

La alta permeabilidad de esta unidad se debe, principalmente, a los sistemas de fracturamiento desarrollados preferentemente en las direcciones NE-SW y NW-SE y por la excesiva disolución que provocan y que a la vez, genera la evolución de las formas kársticas. La manifestación en superficie de ambos sistemas de fracturamiento es a través de grandes depresiones y alineamientos de cenotes y lagunas (plano No. 4), siendo considerada equivalente a la unidad acuífera regional del Noreste de la Península que contiene al acuífero Miocénico.

Esta unidad esta ampliamente distribuida en la región y, por lo tanto, presenta mayor área de exposición a la precipitación, lo que se traduce en términos de mayor recarga.

Se caracteriza por tener el nivel freático a una profundidad que varía entre 7 y 15 m y a una elevación sobre el nivel del mar de 1 a 4m. Las elevaciones y profundidades mayores se encuentran en las zonas mas alejadas de la costa y las someras en zonas más cercanas a ella.

UNIDAD II

Esta unidad incluye una secuencia de rocas denominadas como Depósitos Recientes, constituidas por calizas coquiníferas en la parte inferior y por arenas calcáreas finas, sueltas a poco compactas, de moderadas a bien clasificadas y con fragmentos de fósiles en los niveles superiores. El espesor de estos depósitos en las proximidades de Playa del Carmen (Duron, 1983) varía entre 25 y 30m.

La permeabilidad se debe a las fisuras y oquedades de disolución, formadas por la actividad química del agua y a partir de las cuales se desarrollan cavernas, cenotes y depresiones de menores dimensiones que las observadas en la unidad acuífera anterior. El fracturamiento es escaso a nulo, por lo que no es una característica hidráulica preponderante de esta unidad.

Su extensión superficial es de un área muy reducida, por lo cual no existe una recarga importante a partir del agua de lluvia; alcanza dimensiones frente a las costas de Tulum y Puerto Morelos de 1 y 10 Km respectivamente.

El nivel freático en esta unidad se encuentra a una profundidad que varía entre 0.5 y 7m y a una elevación de 0.13 a 1m sobre el nivel medio del mar.

Las características de esta unidad acuífera, la distinguen de las unidades caracterizadas regionalmente, además de contener un acuífero distinto a los definidos regionalmente.

5. HIDROGEOQUIMICA

5.1 HIDROGEOQUIMICA REGIONAL

Trabajos recientes (Velázquez, 1986) han identificado los principales procesos geoquímicos que intervienen en los acuíferos de la península (Figura No. 5.1).

-Dilución en las zonas de recarga, por infiltración directa de la precipitación pluvial.

-Disolución de minerales carbonatados y yesos a lo largo de las trayectorias de flujo.

-Mezcla con agua salada de composición oceánica, tanto a profundidad como hacia las costas.

El agua dulce subterránea en las porciones norte y oriental de la Península de Yucatán acuífero miocénico (Velázquez, 1986), es semejante a una cuña delgada que flota sobre aguas marinas. Hacia las zonas de recarga se caracteriza por bajas concentraciones iónicas, se tipifica como calcica-bicarbonatada (Lesser, 1976) que cambia paulatinamente a sódico-clorurada en las carcañas de las costas (Ver figura No. 5.2). Se encuentra ligeramente sobresaturada con respecto a calcita y poco baj saturada con respecto a dolomita. En la Tabla No 5.1 se presentan los valores promedio de las concentraciones iónicas del acuífero de la porción Norte y Noreste de la Península (Lesser, 1976). Localmente hay contaminación de desechos orgánicos y aguas residuales; sin embargo, ésta se localiza hacia los grandes centros de población. Asimismo, puntualmente se encuentran manifestaciones de agua magnesiana-bicarbonatada y calcico-sulfatada dadas por la presencia de calizas magnésicas y de yesos, respectivamente; sin embargo, solo se presentan como zonas anómalas, quizás por una baja densidad de muestreo, dado el carácter regional del estudio de Lesser (Lesser, 1976).

A profundidad se presenta en cierta medida, una evolución hidrogeoquímica similar; no obstante, la zona de dispersión se caracteriza por ser hidrogeoquímicamente inestable, al depender en gran medida de la variación temporal y espacial de la carga hidráulica (Figura 5.3). En efecto, una tormenta puede precipitar una enorme cantidad de agua que se infiltrará inmediatamente, y propiciará que el lente de agua dulce se engruese en esa área y que la interfase se profundice (Back, 1974).

Por el contrario, una concentración en la explotación del acuífero o un mal diseño de los aprovechamientos puede causar un decremento puntual de la calidad al romperse el equilibrio hidráulico del acuífero; no obstante, la gran dinámica del sistema permite una rápida recuperación de las condiciones de equilibrio lo que protege del deterioro al acuífero, sobre todo a mediano plazo, siempre y cuándo se tenga una adecuada ubicación espacial de los campos de pozos y el diseño de terminación permita una extracción instrumentalmente restringida de acuerdo al equilibrio dinámico del sistema.

Conviene destacar, de acuerdo con LESSER (1976) que el acuífero en estas porciones de la península se caracteriza por presentar la intrusión salina como un proceso reversible; es decir durante el estiaje el frente de intrusión salina avanza notablemente, en algunas zonas donde se ha medido alcanza de 8 a 10 Km tierra dentro (Lesser, 1976), por el contrario durante la temporada de lluvias el agua oceánica que ha intrusado retorna a las cercanías de la costa o se profundiza; asimismo, el espesor de agua dulce se modifica en función de la carga hidráulica.

Por otro lado, en la porción interna de la península se ha identificado (Velázquez, 1986) otro acuífero regional, acuífero eocénico en donde el principal proceso geoquímico que interviene es la disolución de minerales a lo largo de la trayectoria de flujo, asociado con enriquecimientos salinos puntuales producidos por la presencia en el subsuelo, de depósitos evaporíticos altamente solubles.

En este otro acuífero, no se ha detectado a profundidad la presencia del cuerpo de agua salada de composición oceánica que subyace al acuífero costero exterior; sin embargo, el agua se encuentra por lo general más profunda. Se carece de mediciones piezométricas confiables, por lo que el valor de la carga hidráulica se desconoce, solo puede establecerse que en los aprovechamientos existentes no se ha detectado aun el incremento de la salinidad con la profundidad.

Se conocen zonas del acuífero eocénico donde existe comunicación con el acuífero exterior (miocénico), primordialmente como zonas de descarga del primero, asociadas con un incremento notable en la concentración iónica del agua de esas regiones, como el área de Calkini en Campeche y la zona de Bacalar en Quintana Roo (Figura No. 5.4).

5.2 HIDROGEOQUIMICA DEL AREA DE ESTUDIO

La zona de interés se encuentra en la porción noreste de la Península de Yucatán, área caracterizada por contener en forma parcial una de las principales zonas de recarga del acuífero kárstico de la Planicie Yucateca. Geográficamente está caracterizada por la cercanía de la costa y geológicamente, por la presencia de fallas y fracturas que dan forma a una serie de bloques estructurales orientados preferencialmente NE-SW.

Por otro lado, se han identificado dos acuíferos; el principal lo constituyen las rocas carbonatadas fracturadas Mio-Pliocénicas de la Formación Carrillo Puerto (Butterlin, 1963), y el subordinado, ubicado hacia la zona costera lo constituyen los depósitos clásticos y calizas cuaternarias (mapa No. 4).

5.2.1 MUESTREO Y ANALISIS QUIMICOS

El muestreo de aguas se realizó en 161 aprovechamientos de la región, entre cenotes, norias y pozos, así como también en 6 descargas de agua subterránea al mar. El muestreo de norias y cenotes es representativo de las porciones superficiales del acuífero y en los pozos se obtuvieron cuando se tenía la certeza que había transcurrido más de una hora desde el inicio de su bombeo.

El agua se recolectó en un recipiente de polietileno de 1 lt. de capacidad. En el sitio, se hicieron las mediciones de conductividad eléctrica, potencial hidrógeno (pH) y alcalinidad, utilizando potenciómetro portátil marca CONDUCTRONIC modelo PC-18 para los tres primeros parámetros y los indicadores químicos de anaranjado de metilo y verde de bromocresol, en combinación con el ácido sulfúrico en concentración de 2% para el último (Tabla No. 5.2 y Fotos Nos. 12 y 13).

De entre el número total de los aprovechamientos muestreados, con base en el valor de su conductividad eléctrica y su distribución superficial en el área de estudio se escogieron 50 para su envío al laboratorio. Los análisis físico-químicos efectuados en el laboratorio incluyeron las determinaciones siguientes: Conductividad eléctrica y potencial hidrógeno a temperatura constante (25 grados centígrados), sólidos totales disueltos, contenido de cationes (calcio, magnesio y sodio), contenido de aniones (cloruros, nitratos, sulfatos y bicarbonatos), dureza total; así como la alcalinidad total y la alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos. Los resultados de los análisis físico-químicos se presentan en la tabla No. 5.3.

Para determinar la confiabilidad de los resultados del laboratorio se obtuvo el porcentaje de error de análisis para cada una de las muestras, los cuales son elevados, con valores cercanos al 30%, en las zonas costeras, principalmente en las recolectadas en el tramo Puerto Morelos-Tulum. Tales excesos en el error es debido a la influencia del agua de mar, la cual tiene en su composición elevados contenidos de elementos no determinados en este estudio como el potasio, boro, y estroncio, con valores promedio de 65 y 13 ppm respectivamente (Custodio, 1976), que enmascaran un análisis confiable.

5.3 CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA

En una región kárstica, sus características fundamentales las proporcionan los procesos hidrogeoquímicos que intervienen; así, los tipos de agua y las diferentes rocas carbonatadas juegan un papel preponderante. La metodología presentada por (BACK, 1975), es básica en la identificación de los procesos principales.

El modelo conceptual aplicado en la Península de Yucatán (Velázquez, 1986), permite caracterizar geoquímicamente las diferentes aguas subterráneas que se presentan en el área de estudio y por ende identificar y diferenciar los procesos geoquímicos que intervienen.

En la Figura No. 5.5 se presentan, para el área de estudio, los resultados de la aplicación del modelo. Se parte del diagrama de Piper y se identifican dos principales trayectorias de reacción: la primera (R-M), de enriquecimiento iónico por mezcla de agua de reciente infiltración o recarga (R) con agua de composición oceánica (M); la segunda (R-D), de enriquecimiento, sobre todo de calcita y yeso y dada por la recta que une las muestras representativas de aguas de recarga o reciente infiltración (R) con las muestras representativas de agua de recarga de acuíferos; es decir con alta salinidad debido a la disolución de minerales a lo largo de las trayectorias de flujo.

Asimismo, en la figura anterior puede observarse la caracterización geoquímica en cuatro grandes grupos: el primero de aguas bicarbonatadas-calcicas (grupo 1A) representativas de aguas de reciente infiltración, en donde el proceso de dilución debe prevalecer. Este mismo grupo de muestras parece dividirse o englobar a una serie de muestras representativas (grupo 1B) y alojadas sobre la línea R-D sin dejar de estar estas vinculadas con bajas concentraciones iónicas, no propiamente de aguas de descarga, mas bien, puede decirse que para ellos el proceso de disolución es incipiente; al segundo de los grupos se representa para aquellas muestras que se alojan en la porción media de la recta R-M y que representa las aguas en donde el proceso de mezcla entre agua dulce y agua de mar prevalece; encima de este grupo y fuera de la línea de reacción se agrupan las muestras del tercer grupo, de aguas mixtas en donde los procesos de mezcla y dilución se enmascaran; por último el cuarto de ellos, grupo de aguas sódico-clorurados con marcada influencia de agua de mar.

A continuación se comentan con más detalle los grupos mencionados:

El primero ubicado en la porción izquierda del rombo, asociado con aguas bicarbonatadas-cálcicas representativas de áreas de recarga, el cual puede dividirse en dos: la zona A ubicada hacia las áreas de Nuevo Valladolid y Central Vallarta es característica de aguas de muy reciente infiltración donde el proceso que prevalece es el de dilución (muestras 74, 75, 76, 90 y 91); la zona B entre Nuevo X-can, El Tintal y Tres Reyes es característica de áreas de incipiente evolución a lo largo de la trayectoria de flujo, donde el proceso principal es la disolución (muestras 40, 41, 43 y 71).

El segundo grupo hacia la porción media del rombo, alojada sobre la línea recta que une el área de recarga con el área de agua de mar, es típica de aguas de mezcla; se ubican hacia la zona cercana a Cancún y el proceso involucrado es de mezcla incipiente con aguas oceánicas (muestra 1, 6 y 78).

El tercer grupo, incluye diversos sitios del área de estudio alejados del área física de máxima precipitación pluvial. Así se tienen sitios cercanos a la línea de costa y sobre todo, agrupa las muestras de la porción Sur y Noreste de la zona de estudio, las cuales son representativas de aguas mixtas. Los procesos involucrados son tanto el de mezcla como el de disolución.

El último grupo hacia la porción derecha del rombo, pertenece a las aguas sódico-cloruradas representativas de áreas con influencia de agua oceánica, localizadas en las zonas costeras (muestras 9, 46, 48, 54, y 84).

Por otro lado, con el fin de apreciar gráficamente la distribución de los procesos geoquímicos que prevalecen, se elaboró un plano del área de estudio (Plano No. 5) donde se incluyen los polígonos de Stiff, los cuales se construyen a partir de los porcentajes de miliequivalentes de los iones principales y adquieren formas características que permiten realizar comparaciones entre ellos, proporcionando una idea general sobre los tipos de agua asociados a zonas específicas.

El polígono resultante de cada aprovechamiento se compara con los polígonos típicos de las aguas de lluvia, dulce del subsuelo y de mar, que también se incluyen en el plano citado, obteniéndose las relaciones existentes.

Se observa que en la mayor parte de la región donde están involucrados las localidades de Coba, Nuevo X-can, Leona Vicario y Puerto Morelos, los diagramas de Stiff de las aguas respectivas se asemejan a los diagramas típicos de las aguas de lluvia y subterránea dulce, por lo cual se corrobora que hacia esa zona se desarrollan los procesos químicos de dilución y disolución asociados a áreas de recarga y de trayectoria de flujo.

En la región que incluye los tramos de Macario Gómez a Tulum y de la zona costera, de Tulum a las cercanías de Puerto Morelos, los polígonos de Stiff guardan una gran similitud con el polígono típico del agua de mar, lo cual indica que se comprueba la existencia de una mezcla, hacia esa zona, entre el agua subterránea dulce y el agua salada del océano.

Los polígonos asociados a las aguas de las cercanías de Cancún, presentan una combinación de formas relacionada con los polígonos típicos del agua de mar y del agua subterránea, los cuales corroboran los resultados obtenidos a partir del diagrama de Piper para esta zona: una mezcla incipiente de agua dulce con agua oceánica.

Una forma adicional de evaluar los efectos relativos de los principales procesos geoquímicos que intervienen (dilución, mezcla y disolución), es determinar cual de estos caracteres químicos prevalece. Para tal efecto se ha preparado una gráfica basada en la relación propuesta por C.T. RIGTHMIRE, 1974 en (Back, 1975) que muestra la relación entre el cociente SO_4/Cl y el contenido de sulfatos. Estos elementos no se presentan comúnmente en la constitución mineralógica de las rocas carbonatadas, así de presentarse valores altos, tanto en la concentración de sulfatos como del cociente SO_4/Cl representarían ambientes en los cuales el sulfato es derivado de la disolución de yeso.

Las muestras con valores bajos del cociente SO_4/Cl (menor a 0.2) y alto contenido de sulfatos (mayor que 2000 ppm) representarían influencia de agua oceánica. Por último, valores bajos en ambos parámetros indicarían agua de reciente infiltración.

En la gráfica de la Figura No. 5.6 se han dibujado a partir de los valores bajos (agua de reciente infiltración) dos líneas que representan las trayectorias de evolución: la primera, dirigida hacia la porción superior representa la tendencia de disolución del yeso y la segunda, hacia la porción inferior derecha representa la tendencia de mezcla con agua de mar. En esta forma pueden diferenciarse los procesos geoquímicos que intervienen:

DILUCION. Queda identificado por las muestras Nos. 90, 74, 99, 75 y 100 ubicadas dentro del polígono que forman las poblaciones de Central Vallarta, Heroe de Nacozari y Agua Azul. Donde la concentración de sulfatos es baja (alrededor de 10 ppm) y el cociente de SO_4/Cl no excede 0.2.

DISOLUCION. Partiendo de esta porción en la gráfica se ha dibujado una línea auxiliar (A) paralela a la tendencia de disolución que aloja las muestras ubicadas en la periferia de la región mencionada líneas arriba, muestras Nos. 42, 71, 77, 64, 38 y 62. Que indicarían que hacia esas direcciones se presenta la disolución de calcita y representaría el sentido del flujo subterráneo.

Sobre esta línea auxiliar se han agrupado una serie de muestras representativas del acuífero costero en depósitos cuaternarios (muestras Nos. 14, 28, 6 y 36) caracterizados por concentraciones moderadas de sulfatos y cociente SO_4/Cl entre 0.6 y 1.0. Es decir, aguas que por la cercanía de la costa reciben influencia de la descarga del acuífero calizo o en su caso aportes de agua oceánica.

MEZCLA: Las muestras Nos. 79, 10, 60, 27, 50 y 32 indican que han recibido los sulfatos de la mezcla de agua de reciente infiltración con agua de mar ya que alojan sobre la línea que une estos dos procesos.

A partir de esta última porción de la gráfica se ha dibujado la segunda línea auxiliar (B), también paralela a la tendencia de disolución y que agrupa a la mayoría de las muestras representativas de la zona costera entre Playa del Carmen y Tulum (muestras Nos. 54, 58, 46, 57 y 80). Indican la presencia de yeso e influencia marcada de agua oceánica, aguas salobres típicas de la zona de transición entre el cuerpo de agua dulce y el salado que le subyace. Caracterizadas algunas de ellas, como se verá más adelante, por estar bajosaturadas con respecto a calcita.

Por último, se aprecian hacia la porción derecha de la gráfica las muestras representativas de agua de mar, tomadas en el cenote Chemuyil a profundidades mayores de 20 metros, así como la representativa de la Caleta Xel-Ha. La posible evolución geoquímica a profundidad, se muestra en las tendencias que presentan las muestras de los dos únicos aprovechamientos, (hasta el momento analizados); el cenote Chemuyil, muestra No. 9 y el cenote Agua Azúl, Muestra No. 74 (Figura No. 5.7).

Es evidente la evolución del agua en el cenote Chemuyil (cercano a la línea de costa), al inicio se trata de un agua típica de mezcla entre aguas de reciente infiltración y agua de mar, la cual evoluciona con la tendencia identificada de aguas salobres características de la zona de dispersión (para este cenote desde los 5 a los 15 metros bajo el N.E.), finalmente a partir de los 20 metros bajo el N.E. la tendencia evoluciona hacia la constitución típica del agua de mar.

Por el contrario, en el cenote Agua Azul (cenote a 40 Km de la costa) la evolución es de un agua de reciente infiltración hacia una constante trayectoria de disolución, característica de zonas de dispersión.

Resultados adicionales a los procesos de dilución y mezcla están dados en la gráfica de la Figura No. 5.6, donde el cociente de Mg/Ca es relacionado con el contenido de cloruros. Los valores bajos del cociente indican adición de calcio de la disolución de calcita. Las muestras muy por encima de la línea de mezcla con agua de mar, indican que el magnesio proviene de una fuente más rica que el agua de mar, quizás las dolomías o calizas magnesianas que contiene la Formación Carrillo Puerto. Las muestras por abajo de la línea están enriquecidas de calcio, esto resulta de la presencia de agua salobre y por último, las muestras que se alojan a lo largo de la línea indican mezcla con agua de mar.

De la misma manera que en la gráfica anterior se ha marcado la evolución geoquímica del agua con la profundidad; confirmando las observaciones obtenidas para los cenotes analizados:

- 1) El agua del acuífero en las cercanías de la costa es caracterizada por agua de mezcla y evoluciona rápidamente a un agua con marcada composición oceánica.
- 2) En cambio el agua del acuífero tierra adentro presenta dos posibilidades.
 - a) De existir agua de composición marina a profundidad, ésta se encuentra más lejos por lo que no se manifiesta (por lo menos en ese cenote) su influencia.
 - b) No se encuentra agua marina y la tendencia es a un proceso de disolución de materiales evaporíticos altamente solubles.

5.4 CONCENTRACIONES IONICAS

SOLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD)

La cantidad de sales en solución es producto, entre otras cosas, de los procesos geoquímicos que prevalecen, las bajas concentraciones estarán en las muestras representativas de aguas de reciente infiltración, incrementándose la concentración hacia donde se establezca el sentido del flujo subterráneo, hasta llegar a los valores máximos en las zonas de descarga; sin embargo, en el área de estudio estas zonas coinciden o se ven enmascaradas con la presencia del cuerpo de agua oceánica y por lo general se encuentran hacia las zonas costeras, por lo que es de esperar en esas porciones un incremento en la salinidad.

El valor de los sólidos totales disueltos (STD) en el área de estudio varía entre 150 y 3750 mg/l con un promedio de 916 mg/l y con un coeficiente de variación del 86% como se muestra en la figura No. 5.9 que presenta el histograma de concentración de STD; donde además se puede observar que en un rango no mayor a los 1,000 mg/l se concentran el 75% de las muestras; aunque entre los 400 y 800 mg/l se agrupan el 50% de éstas. Asimismo, entre los 1,000 y 1,200 mg/l corresponde solo el 20% y los mayores de 3000 mg/l apenas constituyen el 5%.

Es notoria la presencia de valores bajos de STD entre las poblaciones de Ignacio Zaragoza-Naranjal-Nuevo Valladolid (menores a 500 mg/l), así como entre las muestras Nos. 91, 90 y 28 cercanas a Cancún. La zona de Ignacio Zaragoza-nuevo Valladolid coincide con el área de mayor precipitación o principal área de recarga.

Hacia la porción sur de la zona de estudio en las inmediaciones de Tulum, los valores de STD se incrementan notablemente y no se comportan como una franja paralela a la línea de costa de valores altos, como sucede en el resto del área, donde la degradación de la calidad del agua se va incrementando conforme se aproxima a la línea de costa.

Con el fin de representar más objetiva y ampliamente el patrón de distribución del contenido salino en el área de estudio, se apoyó en la configuración de la conductividad eléctrica, dado que el número de muestras con determinación de este parámetro es superior al número de muestras de laboratorio, ya que ésta fue tomada durante los recorridos del censo como una actividad adicional.

Antes de comentar la configuración que se preparó, es adecuado mencionar que el análisis de correlación que se realizó entre estos dos parámetros (S.T.D. y C.E.), arrojó los siguientes resultados los cuales se presentan en la tabla No. 5.4, en la cual se aprecia que el valor del coeficiente de correlación obtenido es $r = 0.91$, con una pendiente de 0.73 y error estandar de apenas el 3%.

En la gráfica de la figura No. 5.10 se presenta el ajuste mencionado, observándose que hacia los valores menores que 2,000 mg/l (95% de los datos) se tiene el mejor ajuste.

5.5 CONFIGURACION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

La conductividad eléctrica del agua tiene relación directa con su salinidad, es decir, mientras mayor cantidad de sales tenga en solución más elevado será el valor de este parámetro. Así, se tiene que los valores en el área de estudio son variables; en zonas alejadas de la costa se registra un promedio de 923 $\mu\text{mhos/cm}$, con mínimos menores de 500 $\mu\text{mhos/cm}$ y en zonas cercanas a la costa se tiene un promedio de 2,516 $\mu\text{mhos/cm}$ con valores máximos de 7,100 $\mu\text{mhos/cm}$.

Con el fin de dar una idea de la distribución espacial de la conductividad eléctrica en el área de estudio se realizó una configuración, la cual se muestra en el plano No. 6; donde se observa que los valores más bajos coinciden con aguas de reciente infiltración, asociados a las porciones de El Tintal y Central Vallarta y se incrementan hacia donde se establece el sentido de flujo subterráneo, de tal manera que en la zona sur de la costa, en el tramo Playa del Carmen-Tulum, se registran las curvas de mayor valor, principalmente en la zona comprendida entre Puerto Aventuras y Akumal incluida dentro de la curva de valor 5000 $\mu\text{mhos/cm}$. Por el contrario, en las zonas aledañas a Puerto Morelos y Cancún están distribuidas las curvas de 800 y 1,000 $\mu\text{mhos/cm}$.

Se sabe que el sentido de flujo subterráneo es posible obtenerlo indirectamente a partir de la configuración de la conductividad eléctrica; así, desde el área de El Tintal podría establecerse un flujo hacia Nuevo X-can, Coba y la zona costera y a partir de la porción de Central Vallarta, el movimiento lateral del agua subterránea podría ser exclusivamente hacia la costa.

Por otro lado, se recolectaron muestras a profundidad en dos cenotes de la región, localizados uno de ellos en el poblado de Agua Azul y el otro en las carcanías de la Playa Chemuyil denominado este último para fines prácticos "Cenote Chemuyil". Los resultados de las determinaciones químicas se muestran en la Tabla No. 5.5. En ella se observa un incremento de la conductividad eléctrica a medida que aumenta la profundidad.

Es importante destacar que en el Cenote Chemuyil, entre las profundidades de 27 y 28 m medidos a partir de la superficie del terreno, se aprecia un contraste notable del valor de la conductividad eléctrica (de 2720 a 20,000 $\mu\text{mhos/cm}$).

CATIONES

CALCIO (Ca)

El ión calcio es el principal constituyente en la mayoría de los acuíferos de agua dulce, forma sales de moderadamente a muy solubles. Su concentración, por lo general varía entre 10 y 250 ppm y en agua de mar alcanza los 400 ppm (CUSTODIO-LLAMAS, 1976). Este ión se encuentra frecuentemente en estado de saturación y su estabilidad en solución depende del equilibrio $\text{CO}_2\text{-HCO}_3\text{-CO}_2$.

Los fenómenos de intercambio iónico afectan considerablemente la concentración del calcio; son comunes los intercambios de calcio por sodio, siendo menos frecuentes en sentido inverso; aunque de darse estos, son por lo general en acuíferos costeros afectados por intrusión salina.

En el área de estudio su concentración promedio es de 93 mg/l y varía de 27 a 197 mg/l. En la figura No. 5.11.a se presenta la distribución de los valores encontrados, en donde se aprecia, entre otras cosas, que la mayoría de las concentraciones se agrupan entre los 60 y 110 mg/l. Se destaca, de acuerdo a la caracterización hidrogeoquímica realizada, que las bajas concentraciones son representativas del acuífero subordinado en los depósitos cuaternarios cercanos a la costa, muestras números 85, 36, 28, 14 y 6. Los valores de moderada concentración, entre 70 y 100 mg/l, se encuentran asociados al área de recarga del acuífero principal (Área de Central Vallarta-El Tintal), muestras números 41, 43, 68, 71, 74, 75, 76, 90, 91 y 100. Las altas concentraciones se asocian hacia una aparente trayectoria de flujo a la zona de Coba, muestras números 62, 63, 64 y 65, y hacia la costa, muestras números 99 y 111. Por último las concentraciones mayores se ubican en aprovechamientos representativos de la zona costera en donde la mezcla con agua oceánica es evidente, muestras números 30, 48, 84 y 59.

MAGNESIO (Mg)

A menudo se piensa que el comportamiento del ión magnesio es muy similar al ión calcio (Hem, 1970); sin embargo, el comportamiento del Mg es substancialmente diferente, ya que el tamaño más pequeño de sus iones le confiere una densidad de carga más fuerte y una mayor atracción de las moléculas de agua, lo que produce un efecto de hidratación mucho más grande para el Mg que para los iones (más grandes) del sodio y calcio.

Por lo general es más soluble y algo más difícil de precipitar que el Ca. Sus concentraciones en agua dulce varían desde 1 y 100 ppm y en agua de mar promedia 1,200 ppm.

En el área de estudio su concentración promedio es de 36 mg/l y varía desde 3 a 123 mg/l. En forma similar al ión calcio, la variación de su concentración sigue el mismo patrón definido con anterioridad; sin embargo los valores bajos (7-40 mg/l) concentran el 75% de los aprovechamientos muestreados (Figura No. 5.11.b), por lo que no es muy clara su definición quedando agrupadas las muestras del acuífero en rocas cuaternarias como las provenientes del acuífero en calizas del Plioceno. No obstante, los valores grandes en concentración de este ión manifiestan la influencia del agua oceánica.

SODIO (Na)

El ión sodio es el miembro más abundante del grupo de los metales alcalinos. Cuando es llevado en solución, tiende a permanecer en ese estado ya que no hay reacciones que lo precipiten por su alto producto de solubilidad.

El contenido de sodio en aguas naturales presenta un amplio rango, desde 1 hasta 150 ppm en aguas dulces, el agua de mar tiene alrededor de 10,000 ppm.

En el área de estudio, su concentración promedio es de 150 mg/l y varía desde 17 a 1518 mg/l presentándose este valor máximo en el área de Akumal; sin embargo es el ión que presenta uno de los coeficiente de variación más grande; 162% (ver tabla No. 5.3.) Por otro lado, el 63% de las muestras se concentra entre el rango de 20 a 120 mg/l, ver Figura No. 5.12a.

En forma similar a los cationes mencionados, su patrón de distribución sigue, en parte, la premisa anterior, concentraciones altas de aquellas muestras con influencia de agua oceánica. Sin embargo, las concentraciones bajas corresponden a las muestras representativas del acuífero en calizas y las moderadas (60-120 mg/l) al acuífero en depósitos cuaternarios, esta variación obedece a la cercanía de la costa de este acuífero.

ANIONES

BICARBONATOS (HCO₃)

Estos iones comunican alcalinidad al agua natural, no son oxidables ni reducibles, su concentración generalmente es mantenida dentro de un rango moderado por los efectos del equilibrio de los carbonatos. Varía entre 50 y 350 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a veces hasta 800 ppm; el agua de mar tiene solo 100 ppm. El pH juega un papel primordial en su concentración, en aguas con pH entre 4.5 y 8.3 predominan los bicarbonatos; así a un pH de 6.0 el 18% corresponde a H₂CO₃ y el restante 82% a bicarbonatos (HCO₃).

En el área de estudio su concentración varía desde 113 a 423 mg/l con un promedio de 285 mg/l, es el ión que presenta el menor coeficiente de variación con apenas un 25% lo que es indicativo de su uniformidad. En el rango de 220 a 360 Mg/l se concentra el 76% de las muestras analizadas como se muestra en la Figura No. 5.12.b.

En esta misma figura se aprecia la diferenciación entre las muestras del acuífero en depósitos cuaternarios con bajas concentraciones (muestras 6, 14 y 28), y las muestras del acuífero en calizas en sus áreas de descarga con las concentraciones mayores (muestra 60 y 111).

CLORUROS (Cl)

Sales por lo general muy solubles, estables en disolución y difíciles de precipitar. Su concentración varía de 10 a 250 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar valores hasta varios miles de ppm. En el agua de mar tiene alrededor de 18,000 y 21,000 ppm.

En el área de estudio su concentración varía desde 7 a 1,000 mg/l con un promedio de 226 mg/l; sin embargo su coeficiente de variación es ligeramente mayor al 100%. En un rango de concentración no mayor a 200 mg/l se incluyen el 67% de las muestras como se aprecia en la Figura No. 5.13.a. En ella, también se destaca que los valores mayores son representativos de muestras con influencia de agua oceánica, los valores moderados, cercanos a 200 mg/l pertenecen al acuífero en calizas en sus áreas de mayor trayectoria del flujo y los valores bajos, se asocian a las muestras del acuífero en depósitos cuaternarios.

SULFATOS (SO4)

Sales moderadamente solubles a muy solubles, en medios reductores puede sufrir reducción bacteriana a sulfuro. Su concentración varía desde 2 a 150 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar hasta 5000 ppm en aguas salinas si existe calcio y hasta 200,000 si esta asociado a magnesio y sodio en ciertas salmueras. El agua de mar contiene alrededor de 3000 ppm.

Este ión es el que presenta el máximo coeficiente de variación, cerca del 180% y por ende su rango de concentración es el más amplio de 5 a 1,832 mg/l con un promedio de 190 mg/l. En la figura No. 5.13.b que presenta el histograma de la concentración de este ión, se aprecia que en un rango no mayor a 40 mg/l se concentran el 53% quedando los valores mayores asociados a las muestras con influencia de agua oceánica y aquellas representativas del acuífero en depósitos cuaternarios.

NITRATOS (NO₃)

Son sales muy solubles y por lo tanto difícilmente precipitables. La mayoría de los compuestos nitrogenados pasan a NO₃ en medio oxidante (CUSTODIO-LLAMAS, 1976).

En general, el agua subterránea normal tiene entre 0.1 y 10 ppm, pero en aguas contaminadas la concentración puede llegar hasta 200 ppm (CUSTODIO-LLAMAS, op. cit.). El agua de mar tiene alrededor de 1 ppm o menos.

En la mayor parte del área de estudio, el valor promedio de NO₃ es de 2 ppm. Sin embargo, en las poblaciones de Macario Gómez (muestra No. 60) y Tulum (muestra No. 58) se registran valores elevados e iguales a 21.5 y 34.5 respectivamente (Tabla No. 5.3), posiblemente asociados a una contaminación orgánica, a reserva de corroborarlo con análisis bacteriológicos.

5.6 RELACIONES IONICAS

5.6.1 RELACION $rCl/rHCO_3$

Relación de interés para seguir el proceso de concentración en sales en el sentido del flujo subterráneo; no obstante, se utiliza como el principal indicador para caracterizar la intrusión de agua de mar ya que en aguas continentales tiene normalmente un valor entre 0.1 y 5 y en el agua de mar varía entre 20 y 50.

En el presente estudio se preparo la configuración de esta relación que se muestra en el plano No. 7. En el se observa que la relación sigue el patrón de distribución esperado partiendo del área central con los valores mínimos, menores a 0.5, incrementandose hacia la costa en el sentido del flujo y alcanzando valores entre 4 y 13 en aquellas zonas donde la influencia de agua oceánica es importante.

El área de valores mínimos corresponde a la zona entre las poblaciones de El Tintal y Central Vallarta que corresponde, de acuerdo a la caracterización realizada, con la zona de influencia con aguas bicarbonatadas-calcicas típicas de áreas de reciente infiltración.

Hacia las costas, zonas donde se espera la influencia del agua oceánica ya sea por la cercanía del agua de mar o por el adelgazamiento en profundidad del cuerpo de agua dulce, es donde se manifiestan los valores máximos. Destaca la zona costera entre Playa del Carmen y Akumal donde se aprecia una franja que se interna hacia el continente con valores mayores de 2 con un máximo de 5.43. Si bien, en el sentido estricto los valores alcanzados por esta relación indican solamente una moderada influencia del agua de mar; habra de mencionarse, por otro lado, que el muestreo se llevó a cabo durante la parte final de la temporada de lluvias por lo que sería recomendable un control hidrogeoquímico más amplio, sobre todo, que considerara el período de estiaje (meses de marzo y abril).

No obstante puede considerarse, con las reservas del caso que las áreas donde el valor de esta relación sobrepase las 2 unidades, representan influencia directa por agua oceánica y en todo caso, la traza en el plano de este valor representaría, dadas las condiciones del muestreo, el límite máximo de presencia de agua de mar.

La zona de máximos valores de esta relación, mayores de 5 se ubica hacia las inmediaciones de Tulum, en donde no hay duda que se trata de agua con mezcla de agua de mar.

Conviene destacar por último, que el patrón de distribución de esta relación se asemeja en gran medida al patrón obtenido en la configuración de elevaciones del nivel estático, por lo que es de gran utilidad para corroborar las influencias que se obtengan en ese sentido.

5.6.2 RELACION rMg/rCa

En aguas continentales varía entre 0.3 y 1.5; los valores próximos a la unidad indican la posible presencia de terrenos dolomíticos; sin embargo, cuando se produce una precipitación de $CaCO_3$ en un agua aumenta la relación de rMg/rCa sin que ello indique nada de los terrenos atravesados. Una relación elevada, cercana a 5 puede indicar que las aguas circulan por terrenos de formación marina o que han sufrido mezcla con el agua de mar.

El patrón de distribución de esta relación en el área de estudio se presenta muy uniforme, (plano No.8) sobre todo en lo que respecta a los valores menores a 0.5; los valores cercanos a la unidad y mayores que ésta se ubican hacia las costas, principalmente entre Puerto Morelos y Akumal. Los máximos valores se presentan en las inmediaciones de Xcaret con 2.54, puede esperarse hacia esta área influencia con agua de mar. Dada la uniformidad de esta relación, su utilidad es mínima para la zona de estudio.

5.7 CALIDAD DEL AGUA

Las aguas subterráneas y superficiales que son utilizadas para satisfacer las necesidades de agua potable de zonas urbanas, así como la que se destina a la agricultura, ganadería e industria, necesita cumplir con ciertos requisitos respecto a su contenido de elementos químicos, a sus propiedades físicas y a la presencia de materia orgánica.

Para conocer la calidad del agua para uso potable, se comparo los resultados de análisis químicos, con las normas de calidad o límites máximos permisibles publicados en 1953 en el Reglamento Federal de la Secretaría de Salubridad y Asistencia: Sobre Obras de Provisión de Agua Potable:

CARACTERISTICAS FISICAS	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Turbiedad	10 (Escala de Silice)
Color	20 (Escala Platino-Cobalto)
Sabor	Agradable
Olor	Inodora
pH	6.0 a 8.0

CARACTERISTICAS QUIMICAS	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE EN ppm
Nitrógeno amoniacal	0.50
Nitrógeno proteico	0.10
Nitrógeno de nitratos	5.00
Oxígeno consumido (O)	1.00
Sólidos totales disueltos (STD)	1.000
Alcalinidad total (CaCO ₃)	400
Dureza total	300
Cloruros (Cl)	250
Sulfatos (SO ₄)	250
Magnesio (Mg)	125
Zinc (Zn)	15
Cobre (Cu)	3
Fluoruros (F)	1.50
Hierro (Fe)	0.30
Manganeso (Mn)	0.30
Arsénico (As)	0.05
Selenio (Se)	0.05
Cromo (Cr)	0.05
Compuestos fenólicos (Fenol)	0.001
Picno (Pb)	0.01
Cloro libre en aguas cloradas (no menos de)	0.20

CARACTERISTICAS BIOLÓGICAS	NUMERO MAXIMO PERMISIBLE
Organismos de los grupos coli y coliformes	20
Colonias bacterianas por centímetro cúbico de muestra.	200

En el área de estudio, el 80% de las muestras analizadas sobrepasan al menos una norma de calidad, principalmente en STD y Cloruros, los cuales se encuentran sobre el límite máximo permisible en el 24% de las muestras analizadas, siguiendole en orden de importancia los sulfatos con valores hasta de 4288 ppm.

Debido a la gran demanda de agua potable y escasa calidad que presenta este líquido en la región, esta es ingerida sin cumplir con todos los requisitos anteriores.

El ingerir agua con valores superiores a las normas de la SSA presentar los siguientes inconvenientes:

STD; con más de 1,000 ppm, normalmente no causa problemas de salud siempre y cuando no se encuentren, en exceso, algunos elementos críticos, como son:

Arsénico, Selenio y Cromo: No es común encontrarlos en el agua, pero su presencia en cantidades pequeñas es tóxica, por lo cual el agua potable, no debe tener concentraciones mayores de 0.05 ppm.

Zinc, Cobre, fierro y Manganeso: El cuerpo puede llegar a tolerar cantidades un poco mayores a las establecidas, no es común su presencia en el agua.

Sulfatos: Actua como laxante. En combinación con otros elementos da lugar a un sabor desagradable.

Nitratos: Puede producir enfermedades hídricas mortales, como la metahemoglobinemia en los niños.

Cloruros: Le produce sabor desagradable y limita su uso.

La presencia de concentraciones relativamente altas de sodio, cloro, magnesio, calcio, carbonatos y bicarbonatos, no presentan gran peligro, ya que pueden ser eliminadas por el organismo.

El agua requerida para la industria se puede catalogar con respecto a su dureza, según Durfor y Becker, 1964 en (Hem, 1970) se ha distinguido los siguientes rangos de dureza.

CONCENTRACION EN mg/l de CaCO ₃	DESCRIPCION
0 - 60	Agua blanda
61 - 120	Agua moderadamente dura
121 - 180	Agua dura
más de 180	Agua muy dura

Los valores de dureza, que se presentan en las muestras de la zona son de 107 a 860 mg/l de CaCO₃, de las cuales el 96% se encuentran en el rango mayor a 180 mg/l de CaCO₃, clasificandose como agua muy dura. En general el área de estudio, presenta algunas zonas con variación de la calidad del agua.

La zona con mejor calidad de agua en el área de estudio, es la comprendida entre las poblaciones de San Lorenzo-Naranjal-Ignacio Zaragoza-Nuevo Valladolid, otra zona con calidad aceptable es la enmarcada por las poblaciones de Punta Laguna-San Juan de Dios- Heroe de Nacozari-Central Vallarta-Leona Vicario. Existe una zona localizada hacia la línea de costa limitada aproximadamente por las poblaciones de Puerto Morelos-Macario Gómez-Tulum, siendo el agua de peor calidad en la zona de estudio.

Por lo que respecta a la calidad del agua de la zonas mencionadas, se considera de mejor calidad con concentraciones menores a 500 ppm de STD, sin embargo, en lo que se refiere a la dureza total presenta valores de 227 a 350 ppm de CaCO₃, clasificada como una agua muy dura.

En la zona de calidad aceptable hay concentraciones de 600 a 800 ppm de STD, y hasta 860 ppm de CaCO₃.

Respecto a la dureza esta es clasificada en toda la porción de estudio como muy dura, producto de la composición de la caliza que constituye el principal acuífero de la región.

6. INTEGRACION Y CORRELACION DE RESULTADOS

6.1 PIEZOMETRIA

6.1.1 PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTATICO

Con la medida de la profundidad del nivel estático durante el mes de octubre de 1989, en los 179 aprovechamientos visitados, se elaboró la configuración mostrada en el plano No. 9.

El análisis de la configuración indica que las mayores profundidades se presentan en las porciones occidental y suroccidental del área estudiada, con un valor promedio de 15 m y uno máximo de 19.65 m en el poblado de Tres Reyes, mostrando algunas variaciones y cambios muy fuertes entre las poblaciones de El Tintal e Ignacio Zaragoza, Naranjal y San Juan de Dios, como también entre Rancho Viejo y Macario Gómez; estos contrastes de 15 a 5m de profundidad en distancias reducidas (7 Km), están regidas y asociados a la topografía, producto de grandes depresiones que se manifiestan en la superficie, como formas alargadas y algunos encharcamientos producto de la expresión de las estructuras mayores del área.

La profundidad del nivel estático disminuye hacia la costa, con valores promedio de 5 m en sus proximidades hasta uno mínimo de 0.54m en Akumal. Es importante destacar que aunque existen distintas porciones con igual profundidad, estas no presentan la misma calidad de agua, como se manifiesta entre Central Vallarta y Puerto Morelos, donde las profundidades promedio son de 5m y sus agua son completamente distintas en calidad.

6.1.2 ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO

En 50 aprovechamientos seleccionados dentro del área de estudio, se obtuvo, por medio de nivelación diferencial, la altura del nivel estático con respecto al nivel medio del mar (Tabla No. 6.1).

Con el objeto de conocer la distribución espacial de la elevación del nivel estático en la región, se elaboró una configuración, la cual es mostrada en el plano No. 10, donde se observa que la altura piezométrica máxima es de 4 msnm., en la localidad de el Tintal y disminuye en dirección a Coba y hacia la costa.

A partir del mapa anterior, se obtuvo que el gradiente hidráulico para los tramos Naranjal-Coba y Naranjal-Paamul, es de 4.1 E-5 y 4.8 E-05 respectivamente, lo cual indica que la permeabilidad del acuífero es muy grande.

Con respecto al movimiento del agua subterránea puede deducirse que se lleva a efecto en direcciones rectangulares preferentes, al parecer siguiendo el patrón estructural dominante; es decir, partiendo de las localidades de mayor altura piezométrica (área El Tintal-Nvo. X-can) se siguen dos trayectorias: la principal con una dirección Noreste-Suroeste la cual controla inicialmente el flujo hacia Coba y probablemente exista otro hacia el Norte del área, que posteriormente se conjuga con la dirección NW-SE alcanzando la costa. La segunda presenta un flujo hacia Agua Azul y Nuevo X-Can inicialmente, que al intersectar el otro fracturamiento interactúa en longitudes pequeñas dando algunas variaciones en la trayectoria, hasta finalmente alcanzar la línea de costa.

Así se tiene un flujo principal aparente desde la zona El Tintal- Nvo. X-can hacia el área de Tres Reyes-Coba cuya orientación es NE-SW, teniendo un cambio en su dirección principal al llegar a el área con mayor fracturamiento en los alrededores de Punta Laguna y otro prácticamente transversal (NW-SE) a este principal, que mediante este flujo alcanza la línea de costa, mostrando una concentración de cantidad de flujos hacia el área de Xel-Ha.No fue posible configurar en la parte central del área, debido a la falta de datos, pero es probable que en esta zona se mantenga el mismo comportamiento dinámico rectangular.

6.2 INTEGRACION HIDROGEOLOGICA

Con base a la cartografía geológica de la región y la interpretación geológico estructural, así como los valores de carga piezométrica obtenidos, se preparó el mapa hidrogeológico (Plano No. 4), donde se observa el sentido de flujo del agua subterránea asociado al arreglo geológico-estructural. Lo anterior es con objeto de mostrar la relación de aspectos que están íntimamente ligados en el sistema hidrogeológico kárstico que se conforma en la región. Es decir, el sentido de flujo del agua subterránea debe obedecer el patrón geológico estructural de la zona ya que es a través del arreglo de discontinuidades geológicas por donde se desarrollan los conductos carsticos y circula el agua subterránea.

En este sentido, las discontinuidades geológicas estructurales con dirección predominante longitudinal a la costa (NE-SW), son las que presentan mayor intensidad y además, mayor dimensión, por lo que se infiere que en esa dirección se da, principalmente, el flujo de agua subterránea. Esto se fundamenta por la asociación tan estrecha que se tiene con las expresiones kársticas del relieve superficial dado que en esta dirección se encuentran alineadas las grandes depresiones, los cenotes de dimensiones mayores y los cuerpos de agua superficial, como el fracturamiento que se observa en las inmediaciones de la población "El Tintal" y que continua hacia la población de "Naranjal".

En esta misma dirección se aprecia un gradiente hidráulico pequeño de 4.0 E-5 (Tramo Naranjal-Coba) hasta 6.0 E-5 (tramo El Tintal-Coba), evidenciando una alta permeabilidad y un sentido de flujo subterráneo en esa dirección. Lo anterior se corrobora por los resultados de hidrogeoquímica que, entre otros aspectos, destacan los siguientes:

- 1) Incremento de la concentración iónica y
- 2) Incremento del índice de saturación de calcita, ambos en dirección de Caba.

Por otro lado, las discontinuidades geológico-estructurales en dirección transversal al arreglo anterior, es decir, en sentido perpendicular a la costa (NW-SE) se presentan con menor frecuencia (Figura No. 3.8) y en tamaño son de menor magnitud. Este arreglo se encuentra asociado con cenotes pequeños y algunas depresiones alineadas a estos. Es de esperar, también en esta dirección, el flujo de agua subterránea; sin embargo, este debe ser de menor cuantía ya que en esas direcciones el gradiente hidráulico es mayor; cerca de 7.0 E-5 (Tramo El Tintal-Xcarte) y con valores de 1.0 E-4 en la porción sur del área de estudio (tramo Macario Gómez-Tulum) lo que puede indicar una disminución de la permeabilidad hacia el sur del área de estudio, sin olvidar que se trata del arreglo transversal a la costa, que de hecho presenta menor permeabilidad como se menciona líneas arriba.

Esto último es interesante relacionarlo con el movimiento del frente salino; en efecto, al tener menor cantidad de agua que se descarga en la costa sur (Tramo Akumal-Tulum) propicia que el valor de la carga hidráulica sea menor, de apenas centímetros (ver plano No. 10) con lo que habrá más facilidades de intrusión marina, dado que la interface tiende a ser horizontal por tender el sistema a ser estático en esas porciones y la zona de mezcla se encuentre muy desarrollada por no haber expulsión de agua salobre. En la porción norte del área de estudio es donde el frente de intrusión se ve detenido y no avanza demasiado, producto de la litología que se presenta hacia esa porción, la cual por sus características físicas, retarda el frente salino por su baja transmisividad, aun cuando presenta una permeabilidad muy homogénea.

Otra manifestación más de este fenómeno son los resultados de la geoquímica, en donde se comprueba la existencia del cuerpo de agua salobre hacia las inmediaciones de Tulum, como queda comprobado por los valores tan altos de la relación de Cl/HCO_3 y conductividad eléctrica (ver planos Nos. 6 y 7), además porque el índice de saturación de calcita se encuentra bajosaturado, indicativo adicional de la presencia de la mezcla de dos aguas; agua dulce de descarga y agua de mar, ambas sobresaturadas con respecto a calcita.

Esto último contrasta paradójicamente con las descargas tan grandes que se han estimado (Back, w., Hanshaw B. Op. Cit.) para un sitio en particular dentro de esta porción de entrada de agua de mar como la zona de Xel-Ha; sin embargo, si se observa el mapa de interpretación estructural y el fotogeológico, se aprecia una patrón estructural en dirección NW-SE (perpendicular a la costa) desde el área de Tres Reyes (casi 50 Km de distancia de la costa) y que termina en Xel-Ha. Esto permite que el contacto entre el acuífero y el mar no sea homogéneo y el agua tienda a escaparse por este canal preferente, en cantidades concentradas y con presión suficiente como para propiciar un flujo perceptible originando las "surgencias" de agua dulce, que como la mencionada (Xel-Ha) y otras: Xcaret, Xcalacaco, Yax-Etzeb, Puerto Aventuras, Chemuyil y Akumal (localizadas en el plano No. 1), y que son casos que generalmente ocurren en acuíferos calcáreos karstificados, por lo que no sería raro que en sitios especiales el acuífero con agua dulce se extienda bajo el mar, sobre todo si se encontraran arreglos de varios paquetes de la misma roca que actúen como impermeables y separen las porciones más permeables, caso típico de estos materiales.

6.3 OCURRENCIA DEL AGUA SUBTERRANEA

6.3.1 RECARGA

Es importante destacar que para la estimación que a continuación se presenta, no se consideró la recarga horizontal o subterránea, siendo esta muy significativa según el comportamiento estructural del acuífero, teniendo una zona probable de recarga horizontal hacia los alrededores de Coba y Punta Laguna.

Tomando en consideración la figura de Isoyetas (No. 2.6), se limitó el área de recarga vertical efectiva al acuífero (Fig. 6.1), puesto que por las características tanto físicas como geográficas del acuífero costero del norte de Quintana Roo, la precipitación que se efectúa cercana a la línea de costa, no constituye una recarga vertical real al acuífero, ya que ésta es rápidamente descargada al mar y/o mezclada con agua oceánica.

El área antes citada es la comprendida por los valores mayores a 1,100 mm de precipitación media anual, teniendo una extensión de 2,812 Km², la cual representa el 60% de la porción de estudio. La delimitación de esta área es sustentada también por la configuración de conductividad eléctrica (Plano No. 6), mostrando en ella valores menores a 1,500 umohs/cm.

El intento para obtener la estimación de la recarga vertical del acuífero en la zona de estudio debe considerarse con las reservas del caso, por el método y valores empleados, donde únicamente se considera la cantidad de agua que se infiltra directamente al subsuelo, proveniente de la precipitación pluvial menos la evapotranspiración real, ya que no existen corrientes superficiales que aporten determinado caudal a estimar. Por lo tanto, la recarga vertical del acuífero está dado por la siguiente fórmula:

$$RV = (P - ETR) A$$

donde:

Rv	=	Recarga vertical
P	=	Precipitación en metros
ETR	=	Evapotranspiración real en metros
A	=	Area en metros cuadrados

Ahora bien, para conocer el dato de la cantidad de agua que realmente se evapotranspira (ETR) se utilizó la fórmula propuesta por Coutagne (Custodio, 1976), para valores de precipitación comprendidos entre:

$$\begin{array}{c}
 \frac{1}{8x} \quad Y \quad \frac{1}{2x} \\
 \text{donde:} \\
 X = \frac{1}{0.8 + 0.14 t}
 \end{array}$$

$t =$ temperatura media anual en grados centígrados = 24.26

obteniendo:

$$X = \frac{1}{0.8 + 0.14 (24.26)} = 0.23814$$

siendo nuestro valor de precipitación de 1.22564 m/año.

por lo tanto:

$$\frac{1}{8x} \text{ menor de } 1.22565 \text{ mayor de } \frac{1}{2x}$$

utilizando la formula: $ETR = P \cdot X \cdot p^2$

donde:

ETR = Evapotranspiración real en m/año

P = Precipitación en m/año = 1.22565

lo que resulta:

$$ETR = 0.06679 \text{ m/año} = 66.79 \text{ mm/año}$$

entonces, la recarga vertical es:

$$Rv = (1.22565 \text{ m} + 0.06679 \text{ m}) 2812 \text{ E}+6 \text{ m}^2$$

$$Rv = 1005.993 \text{ E}+6 \text{ m}^3/\text{año}$$

6.3.2 DESCARGA

El acuífero por sus características y comportamiento presenta descargas naturales horizontales subterráneas, tanto al mar como hacia las porciones norte y sur del área de estudio, así como una descarga por extracción provocada por el hombre.

La cuantificación de las descargas naturales del acuífero, no son obtenidas en su totalidad, solo se estima la descarga natural al mar, sin embargo las descargas naturales horizontales subterráneas según el comportamiento del acuífero pueden ser muy importantes, dado el área de la recarga de este acuífero es considerada como una zona de recarga regional.

La cuantificación de la descarga natural al mar, que se obtiene a continuación es un valor muy relativo, ya que el acuífero nos indica una gran concentración de flujo hacia el área de Xel-Ha, dándonos probablemente un valor en esta zona principal de descarga al mar mucho mayor que el estimado por Bakc, w., op. cit., por kilómetro de costa.

Como ya se mencionó, el acuífero del área estudiada se caracteriza por una alta permeabilidad y transmisividad que permite un rápido movimiento lateral del agua subterránea hacia la costa, en donde la descarga natural se efectúa a través de manantiales con un caudal de aproximadamente 7.6 millones de $m^3/año$ en cada kilómetro de costa que corresponde a un gasto instantáneo de $0.273 m^3/seg.$ se tiene que a lo largo de los 150 Km de costa (Cancún-Tulum) incluida en el área estudiada, el caudal que el acuífero descarga al mar es de $1,290 M m^3/año,$ o sea $41 m^3/seg.$

Las geoformas asociadas a las zonas de salidas de agua verificadas en el campo, corresponde a playas semicirculares y rocosas y caletas distribuidas en toda la costa.

Estos manantiales costeros se manifiestan como típicos "ojo de agua" a través de cavidades de disolución, cuyo diámetro varía de 15 a 40 cm, como sucede en las playas de Chemuyil, Akumal, Puerto Aventuras, Xcaret y Punta Xcalacoco, o bien a través de fracturas de orientación NW-SE en Xel-Ha y Punta Yax-etzeb. La ubicación de estos manantiales se localiza en el plano de censo de aprovechamientos (ver Plano No. 1).

Con el afán de comprobar la presencia de una salida de agua subterránea, se midieron las propiedades físico-químicas de campo al agua del manantial y en algunos casos el agua de mar, principalmente el pH y la conductividad eléctrica; los resultados se muestran en la tabla No. 6.2. En ella se observa en general un marcado contraste entre la conductividad eléctrica de las salidas de agua con respecto a el agua de mar, los valores de conductividad eléctrica de las salidas de agua, varían de 6,000 (Punta Xcalacoco) a 19 400 $umohs/cm$ (Pto. Aventuras) y las de agua de mar desde 22,000 hasta 31,000 $umohs/cm,$ así como también el pH presenta valores de 7.9 a 7.20 en el agua de la descarga y pH de 7.17 a 9.3 en el agua de mar.

En el caso de Xel-Ha, no se encontró alguna manifestación superficial de descarga natural de agua, por lo que se procedió a hacer un muestreo a diferente profundidad. Los resultados de conductividad eléctrica muestran un incremento notable con la profundidad, teniendo en superficie un valor de 15,000 y a 1.70m del nivel estático, un valor de 20,500 $umohs/cm,$ así como también un incremento en el valor del pH con la profundidad, los cuales corroboran la presencia de una salida de agua dulce e indican la estratificación provocada por la diferencia de densidades del agua de mezcla con respecto al agua de mar.

Un caso especial se observa en Punta Caracol donde, al igual que en Xel-Ha, no se detectó alguna manifestación física de manantial costero, pero se infiere su presencia debido a la localización de una noria a escasos 20m de la línea de playa con un agua de salinidad baja. Con respecto a la temperatura, también son notorias las diferencias; el agua de la descarga natural es más fría que la del mar.

6.3.3 EXTRACCION

La cuantificación de la extracción del acuífero de la región no se obtuvo con exactitud, ya que no se cuenta con registros de observaciones directas. Debido a lo anterior, se llevó a cabo una estimación de la cantidad de agua descargada a la superficie, tanto la extraída por el hombre como la que se manifiesta en la costa a través del subsuelo.

Con respecto a la extracción de agua subterránea, ésta se destina al uso en riego, abrevadero, industrias y principalmente consumo doméstico, su estimación está basada en las características del equipo de extracción utilizado, tiempo de bombeo y número de habitantes abastecidos; en el caso de que los aprovechamientos no estuvieran equipados como sucede con un gran número de norias y cenotes, se empleó un promedio de consumo por habitantes y animales, que corresponde aproximadamente a 100 litros de agua por día (Lesser, 1976). Así, se tiene que en la zona donde están emplazadas las baterías de pozos que abastecen a las Ciudades de Cancún e Isla Mujeres, se obtiene un caudal aproximado de 31 M m³/año y en el resto del área de estudio éste es de 3 M m³/año, es decir que se extrae un total de 34 M m³/año.

Por lo anterior, adicionándole la descarga subterránea al mar obtenida anteriormente, se estima una descarga total de el acuífero de 1,324 Mm³/año.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 AREAS FAVORABLES DE EXPLOTACION

Son tres los principales factores que conducen a la mejor selección de los sitios de abastecimiento de agua potable: 1) La cantidad, 2) la calidad y 3) la cercanía a los centros de suministro; sin embargo, el orden de los factores debe marcarse por las necesidades y el uso a que se destinará el insumo; claro, en función de que el medio físico lo permita. Es decir, lo óptimo es la mayor cantidad, la mejor calidad y sobre todo lo más cercano posible.

No obstante, del análisis hidrogeológico realizado a la zona de estudio, se desprende que el medio, dadas sus características hidráulicas ya mencionadas, proporcionaría grandes cantidades de agua instantáneamente aunque su calidad se vería deteriorada con el tiempo, al someter al acuífero a una explotación irracional.

La región ofrece una inconsistencia respecto a su calidad ya que solo las porciones alejadas de la costa tienen agua que no rebasa los límites permisibles (vease inciso de calidad del agua); sin embargo, regionalmente hablando puede aceptarse cierta flexibilidad en los límites establecidos, con esto puede ampliarse el espectro de posibilidades y establecer, de acuerdo al plano No. 6, que muestra la configuración de conductividad eléctrica, que un límite adecuado para considerar agua de calidad aceptable sería hasta de 1,350 umohs/cm; es decir, entre 900 y 1000 ppm de sólidos totales disueltos (Tabla No. 5.4), valor alto si lo comparamos con el agua con que se abastece a la ciudad de México (300-400 ppm de STD); no obstante, es un valor cercano al promedio para la Península de Yucatán, (Lesser, 1976).

De esta manera, la calidad solo nos limita parcialmente si la consideramos en sentido horizontal. Dado que el cuerpo de agua dulce presenta variaciones en su espesor y este literalmente "flota" sobre un cuerpo de agua con salinidad cada vez mayor a profundidad, la calidad juega un papel preponderante en este sentido.

Con objeto de minimizar el riesgo del deterioro en calidad, al mediano y largo plazo, la selección de los sitios de explotación debe tomar en cuenta dos aspectos:

- 1) Considerar las áreas que indican mayor espesor del acuífero de agua dulce y

2) Integrar el parámetro anterior con zonas donde se interseque la mayor cantidad de discontinuidades geológico-estructurales o en su caso, tender a cortar el patrón estructural predominante, (cuya dirección es NE-SW).

De esta manera, se pretende encontrar las mejores condiciones hidráulicas con objeto de preservar la calidad y la cantidad del recurso.

7.2 DEFINICION DE ZONAS DE CAPTACION

En el inciso anterior se recomiendan grandes áreas favorables para su explotación en función de la cantidad y calidad de agua del acuífero; sin embargo, para reforzar y soportar una explotación al mediano y largo plazo, es necesario que los sitios presenten, además de lo anterior, condiciones hidráulicas favorables, puesto que de nada sirve una zona con gran espesor si durante el bombeo experimenta grandes abatimientos del nivel del agua; es decir, caudales específicos bajos propician la intrusión salina puntal en sentido vertical inutilizando los pozos a corto plazo.

De esta manera, un parámetro altamente relacionado con las mejores condiciones hidráulicas es el arreglo Geológico-Estructural, ya que el acuífero es una entidad kárstica calcárea. Por consiguiente a donde se conjuga el patrón de fracturamiento se recomiendan los sitios específicos de explotación.

Analizando la interpretación estructural (Plano No. 3) y el mapa de conductividad eléctrica (Plano No. 6), que definen las zonas de agua probable de buena calidad, se seleccionaron los sitios donde existe agua dulce alejada de la costa y que coinciden con las áreas de intersección de las principales familias de fracturas (Figura No. 3.8), determinándose los mejores sitios, que son:

- 1) El área de Macario Gómez y Manuel Antonio Hay.
- 2) El área a 5 Km al sureste de Heroe de Nacozari.

- 3) La zona localizada a 20 Km tierra adentro, perpendicular a la línea de costa, frente a
Aventuras Akumal.
- 4) El área de Central Vallarta.
- 5) La zona de Punta Laguna.
- 6) La Franja de Santo Domingo-El Tintal.
- 7) La Franja entre Emiliano Zapata-Agua Azul.

Dada la principal características de este tipo de acuíferos como es la heterogeneidad de sus propiedades hidráulicas, es adecuado mencionar que aún, después de correr todo tipo de pruebas, el comportamiento en un sitio pudiera no extrapolarse a otro, por mas cercano que este se encuentre, debiéndose tomar con reserva los resultados de las pruebas de aforo y bombeo.

7.3 RECOMENDACIONES

Los resultados del estudio representan una condición del acuífero; es decir, muestran el comportamiento hidrogeoquímico e hidrogeológico de la temporada de lluvia, dado que el muestreo se realizó al final de ésta. Por consiguiente, los rangos establecidos definen el límite máximo y considerando la gran dinámica de acuífero, es necesario conocer éste en la temporada de estiaje, para definir parámetros como la carga hidráulica y su influencia en la química del agua y sobre todo el avance de la intrusión marina.

Establecer un monitoreo periódico piezométrico, así como muestreos geoquímicos de agua en los pozos piloto, debido a la gran dinámica del sistema estudiado.

Realizar sondeos eléctricos verticales, en secciones perpendiculares a la línea de costa, para conocer la longitud y profundidad del frente salino que penetra a la costa, y poder determinar el área más favorable para la explotación del acuífero, con menor riesgo de pérdida de calidad del agua.

Realizar sondeos directos en las áreas de mejor calidad de agua, espesor e intersección de los patrones de fracturas, así como pruebas de aforo, para comprobar que la transmisibilidad es alta en esas zonas. Lo anterior con el objeto de no permitir abatimientos del nivel dinámico mayores a unos centímetros.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

B I B L I O G R A F I A

Aguayo C. J. E., Bello M., del Vecchio, Araujo M., Basañez L. 1980 Estudio sedimentológico en el área Tulum-Cancún. Isla Mujeres, Edo. Quintana Roo, México. Soc. Geol. Mex. Tomo XLI, Nos. 1 y 2, p. 15-32.

Back, W., Hanshaw B. 1974 Hydrogeochemistry of the Northern Yucatán Peninsula, México. Weidie A. E., Ed., Field Seminar on Water and Carbonate Rocks of the Yucatán Peninsula, México: New Orleans Geological Society Guide Book, field trip 2, of America.

1980 Chemical mass-balancing of the northern Yucatan Peninsula by ground-water dissolution. Geology V. 8, p. 222-224, May.

Back., W. and Zoetl, J. 1975 Application of Geochemical Principles, Isotopic Methodology, and Artificial Tracers to Karst Hydrology. Intem. V. G. Sciences. Series B No. 3, IAH Paris.

Bonet F. 1960 Afloramientos del Eoceno en el Norte de la Península de Yucatán. Bol Asoc. Mexicana de Geólogos Petroleros , P.1-12.

Butterlin J. 1960 Mapas Geológicos de la Península de Yucatán. Rev. Ing. Hidráulica en México. Vol. 7 p. 1-10.

1963 La paleogeografía de la margen meridional del Golfo de México en el Paleoceno.

C.N.A. 1988 Estudio de identificación y evaluación de la fuente de abastecimiento de agua potable en bloque para la Ciudad de Cancún, Puerto Juárez, Isla Mujeres y la zona turística en el Edo. de Quintana Roo SARH., RGACSH.

Custodio E., Llamas M. 1976 Hidrología subterránea. Tomo I y II. Editorial Omega.

Dietz R.S. 1991 Demise of the dinosaurs: Amystery solved. Planetari Science, P.32-37.

Drake J.J., Harmon R.S. 1973 Hydrochemical environments of carbonate terrains. Water Resources Research, 9 (4), p. 949-957.

Durón Pérez M. F. 1983 Estudio Geohidrológico del área Playa del Carmen, Edo. Quintana Roo. Tesis profesional. Fac. Ing. UNAM.

Hanshaw B. B. and Back W. 1979 Major Geochemical Processes in the evolution of carbonate-Aquifer System Journal of Hydrology, 43, p. 287-312.

Harmon R. S., Hess J., Jacobson, Shuster, Haygood and White. 1972, Chemistry of carbonate denudation in north America. Trans. Cave Research Group of Great Britain. Vol. 14, No. 2, p. 96-103.

Hem J. D. 1970 Study and Interpretation of the chemical characteristics of Natural Water. Geol. Survey Water U.S.- Supply Paper 1973, 363 p.

Isphording W. C. 1975, The Physical Geology of Yucatán Trans. Golf Coast. Assn. Geol. Soc. Vol. 25, U.S.A.

Lesser Jones H. 1965 Geohydrology Problems in the Yucatán Peninsula México. Symposium on Hydrology Fractures Rocks. International Association of Hydrological Sciences, p. 49-53.

Lesser Illades J. M. 1976 Estudio hidrogeológico e Hidrogeoquímico de la Península de Yucatán S.R.H., D.G.Z.A. Proyecto Conacyt NSF704.

Llopis Llado N. 1970 Fundamentos de Hidrología kárstica Editorial Blume.

Logan, B. W. Submarine Topography of the Yucatán Platform. 4 p.

1977 Carbonate Sediment and reefs Yucatán Shelf, México. Am. Assoc. Petr. Geol. Mem. 11, p. 198

López Ramos E. 1969 Estudio Geológico de la Península de Yucatán. Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros V. 25 p. 23-76.

1973 Geological Summary of the Yucatán Peninsula. Bol. Asoc. Geolog. Petrol. (AMGP), Vol. XXV No. 1-3

1979 Geología de México S.E.W. Tomo III p. 263-295.

Murray G., y Weidie A. E. 1961 Regional Geologic summary of Yucatán Península. Martel A.B.

Pemex, Archivo técnico del Sureste de México años 1984, 1985, 1987 Inédito.

Plummer L. N. and W. Back, 1980 The mass balance approach application to interpreting.

Ponce Castellanos J.J., 1987 Caudal de explotación de pozos en la Península de Yucatán. C.F.E. II Reunión Nacional P. 95-107

Santiago A. J., Carrillo B. J. 1982 Geología Petrolera de México. PEMEX No. 1 p. 1- 36.

Secretaría de Salubridad y Asistencia 1953 Reglamento de la S.S.A. sobre Obras de Provisión de Agua Potable.

Truelldel, H.A Jones F.B., Plummer L.N. 1970 Program Wateq-F U.S. Geol. Serv. W. Res. Div. Virginia U.S.A

Velázquez A. L. 1986 Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la Península de Yucatán. Rev. Ing. Hidráulica en México, Vol. 1, No. 3, p. 21-29.

Viniegra F. 1981 El Gran Banco Calcáreo Yucateco. Revista Ingeniería No. 1 P.20-44.

Villagomez Alberto, 1953, Un programa de exploración para la Península de Yucatán. Asoc. Mex. Geol. Petroleros p. 77-84.

Wilson Lee J., Word W. 1969 Al NE de la Península de Yucatán, República Mexicana, se describe una nueva área para el estudio de sedimentos de evaporitas-carbonatos. Bol. Asoc. Mex. Geol. Petroleros V. XXI. No.s 1-6 p. 16-25.

ANEXO No. 1

TABLAS

TABLA 1.1

RESUMEN DEL CENSO

TIPO DE CAPTACION	SIN EQUIPO DE BOMBEO	CON EQUIPO DE BOMBEO	CANTIDAD TOTAL
POZOS	17	34	51
NORIAS	50	45	95

TIPO/No OBRA	LOCALIDAD	B O M B A		TIEMPO DE BOMBE	A B A S T E C E			DIAMETRO TUBERIA (PULGADAS)				
		TIPO	MARCA		H.P.	No.HAB	No.ANIM	USO	SALIDA	SUCCION	ADEME	POZO
POZO -03	LEONA VICARIO	S			11 Hrs/d		P	4				
CENOTE-06	RANCHO MAYAB	E		0.5			P	2	2			
CENOTE-08	XCARET	E	JACUZZI	0.5		15	D	1	1.5			
CENOTE-09	CHIEMUYIL	E		10	15 Hrs/d		P	4				
POZO -10	HELLO FRIO	E		1	8 Hrs/d		I	2	3	6PVC		
NORIA -12	R. SANTA ANA	E		1			D	1	2			
NORIA -13	R. ESPERANZA	E		1			D	2	2			
POZO -14	M. HORTALIZAS	E		2			R	2.5	2.5	12PVC	16	
POZO -15	AGROINDUSTRIA	E		2			G	2.5	2.5	PVC		
POZO -16	AGROINDUSTRIA	E		9	16 Hrs/d		G	2.5	2.5	6PVC	8	
NORIA -17	AGROINDUSTRIA	E		3			G	3	3			
CENOTE-20	AEROPUERTO	E		10			D	2	2			
NORIA -22	R. FLAMENCOS	E		2			P	1.5	1.5			
POZO -23	AGROINDUS FRIA	E	JACUZZI	2			G	2.5	2.5	10PVC		
CENOTE-24	PTO MORELOS	E		10			P	4	4			
NORIA -27	LA LEY DEL M	G	BRIGGS/S	2.5	.15 Hrs/d	36	P,G	2.5	2.5			
NORIA -30	R SN FRANCISCO	G	KOHOLER	2	0.10 Hrs/d	40	P,G	1.5	1.5			
CENOTE-31	CAP. LAFFIT	E	JACUZZI	2			I	1.5	1.5			
POZO -32	PLAYA CARMEN	E		25	9.5 Hrs/d		P	4	4			
POZO -33	PLAYA CARMEN	E		25	9.5 Hrs/d		P	4	4			
NORIA -35	X. CARET	G	BRIGGS	5	0.5 Hrs/d		D	1	1.5			
POZO -37	NVQS. H. II	E	TISA	10			P	4	4			
POZO -38	NUEVO X-CAN	S		8	14 Hrs/d		P	3	3.5			
POZO -40	ZARAGOZA	E	FAIRBANKS	15	16 Hrs/d		P	3.5	3.5	8ACERO		
POZO -41	SN. JUAN DE D.	G	FAIRBANKS	7.5	2.5 Hrs/d	263	P	3.5	3.5			
POZO -42	SAN COSME	E		10	.46 Hrs/d	300	P	3.5	3.5			
POZO -43	EL NARANJAL	D	HOLLOSHFT	15	1 Hr/d	125	P	3	3.0			
CENOTE-44	SHANGRI-LA C.	E	OCELO	5			D	1.5	2.5			
NORIA -45	SN FCO.ITZMINA	V	AEROC.		24 Hrs/d		P,R	1	1.5			
CENOTE-46	V. P. AVENTURA	E	MOTOREXSA	15	12 Hrs/d		D	4	4			
CENOTE-47	REST. XPU-HA	E	KOBLENZ	0.75	0.15 Hrs/d		D	1.5	1.5			
CENOTE-50	AKUMAL CARIBE	E	SIEMENS	3	12 Hrs/d		D	2.5	3.5			
NORIA -54	R. ESPERANZA	E	JACUZZI	0.75	5 Hrs/d		O	0.5	0.5			
POZO -55	TULUM, CAPA	S			14 Hrs/d	8000	P	4		8PVC	12	
POZO -56	TULUM, CAPA	S			14 Hrs/d		P	3		6PVC	12	
POZO -57	TULUM, CAPA	S					P	2.5		6PVC	12	
NORIA -59	R. EL LAGUNERO	V	VELETA		24 Hrs/d		R,D	1.5	1.5			
POZO -60	MACARID GOMEZ	D	A. LISER	20	2 Hrs/d	300	P	3	3			

BOMBAS DE:

- G= GASOLINA
- E=ELECTRICO
- S= SUMERGIBLE
- V=VELETA
- D= DIESEL

USO

- D=DOMESTICO
- G=GANADERO
- P=POTABLE
- R=RIEGO
- I=INDUSTRIAL
- C=CONSTRUCCION

TABLA 1.2

CENSO DE APROVECHAMIENTOS

TIPO/No.OBRA	LOCALIDAD	BOMBA			TIEMPO DE BOMBE	A B A S T E C E			DIAMETRO TUBERIA (PULGADAS)			
		TIPO	MARCA	H.P.		No.HAB	No.ANIM	USO	SALIDA	SUCCION	ADEME	POZO
POZO -62	COBA	D	PRODEMA	20	2 Hrs/d	300		P	3	3		
POZO -65	TRES REYES	E	IEM	10	3 Hrs/d	600		P	3	3		
POZO -66	NUEVO DURANGO	F	FAIRBANKS	15	3 Hrs/d	400		P	3	3		
POZO -67	EL CEDRAL	S		8	0 20 Hrs/d	500		P	4	3	7	
POZO -88	EL IDEAL	S		8	6 Hrs/d			P	3	3		
POZO -69	SAN ROMAN	E	A. LISER	20		152		P	3	3		
POZO -70	PORCICOLA T.	G	KOHLER	12			300	G	2	2		
POZO -71	EL TINTAL	S			4 Hrs/d	1500		P	2.5	2.5	6	8
POZO -72	STO DOMINGO	E	TISA	10		700		P	3.5	3.5		
POZO -73	CRISTOBAL C.	E	TISA	7.5		1000		P	3	3		
POZO -74	AGUA AZUL	S				400		P	3	3	8 PVC	
POZO -75	N. VALLADOLID	S			3 Hrs/d	640		P	3	3		12
POZO -76	SAN LORENZO	S				200		P	3	3	10 ACERO	12
CENOTE -77	UNIDAD PORC.	E	JACUZZI	3				G	2.5	2.5		
POZO -78	NVO. HORIZONTE							P			6 PVC	
POZO -79	ANTIGUA P. 11.	S						P	3.5	3.5	6 PVC	
POZO -80	COCA-COLA	E	FAIR	10	16 Hrs/d			I	3	3	8 PVC	
NORIA -83	RANCHO PETEN	G	BANDS	1.5			35	D,G	1.5	1.5		
NORIA -84	V. PTO. AVENT.	G		1.5	1 Hrs/d			D	2	2		
NORIA -89	R. MA. REYNA	E	SIEMENS	1	12 Hrs/d			D	0.5	0.5		
NORIA -93	CROCOCUN	E	ASEA	3	8 Hrs/d			G	2	2		
NORIA -98	RANCHO KANEC	E	KOELER	4				P	2.5	2.5		
POZO -99B	JUAREZ	E	IEM	7.5	1.1 Hrs/d	100		P	3.5	3.5		
NORIA -101	R. CIRCULO	E		1				G	1	1		
NORIA -102	S.C.T. CANCUN	E		1				P	0.5	1		
NORIA -103	R. ESPERANZA	E	JACUZZI	0.5	1 Hrs/d			P,G	1	1		
NORIA -104	MAY. Y MEDICI.	E		1	1.5 Hrs/d			D	1.5	1.5		
NORIA -105	ING. LALLAZA	E	JACUZZI	1	1 Hrs/d			P	1	1		
NORIA-106	SEIJO	G	KOLER	1.5	0.10 Hrs/d			P	1	2		
POZO -107	CONC. DERIVAD.	E			1 Hrs/d			D	1.5	1.5	4	5
NORIA -108	R. SN. MIGUEL	E		4				P	1.5			
NORIA -112	R. RODMEM	E		1	1.5 Hrs/d			P	1.5			
NORIA -113	R. HERIBERTO	S			0.5 Hrs/d			G	3			
NORIA -114	R. HERIBERTO	E		1	1 Hrs/d		20	G	1			
NORIA -118	R. LA LUPITA	G	GRANE	4	1 Hrs/d			P	2	3		
NORIA -118	REST.LA IGUANA	E		1	2 Hrs/d			D	1			
NORIA -120	MARBAT	E			1 Hrs/d			P	1			
NORIA -121	Q. REJOLLADA	E		1	0.5 Hrs/d			P	0.5			

BOMBAS DE:
 G= GASOLINA
 E=ELECTRICO
 S= SUMERGIBLE
 V= VELETA
 D= DIESEL

USO
 D= DOMESTICO
 G= GANADERO
 P= POTABLE
 R= RIEGO
 I= INDUSTRIAL
 C= CONSTRUCCION

TIPO/No.OBRA	LOCALIDAD	B O M B A			TIEMPO DE BOMBE	A B A S T E C E			DIAMETRO TUBERIA (PULGADAS)			
		TIPO	MARCA	H.P.		No.HAB.	No.ANIM.	USO	SALIDA	SUCCION	ADEME	POZO
NORIA -122	J. BOTANICA	E		3	1Hrs/d			O,R	2			
NORIA -124	SN ANTONIO	E		1	3Hrs/d	35		D,G	1	1		
NORIA -125	R LOS PAJARITOS	G		5	5Hrs/d			P	2			
NORIA -126	PRODEMA	E		5	0.10Hrs/d			I	3			
CENOTE-127	PROFAUNA	G	BRIGGS	5	2Hrs/d			P,G	2	2		
NORIA -128	R. SN. CARLOS	E	BARNES	31	0.5Hrs/d	200		G	1.5	1.5		
NORIA -132	R. STA. CRUZ	E	SEARS	1				P	2	2		
NORIA -135	R. CULLIACAN	V	VELETA		12Hrs/d			P,R	2	2		
NORIA -139	R. SN. JOSE	V	VELETA		12Hrs/d	100		P,G	1.5	1.5		
NORIA -141	R EL MANGUITO	E	SIEMENS	0.75	0.20Hrs/d			P,R	1	1.5		
NORIA -144	R EL PORVENIR	G	KOHLER	2	0.15Hrs/d			D,R	1	1.5		
NORIA -145	R. STA AMELIA	G	KOHLER	0.5	1Hrs/d	100		P,G	1.5	1.5		
NORIA -150	R. SMYRNA	E		1	2Hrs/d		260	G	0.5			
NORIA -151	TRI-BLOCK-CA	E	SIEMENS	0.25	0.5Hrs/d			P	0.5			
NORIA -152	MA. PLA CARMEN	E		0.25	1.5Hrs/d			P	1	1		
CENOTE-153	REST. BUGAMB.	G	WACKER	8					3	3		
NORIA -154	REST. XCARET	E	EMERSON	1				P	1			
CENOTE-155	PAAMUL	E	JACUZZI	1				P	2	2		
NORIA -150	R. SN. FCO. N.	E		4	5Hrs/d		225	R,G	4			
CENOTE-161	XPU-HACARMEN	G	KOBLENZ	5	0.5 Hrs/d			C	2	2		
NORIA -163	KANTENAH	G	JACUZZI	5				C	3	4		
CENOTE-166	AKUMAL CANCUN	E	FAIRBANKS	3	14Hrs/d			D	2	2		
NORIA -167	ARTESANIAS T.	G	KOHLER	3				D	2	2		
CENOTE-168	EXCAMPTO S.C.T.	E		1	1Hrs/d			D	1	1		
CENOTE-169	R STA TERESITA	E		5	1Hrs/d			D	1	1		
POZO -170	R. CRUCERO T-C	E	AARIAGA	1	1Hrs/d			D	1.5	1.5		
POZO -175	SAN FCO.	E		7.5	4Hrs/d			P	3.5	4		

BOMBAS DE:
 G=GASOLINA
 E=ELECTRICO
 S=SUMERGIBLE
 V=VELETA
 D= DIESEL
USO
 D=DOMESTICO
 G=GANADERO
 P=POTABLE
 R=RIEGO
 I=INDUSTRIAL
 C=CONSTRUCCION

NIVEL ESTÁTICO Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS APROVECHAMIENTOS CENSADOS (1989)

No. MUESTRA	LOCALIDAD	OCT	DIC	OCT	DIC
		NE/ND*	NE/ND*	C.E.	C.E.
1	LA FRONTERA	05 63		909	
2	CAPA No. 6	06 09		1433	
3	LEONA VICARIO				925
4	LEONA VICARIO	05 62	05 52	920	905
5	RANCHO MAYAB	03 00		397	
6	MAYAB (CASCO)	05 67		466	
8	XCARET	05 17		2000	
9	CENOTE CHEMUYIL	09 06*	09 13*	2530	2409
10	HIELO FRIO	05 96		1329	
11	MADERERIA "EL DORADO"	08 84		1259	
12	SANTA ANA	07 23		1208	
13	ESPERANZA	07 76		638	
14	PRODUC. MEX DE HORTALIZAS	04 70		502	
15	COMPLEJO AGROINDUSTRIAL	08 10*		1027	
16	COMP. AGROIND. (PIE DE CRIA II)	08 79		930	
17	COMP. AGROIND. (PIE DE CRIA II)	09 37		1160	
18	ASTILLEROS	02 78		3750	
19	COND. EN CONST	01 17		3740	
20	AEROPUERTO	02 9*		1338	
21	AEROPUERTO	03 50			
22	FLAMENCO	08 39		632	
23	COMP. AGROPORCINO DE CANCUN	04 33*		809	
24	PTO. MORELOS CAPA	02 20*		1347	
25	COL. JOAQUIN ZETINA	06 88	06 76	814	649
26	RANCHO LA FELICIDAD	04 82		909	
27	LA LEY DEL MONTE	02 20	02 31	3176	2800
28	STA. TERESITA	04 32	04 12	495	481
29	RANCHO EL PALOMAR	05 60	05 37	998	585
30	RANCHO SAN FRANCISCO	07 34	07 37	2290	2050
31	CAPITAN LAFFITE	02 58*		4340	
32	PLAYA CARMEN CAPA I	10 23	09 20	1594	1300
33	PLAYA CARMEN CAPA II	07 04	06 79	1571	1400
34	RANCHO DE LA FAMILIA SUAREZ	05 21		3250	
35	XCARET	05 64	05 76	2460	2000
36	9.8 KM DE XCARET (CANCUN-TUL)	05 08	05 03	743	650
37	BAT. NVOS. HORIZ. II POZO 8	07 54		1453	
38	NUEVO XCAN (CAPA)	17 80*	17 59	1104	1050
39	EL IDEAL	15 06			
40	IGNACIO ZARAGOZA	16 16	16 05*	718	725
41	SAN JUAN DE DIOS	17 23	17 05	809	550
42	SAN COSME	10 03	09 81	853	810
43	EL NARANJAL	02 77	02 53	678	490
44	SHANGRI-LA CARIBE	03 33		5100	
45	RANCHO SAN FCO. ITZMA	00 37		2350	
46	VIVERO PTO. AVENTURA	03 35		2760	2500
47	XPU-HA (REST.)	03 50		8940	7400

TABLA 13

NIVEL ESTÁTICO Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA
DE LOS APROVECHAMIENTOS CENSADOS (1989)

274

No.	LOCALIDAD	OCT NEIND*	DIC NEIND*	OCT C.E.	DIC C.E.
48	SAN VICTOR	06 16	06 25	6110	5500
49	CLINICA MEDICA (CHEMUYIL)	01 32	01 12	883	820
50	CENOTE AKUMAL CARIBE	00 76*	00 44*	5350	5300
51	POZO CHEMUYIL I	07 67		583	
52	POZO CHEMUYIL II	04 02*	04 20	280	270
53	POZO CHEMUYIL III	16 29	10 76	560	500
54	RANCHO LA ESPERANZA	22 50	02 66	1920	1700
55	TULUM CAPA No. 3	02 15*		3150	
56	TULUM CAPA No. 2	02 34*		2040	
57	TULUM CAPA No. 1	02 82	03 56	1970	2040
58	CAMPAMENTO S.C.T. TULUM	02 83	02 95	1464	1180
59	RANCHO EL LAGUNERO	07 95	08 15	3770	2400
60	MACARIO GOMEZ	15 90	15 95	1620	1150
61	MARUEL ANTONIO HAY	18 93	18 87	1148	1020
62	COBA	04 80	04 75	1682	1220
63	PUNTA LAGUNA	12 08	12 19	730	660
64	RANCHO EL ROBLE	19 10	19 16	1179	1108
65	LOS TRES REYES	19 67*	19 64	1040	950
66	NUEVO DURANGO	19 91		907	
67	EL CEDRAL	07 98	06 02		950
68 B	POPOLNAH	09 81		962	
69	EL IDEAL	14 93	14 86		1140
69	SAN ROMAN	02 89	01 71	513	500
70	PORCICOLA EJIDO TINTAL	09 68*		938	
71	EL TINTAL	03 15	03 09	986	935
72	STO. DOMINGO (CAPA)			838	
74	POZO AGUA AZUL	05 16	05 11		417
75	NVO VALLADOLID	02 32*	02 21	723	709
76	SAN LORENZO	09 57	09 51	838	824
77	PORCICOLA LEONA VICARIO	05 15		1120	
78	BAT. NVOS HORIZONTES	08 67		860	
79	POZO II CAPA	08 00*		1257	
80	COCA COLA	05 52*		1837	
81	BANCO MATERIALES	08 08			
83	EL PETEN	02 13	02 25	770	620
84	VIVERO PTO. AVENTURAS	08 00	08 30	5810	4209
85	POZO EXYCO I	03 45	03 58	716	800
86	POZO EXYCO II	04 20		1976	
87	RANCHO SOLO		03 16		1151
88	DDN JULIAN		02 98		508
89	MA REYNA		04 61		781
90	CENTRAL VALLARTA		03 88		475
91	RANCHO GANADERO		03 58		672
92	BAT. AEROPUERTO		07 42		1195
93	CROCOCUH		10 08		987
94	SAN ISIDRO		06 73		895
95	BRECHA AKUMAL		12 20		1137
96	TRES MARIAS		11 47		
97	EL PALOMAR II		08 17		708

NIVEL ESTÁTICO Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA
DE LOS APROVECHAMIENTOS CENSADOS (1989)

No. MUESTRA	LOCALIDAD	OCT	DIC	OCT	DIC
		NE/ND*	NE/ND*	C.E.	C.E.
98	KANEK		06.11		1421
99	GUADALUPE VICTORIA		09.03		781
100	HEROES DE NACDZARI		12.13		921
101	EL CIRCULO		08.73		880
102	S. C. T. CANCUN		08.60		800
103	ESPERANZA		08.73		1020
105	ING. Y ARQ. LALLAZA		19.17		750
106	POLVORIN SEIJO		06.83		780
107	CONCRETO Y DERIVADOS		06.71		880
108	SAN MIGUEL		08.64		600
109	LOS AMIGOS		09.26		680
111	EMILIANO ZAPATA		11.52		1243
112	GRANJA RODMEN		10.36		800
113	HERIBERTO		05.37		720
114	HERIBERTO		10.17		1600
115	TZITZILCHIE		08.08		860
116	LA LUPITA		06.25		860
117	CENTRO DE INVESTIGACIÓN		06.09		
118	REST. LA IGUANA		07.28		920
119	COL. JOAQUÍN ZETINA (SRA. MU)		06.06		680
120	MARBAT		10.23		900
121	QUINTA RESOLLADA		10.25		860
122	JARDÍN BOTÁNICO		05.32		720
123	EL HIJO DESOBEDIENTE		06.43		680
124	SAN ANTONIO		09.96		870
125	LOS PAJARITOS		07.02		890
126	PROYEDMA COSTA AZUL		06.47		680
127	GRANJA PROFANA				980
129	PLAYA DEL SECRETO		01.50		880
130	LOS CARLOS		02.37		650
131	EL HIJO PRODIGO		02.25		470
132	SANTA CRUZ		02.80		550
133	EL GALLERO		01.92		800
134	SONDEO PLAYA PARAISO		01.82		2150
135	CULIACAN		05.74		1060
136	HIPOCAMPO (SAN JOSE)		01.54		2700
137	DON HUMBERTO		05.88		1220
138	ZACILHA		04.14		1240
139	SAN JOSE		05.81		3150
140	EL CARACOL		01.97		1880
141	EL MANGUITO		03.71		500
142	EL GAVILAN		06.46		1120
143	DALTON		05.46		800
144	EL PORVENIR		07.01		1020
145	RANCHO SANTA AMELIA		05.05		
146	LOS PICAROS		06.17		2200

TABLA 13

NIVEL ESTÁTICO Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA
DE LOS APROVECHAMIENTOS CENSADOS (1989)

4/4

No.	LOCALIDAD	OCT	DIC	OCT	DIC
MUESTRA		NE/ND*	NE/ND*	C.E.	C.E.
147	RANCHO LOS		07.33		1200
148	LA GLORIA		06.80		2100
150	SMYRNA		08.71		2400
151	TRITURADOS DEL CARIBE		05.03		720
152	MADERERIA PLAYA DEL CARMEN		08.04		1010
153	REST. LAS BUGAMBILIAS				2510
154	REST. XCARET		05.02		1570
156	SAN FRANCISCO		08.70		3000
157	SANTA ROSA		07.0		3200
158	CUATRO HERMANOS		10.40		9800
159	SAN JOSE				7200
160	RANCHO CENOTE AZUL				8800
162	REST. MAYA		09.90		7100
163	KANTENAH		06.00		5200
164	SAN ANTONIO		07.72		8700
165	SAGRADO CORAZON		08.88		7150
166	HOTEL AKUMAL, CANCUN		01.18		6000
167	TIENDA DE ARTESANIAS		07.34		1360
168	EXCAMPAMENTO S. C. T.				2800
170	REST. CRUCERO TULUM		02.47		2800
171	LOS PINOS		02.08		620
172	FCO. UH MAY		16.29		1020
173	COBA ORDAZ		11.53		1090
174	SONDEO COBA		01.13		580

TABLA 3.1

SINTESIS GEOMORFOLOGICA

UNIDAD GEOMORFICA	SUBDIVISIONES	GEOFORMAS	UBICACION	GEOLOGIA
Costera (I)	a) Playas	Playas de barrera largas y angostas.	A lo largo de las costas norte y noroccidentales	Depósitos recientes asociados a la erosión marina
	b) Area de mareas	Lagunas de inundación	Detrás de las playas separando a estas del Continente	Depósitos actuales, provocados por la acción de las mareas
	c) Costera del Caribe	Playas rocosas y angostas, costas abruptas y cortadas. Playas semicirculares, caletas y manantiales submarinos asociados.	A lo largo de las costas de la margen oriental.	Depósitos de alta energía asociada a zonas afalladas y fracturadas.
Planicie Interior (II)	a) Noroccidental	Pequeños hoyos de disolución "karst" desnudo, poco relieve, suelo delgado y discontinuo. Pequeños cenotes hacia al SE.	Hacia la porción noroccidental de la Península de Yucatán-	De origen karstico principalmente en un estado de desarrollo juvenil
	b) Centro-norte	Dolinas de gran diámetro, relieve más acentuado (10-15 m) topografía ondulada	En la porción central y al norte de la península con centro en la población de Tizimin.	Desarrollo Karstico en una madurez temprana
	c) Central-Interior	Cenotes de varios tipos, relieve considerable, gruesos suelos residuales, pequeñas dolinas, domos karsticos y cúpulas, cavernas y pasajes poco desarrollados.	En el centro de la península al norte de la Sierrita de Ticul.	Desarrollo karstico maduro y juvenil, al parecer hubo un truncamiento del primero
Colinas y Valles (III)	a) Sierrita de Ticul (área Puuc)	Alineamiento cenit NW-SE Grandes cavernas	Desde Maxcanú hasta Oxkutzcab con una dirección NW-SE	Asociado a un levantamiento diferencial.
	b) Colinas de Bolonchen	Mayor relieve, grandes espesores de suelos. Poljes de regular tamaño. Macrodomos karsticos	Toda la porción S-SW de la península.	Asociado a esfuerzos compresionales y a diapirismo.
Cuencas Escalonadas (IV)	a) Norte	Cuerpos de agua, cenotes, cúpulas y microdomos karsticos, gruesos suelos en las cuencas, poco relieve	EN de Quintana Roo	Desarrollo karstico juvenil asociado a fallas y fracturas con orientación NESW
	b) Sur	Cuerpos de agua, manantiales, domos y amplios cenotes, relieve mayor que en el norte.	Sur de Quintana Roo al EN del Rio Hondo	Desarrollo karstico maduro-temprano, asociado a las mismas estructuras de bloques afallados.

Tomado de Velázquez (1985)

TABLA 5.1

CONCENTRACIONES MAXIMAS, MINIMAS Y PROMEDIOS DE LAS
PRINCIPALES DETERMINACIONES

ELEMENTO	CONCENTRACION		
	MINIMA (PPM)	MAXIMA (PPM)	PROMEDIO (PPM)
CALCIO	44	188	115
MAGNESIO	7	88	32
SODIO	8	284	82
POTASIO	1	116	28
BICARBONATOS	132	468	285
CLORUROS	30	455	122
SULFATOS	12	575	136

(TOMADO DE LESSER J.M. 1976)

Nº Muestra	OCT C.E. (umohs/cm)	DIC C.E. (umohs/cm)	OCT pH	DIC pH	OCT ALK mg/l CaCO ₃	DIC ALK mg/l CaCO ₃
1	900		7.30		292.5	
2	1433		7.45			
3	929		6.93			
4	920	900	7.00			
5	397		7.87			
6	468		7.62		162.5	
7	20000					
8	20000		7.16			
9	2530	2400	8.00	8.15		305.0
10	1320		7.22			
11	1256		7.05			
12	1208		7.41			
13	638		7.53			
14	502		7.63		142.5	
15	1027		7.15		267.5	
16	936		7.08		260.0	
17	1160		7.09		350.0	
18	3750		7.22		290.0	
19	3740		-----			
20	1338		7.69		270.0	
22	632		7.62		185.0	
23	889		7.10		270.0	
24	1347		7.09		242.5	
25	814	640	7.44	7.0	190.0	282.5
26	909		7.54		227.5	
27	3170	2800	7.05	8.02	310.0	350.0
28	496	481	7.40	7.3	170.0	182.5
29	998	585	7.29	7.6	205.0	160.0
30	2290	2050	7.41	7.5	212.5	195.0
31	4340		7.11		340.0	
32	1594	1300	7.22	7.8	325.0	342.5
33	1571	1400	7.11	7.71	307.5	355.0
34	3250		7.13		335.0	
35	2460	2000	7.44	7.71	297.5	242.5
36	745	650	8.43	7.6	277.5	245.0
37	1453		-----		-----	
38	1104	1050	7.34		327.5	
40	718	725	7.56	7.6	265.0	222.5
41	869	550	7.32	7.41	320.0	140.0
42	853	810	7.35	7.89	322.5	270.0
43	678	490	7.40	7.56	215.0	152.5
44	5100		7.37		362.5	
45	2360		7.12		325.0	

Nº Muestra	OCT C.E. (umohs/cm)	DIC C.E. (umohs/cm)	OCT pH	DIC pH	OCT ALK mg/l CaCO3	DIC ALK mg/l CaCO3
46	2760	2500	7.12	7.75	322.5	302.5
47	8940	7400	7.01	8.44	347.5	342.5
48	6110	5500	7.33	7.43	-----	327.5
49	883	920	7.53	7.60	290.0	250.0
50	5100	5300	7.58	8.28	317.5	312.5
51	553		7.52		180.0	
52	280	270	7.65	6.40	150.0	
53	580	580	7.92	7.60	252.5	230.0
54	1902	1700	7.64	7.81	220.0	202.5
55	3150		7.26		360.0	
56	2040		7.37		327.3	
57	1970	2040	7.27	7.60	317.5	312.5
58	1464	1180	7.6	7.94	230.0	225.0
59	3770	2400	8.02	7.99	237.5	180.0
60	1620	1150	7.08	8.15	337.5	312.5
61	1148	1020	7.16	7.8	335.0	277.5
62	1682	1220	7.28	8.09	-----	245.0
63	730	660	7.20	7.35	297.5	285.0
64	1179	1100	7.07	7.86	350.0	320.5
65	1040	950	7.49	7.51	322.5	245.0
66	907		7.62		320.0	
67		950	-----	7.7	-----	285.0
68 B	962		-----		357.5	
68		1140	-----	8.06	-----	227.5
69	513	500	7.20		230.0	
70	938		7.06		330.0	
71	986	935	7.28		355.0	
72	838		7.22		330.0	
74		417	7.24	7.6	-----	192.5
75	723	709	7.14	7.1	332.5	305.0
76	838	824	7.11	7.1	340.0	250.0
77	1120		7.46		325.0	
78	860		7.33		252.0	
79	1257		7.36		292.5	
80	1897		7.05		302.5	
83	770	620	7.75	7.92	247.5	187.5
84	5610	4200	7.37	8.31	300.0	272.5
85	716	800	8.14	7.54	147.5	212.5
86	1976		7.58		232.5	
87		1151		7.7		187.5
88		508		7.7		125.0
89		781		7.4		230.0
90		475		7.3		200.0
91		672		7.3		250.0

Nº Muestra	OCT C.E. (umols/cm)	DIC C.E. (umols/cm)	OCT pH	DIC pH	OCT ALK mg/l CaCO3	DIC ALK mg/l CaCO3
92		1195		7.3		292.5
93		987		7.3		250.0
94		895		7.8		
95		1137		7.5		250.0
97		706		7.6		125.0
98		1421		7.2		280.0
99		781		7.0		285.0
99 B		787		7.5		302.5
100		921		7.1		335.0
101		880		7.14		195.0
102		800		7.1		195.0
103		1020		7.15		187.5
105		750		7.01		207.5
106		780		7.03		215.0
107		860		7.06		305.0
108		600		6.85		323.5
109		660		6.92		175.0
111		1243		7.1		300.0
112		800		6.95		192.5
113		720		6.85		267.5
114		1600		7.21		440.0
115		860		7.14		212.0
116		860		7.08		225.0
118		920		7.05		277.5
119		680		6.97		255.0
120		900		7.16		255.0
121		860		7.11		260.0
122		720		7.04		255.0
123		680		7.02		157.5
124		870		6.97		240.0
125		890		7.06		245.0
126		660		6.96		312.5
127		980		7.22		255.0
129		880		7.97		167.5
130		650		7.7		277.5
131		470		6.96		210.00
132		550		6.96		212.5
133		800		6.85		577.5
134		2150		7.64		405.0
135		1060		7.42		237.5
136		2700		7.8		312.5
137		1220		7.67		227.5
138		1240		7.66		212.5
139		3150		7.87		327.5

Nº Muestra	OCT C.E. ($\mu\text{mols/cm}$)	DIC C.E. ($\mu\text{mols/cm}$)	OCT pH	DIC pH	OCT ALK mg/l CaCO ₃	DIC ALK mg/l CaCO ₃
140		1880		8.10		337.5
141		500		7.61		175.0
142		1120		7.46		230.0
143		600		7.45		207.5
144		1020		7.49		165.0
146		2200		7.95		125.0
147		1200		7.16		222.5
148		2100		8.17		207.5
150		2400		7.72		337.5
151		720		7.72		337.5
152		1010		7.2		287.5
153		2510		7.95		337.5
154		1570		7.6		287.5
156		3000		7.75		295.0
157		3200		8.21		310.0
158		9800		8.6		295.0
159		7200		8.24		312.5
160		8800		8.25		302.5
162		7100		7.92		307.5
163		5200		8.26		330.0
164		8700		8.2		312.5
165		7150		8.11		355.0
166		6000		8.17		320.0
167		1360		7.45		212.5
168		2800		7.68		355.0
170		2080		7.62		
171		620		8.90		
172		1020		6.90		
173		1090		8.1		
174		580		7.15		

TABLA 5.3

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO-QUIMICOS DE LOS PRINCIPALES IONES

#	Ca	Mg	Na	HCO3	Cl	SO4	STD	PH	NO3	DUREZA TOTAL	ALK (mg/l) (CaCO3)
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l					
10	89	29	90	301	253	46	750	7.29	1	340	247
14	59	13	17	130	40	40	325	7.04	1	209	107
16	107	21	70	324	100	38	450	7.02	0	353	266
32	64	72	80	350	287	69	650	8.50	1	460	287
38	139	8	120	301	153	307	675	6.68	1	380	247
40	56	34	30	235	100	46	450	7.62	1	280	193
52	37	3	103	113	33	207	150	8.50	0	107	93
53	48	21	108	284	67	38	350	7.72	1	207	233
57	112	37	150	293	427	192	1450	7.60	0	433	240
60	131	40	150	390	293	61	1200	8.56	21.50	493	320
65	91	29	41	300	120	15	625	6.77	2	347	246
68	112	34	20	350	53	46	775	7.33	0	420	287
71	104	32	48	342	107	46	650	8.28	1.50	393	260
75	85	29	44	293	49	15	350	6.76	0	333	240
76	107	29	30	423	67	20	425	7.10	50	387	347
78	93	18	130	260	173	31	575	7.38	5	307	213
79	69	43	110	260	227	46	650	7.32	1.50	353	213
80	117	34	110	284	400	123	1325	7.58	1.50	433	233
85	27	22	81	204	193	169	675	8.65	0	160	167
6	56	10	60	154	47	61	425	7.86	0	180	126
9	88	67	600	260	633	102.40	1700	7.30	0	500	213
28	32	19	100	178	47	46	325	7.97	0	213	146
46	77	85	377	326	640	384	1875	7.56	1.50	547	267
50	83	11	250	366	346	77	625	7.50	1	253	300
63	83	37	70	317	180	31	450	7.15	1.80	360	260
74	71	19	48	234	21	46	265	8.10	1.50	257	192
77	91	48	76	317	160	61	850	7.79	1.50	427	260
1	101	13	124	284	100	200	780	8.75	1	287	233
3	72	41	24	333	93	13	525	8.28	1	353	273
25	96	13	20	235	127	38	600	8.27	0	283	193
27	88	83	200	326	900	77	1750	7.26	1	567	267
30	160	35	200	285	300	320	1875	8.45	0	547	234
35	53	80	150	268	553	192	1300	7.62	5	467	220
36	83	21	50	288	53	92	600	8.76	1.50	293	220
41	75	40	30	324	100	40	650	7	58	353	266
43	77	29	21	260	67	46	500	7.20	5	313	213
48	144	120	1518	317	1000	1832	3950	7.20	5	860	260
54	80	37	670	195	427	937	950	7.17	1	363	160
58	83	30	150	244	280	399	1125	7.40	34.20	333	200
59	130	73	500	1327	1000	1024	2925	7.90	1	633	186
61	59	58	100	349	173	23	250	7.73	1	387	286
62	197	11	100	235	193	530	890	7.28	0	540	193
64	131	24	80	350	180	100	825	8.18	1	427	287
69	69	13	48	187	7	15	300	6.95	5	227	153
84	128	123	1000	342	320	4288	1975	7.01	0	833	280
90	88	13	30	263	21	5	308	8.10	1.00	276	216
91	92	19	25	307	46	13	1975	8.15	1.80	308	252
95	119	33	30	327	95	43	308	8.15	8.10	437	268
99	147	21	20	356	42	11	420	8.15	12.10	455	292
100	129	36	25	341	86	16	715	7.90	5.60	474	280
111	138	41	45	396	186	25	780	8.25	1.50	516	325

TABLA 5.4

MODELO DE AJUSTE PARA S.T.D. vs C.E.

VARIABLE INDEPENDIENTE	coeficiente	s.t.d. error	t-value	sig. nivel
CONDUCTIVIDAD	0.734432	0.02971	24.7203	0.0000

R-SQ. (ADJ)= 0.9174

SE= 384.657169

MAE=208.761783

DurbWat=1.755

TABLA 5.5

RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICOS Y DE PARAMETROS
FISICO-QUIMICOS EN MUESTRA A PROFUNDIDAD

NUMERO DE MUESTRA	LOCALIDAD	PROFUNDIDAD (M) *	C a		M g		N a		HCO ₃		Cl		SO ₄		S.T.D.	C.E. (Umohs/cm)	p.H.	ALK. TOTAL (mg/l)
			mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l				
9.00	CHEMUYIL	SUPERFICIE	88	4.39	67	5.53	600	49.56	274	4.49	633	17.86	102.4	21.32	1700	2530	8	213
9.05		5	123	6.14	61	5.04	—	—	213	3.49	640	18.05	292	44.76	1925	2740	7.21	300
9.15		15	72	3.59	93	7.68	977	129.43	140	2.29	653	18.42	315	48.3	11475	2720	7.16	274
9.20		20	275	13.72	750	61.95	5520	731.3	146	2.39	11597	327.15	3328	510.2	15625	+20000	7.07	213
9.30		30	434	21.65	918	75.83	8414	1115.3	267	4.38	15428	435.22	2816	431.7	31275	-20000	6.95	173
9.45		45	400	19.95	1118	92.35	—	—	300	4.52	17329	489.85	4800	735.9	35400	-20000	7.14	146
74.00	AGUA AZUL	SUPERFICIE	71	3.54	19	1.57	—	—	—	—	21	0.59	—	—	265	417	7.80	192.80
74.05		5	53	2.64	26	2.15	78	6.44	267	4.36	107	3.02	46.08	0.95	400	563	7.04	200
74.15		15	69	3.44	32	2.64	—	—	234	3.84	113	3.19	—	—	525	653	7.31	200
74.20		20	53	2.64	46	3.80	521	43.03	220	3.61	200	5.64	21.42	21.42	1700	714	7.08	259

* PROFUNDIDAD MEDIDA A PARTIR DEL NIVEL FREATICO (METROS).

TABLA 6.1

NIVELACION TOPOGRAFICA DE APROVECHAMIENTO

TIPO-NUMERO	ELEVACION (m)	TIPO-NUMERO	ELEVACION (m)
NORIA 04	7.316	POZO 60	16.081
CENOTE 09	8.851	NORIA 61	21.034
NORIA 25	7.447	NORIA 62	6.019
NORIA 27	2.323	CENOTE 63	15.697
CENOTE 28	5.325	NORIA 64	21.341
NORIA 29	6.060	POZO 65	22.246
NORIA 30	7.935	POZO 66	22.865
POZO 32	11.363	POZO 67	11.719
NORIA 35	6.536	POZO 68	16.763
NORIA 36	6.821	POZO 69	6.82
POZO 38	20.427	POZO 71	7.194
POZO 40	17.603	POZO 74	70.535
POZO 41	16.857	POZO 75	4.513
POZO 42	19.256	POZO 76	9.954
NORIA 43	5.739	NORIA 83	2.250
CENOTE 46	1.603	NORIA 84	8.668
NORIA 48	7.377	POZO 85	4.252
NORIA 49	1.455	NORIA 87	3.984
CENOTE 50	1.309	NORIA 90	4.142
POZO 52	5.018	NORIA 91	5.233
POZO 53	11.072	NORIA 98	5.413
NORIA 54	3.419	NORIA 99	10.729
POZO 57	2.552	NORIA 100	13.675
NORIA 58	3.456	NORIA 111	12.576
NORIA 59	7.854	NORIA 125	7.171
		NORIA 162	9.668

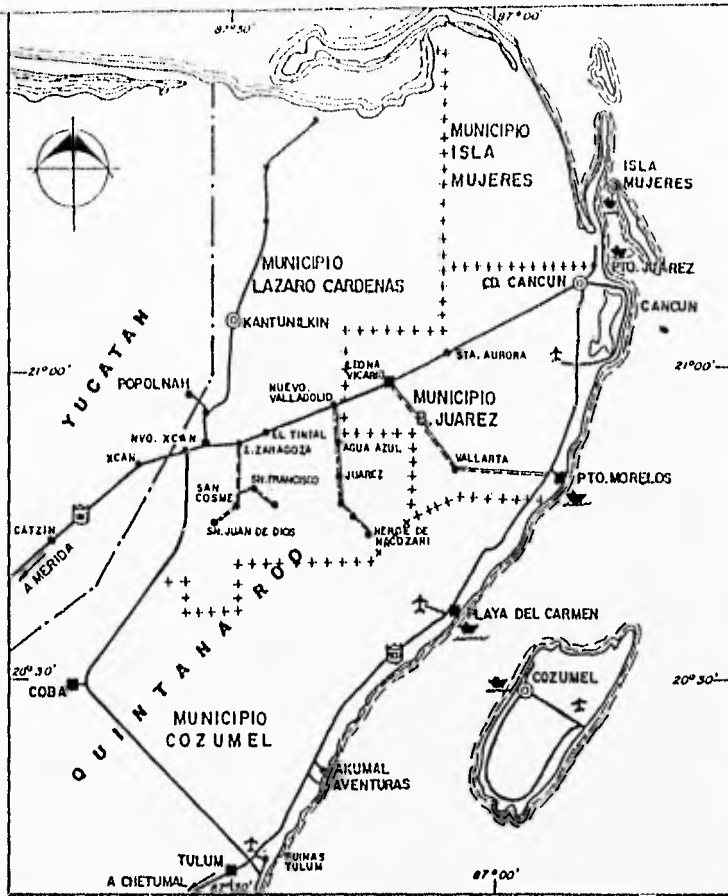
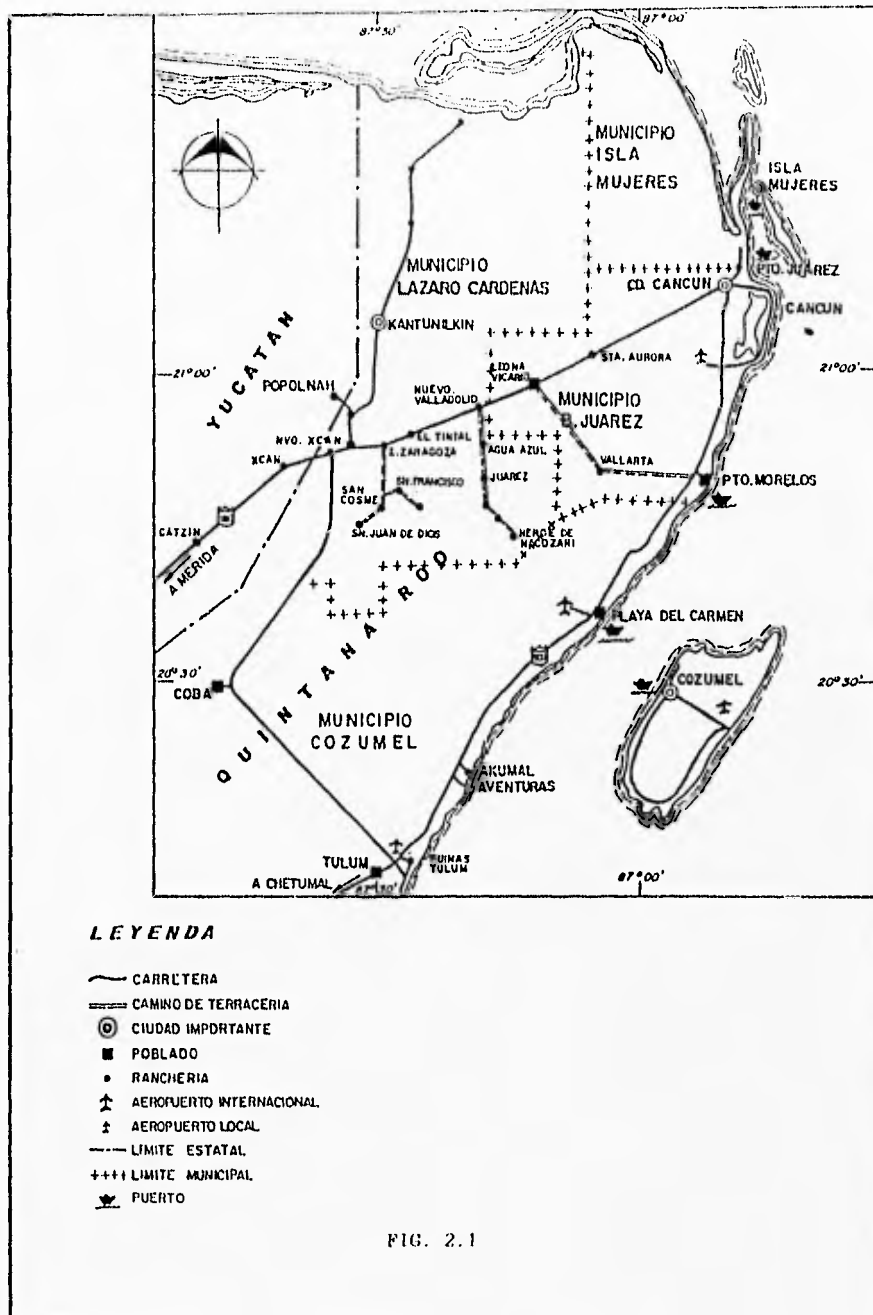
TABLA 6.2

RELACION DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA Y
pH DE MANANTIALES COSTEROS
(DICIEMBRE 1989)

LOCALIDAD	SALIDA DE AGUA		AGUA DE MAR	
	C.E. (UMOHS/CM)	pH	C.E.	pH
P. YAX-ETZEB	10,800	8.1		
Xel - Ha SUP.	15,000	8.2		
Xel - Ha 0.5 m	17,500	8.1		
Xel - Ha 1.7 m	20,500	8.5		
CHEMUYIL	7,400	8.0		
AKUMAL	16,600	7.9	22,000	8.17
PTO. AVENTURAS	19,400	8.20	23,500	8.21
XCARET	15,200	8.5		
P. XCALACOCO	6,000	8.3	31,000	9.3
P. CARACOL	1,000	7.0		

ANEXO No. 2

FIGURAS



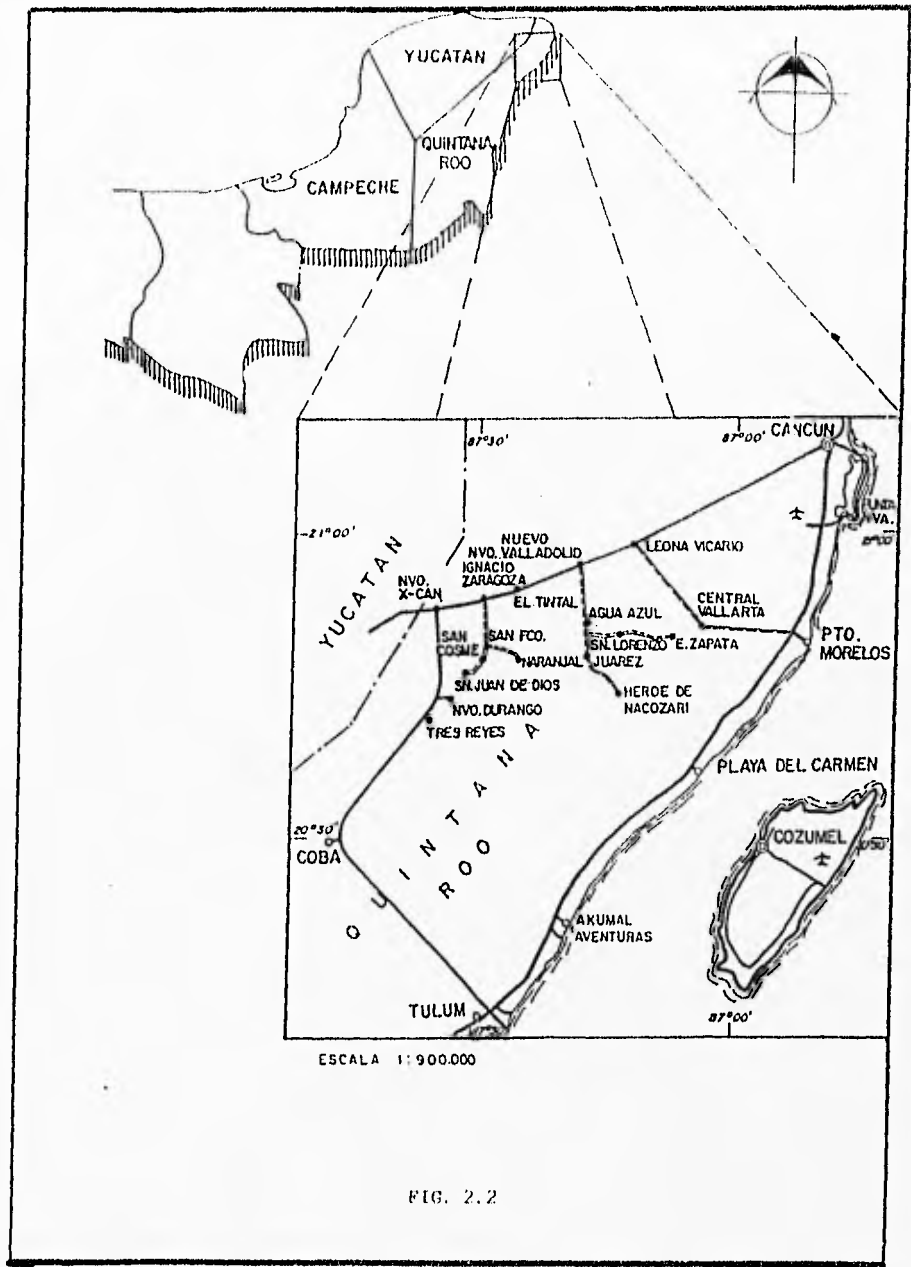
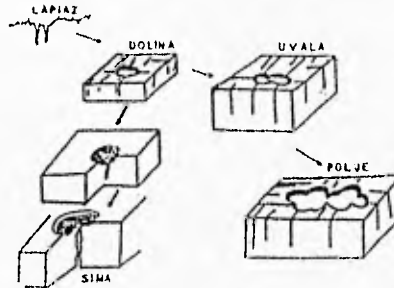
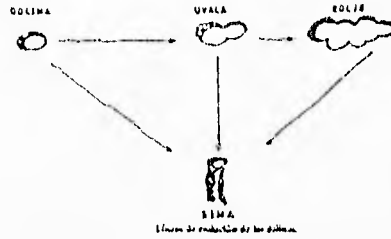
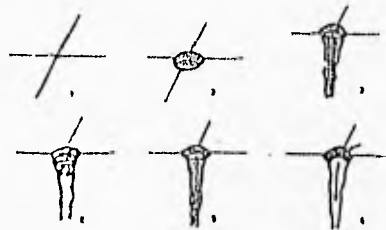


FIG. 2.2

FORMAS CARSTICAS



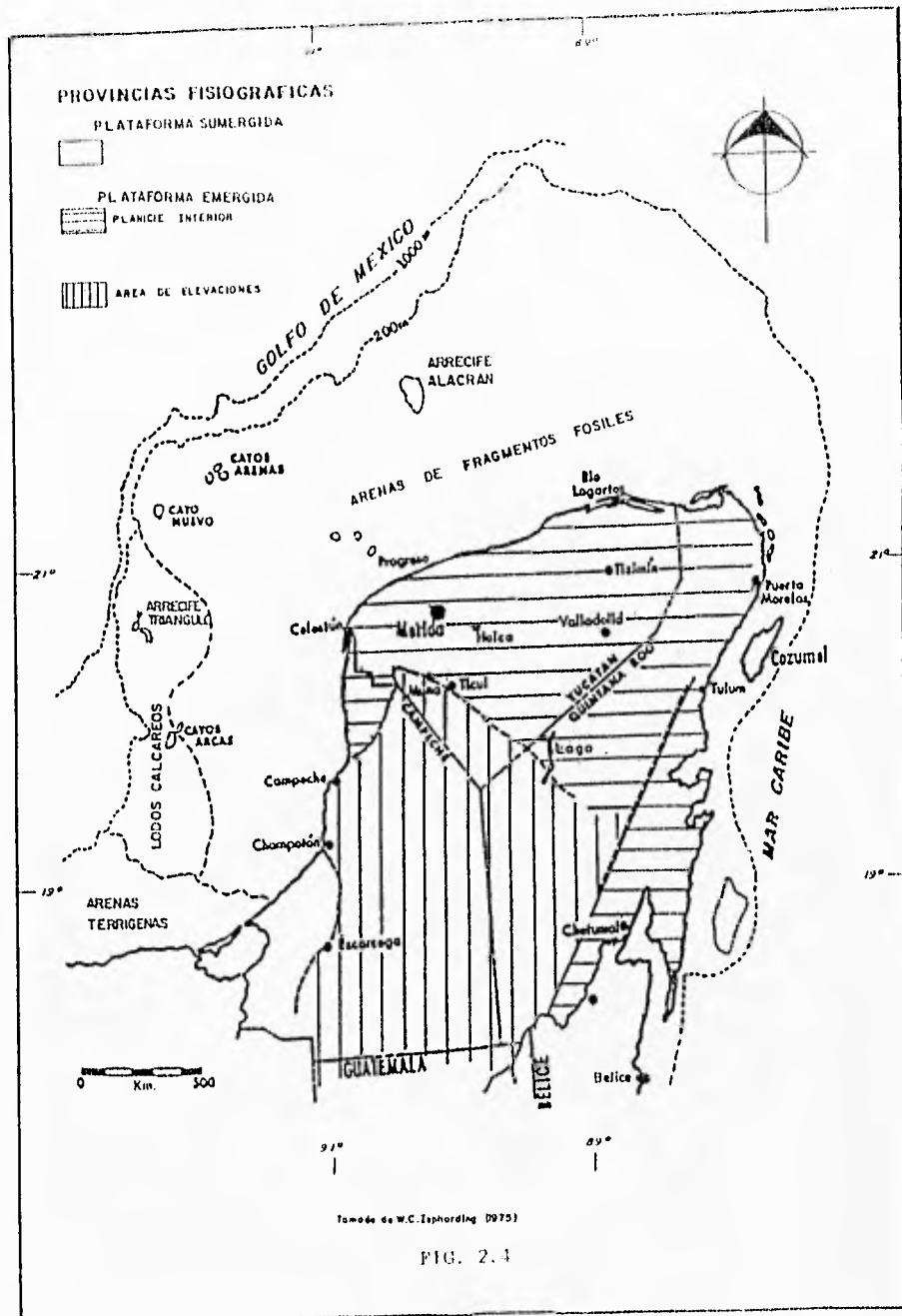
Relación entre el lapiaz y otras formas de absorción



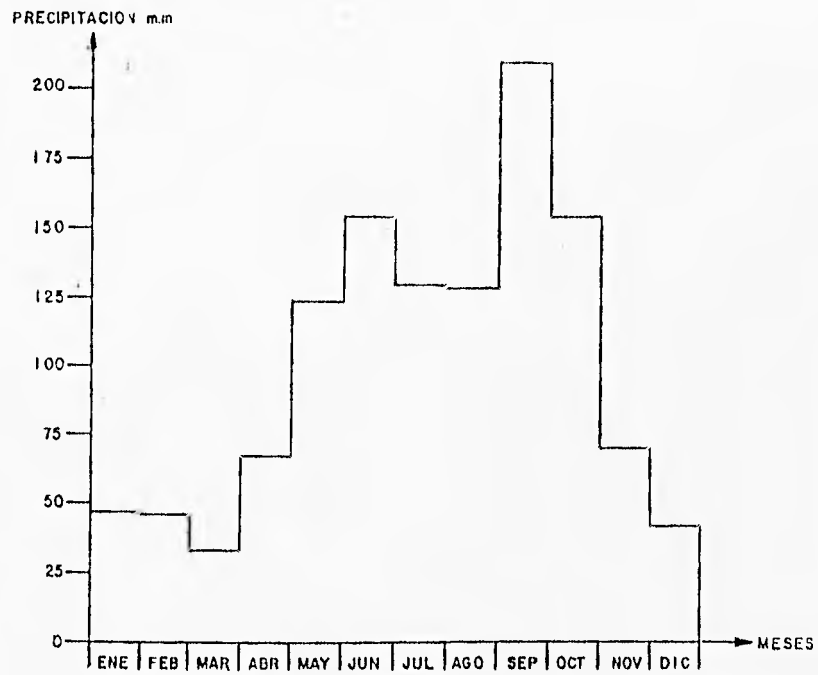
Evolución de dolinas desde la lluvia
 1: Sistema de diaclasas. 2: Depresión circular embudoiforme. 3, 4 y 5: Desarrollo de la dolina en profundidad. 6: Sima - sumidero partiendo de una dolina.

También de Lapie (1970)

FIG. 2.3

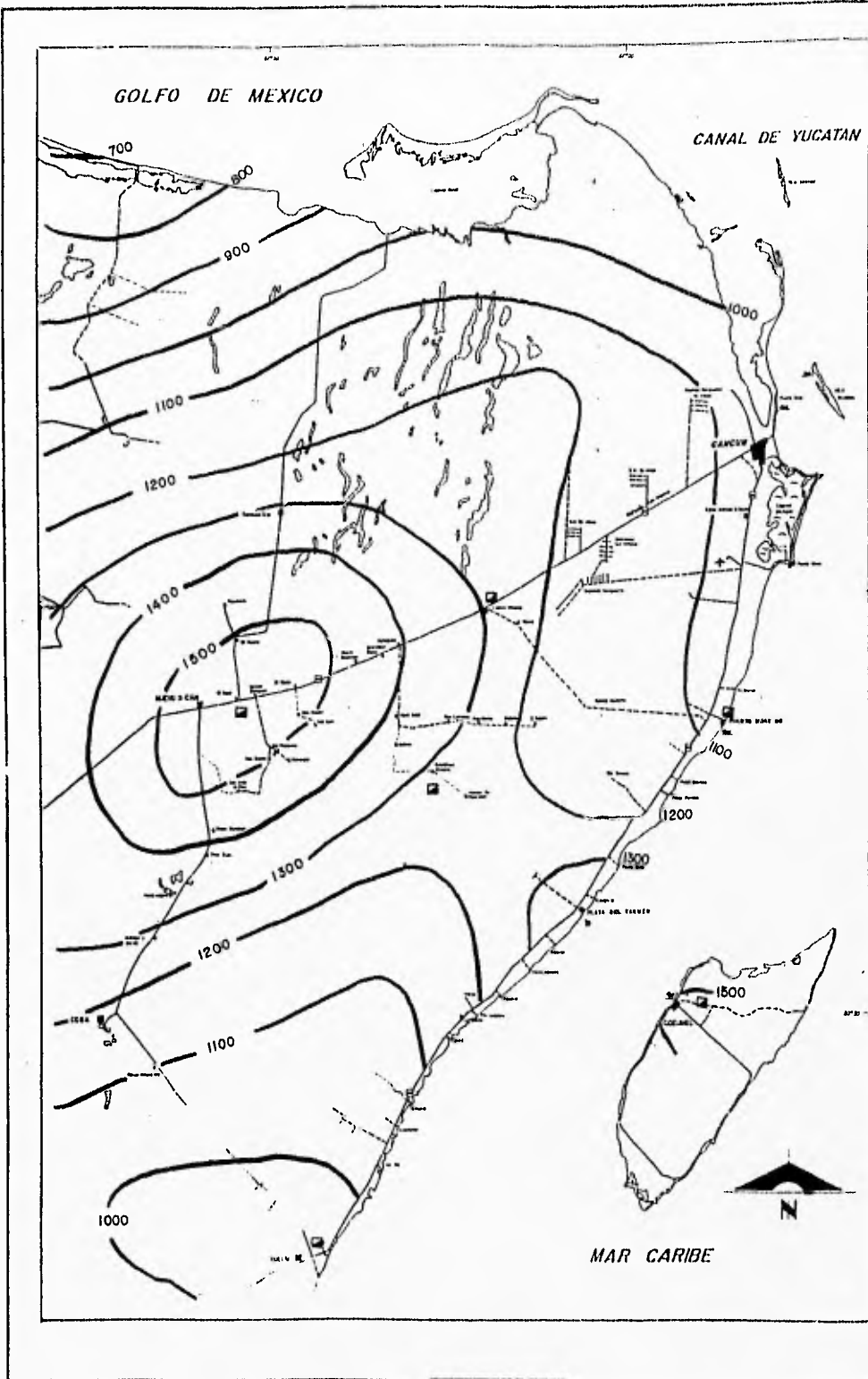


ESTACION
LEONA VICARIO



PRECIPITACION MEDIA MENSUAL
PERIODO DE 1965-1979

FIG. 2.5

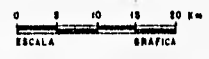


LEYENDA

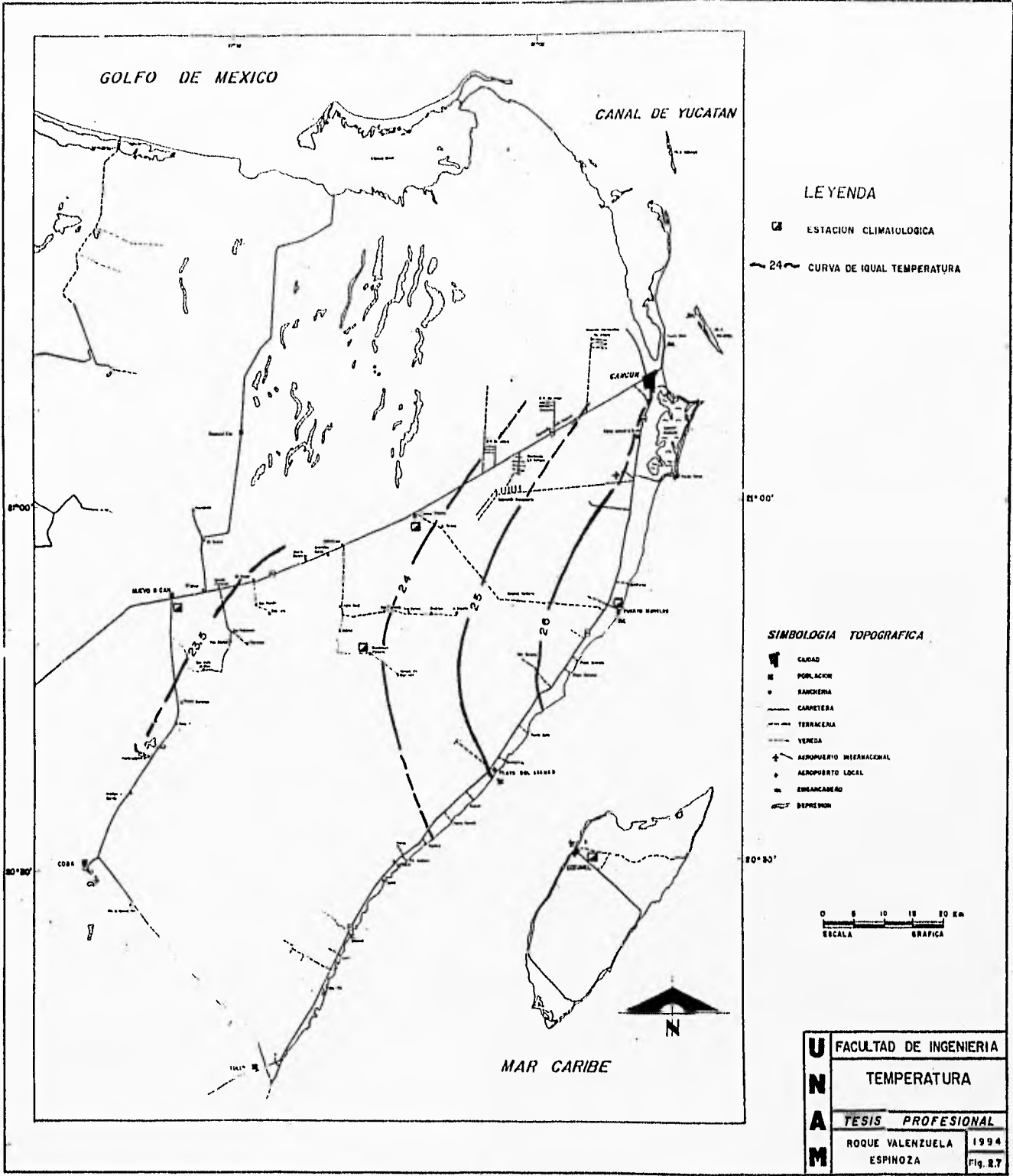
- ESTACION CLIMATOLOGICA
- CURVA DE IGUAL PRECIPITACION MEDIA ANUAL

SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

- CUBRIDO
- POBLACION
- RANCHERIA
- CARRETERA
- TERRACENA
- VENEZA
- AEROPUERTO INTERNACIONAL
- AEROPUERTO LOCAL
- EMBARCADERO
- SEPALDON



U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	PLANO DE ISOYETAS	
	TESIS PROFESIONAL	
	ROQUE VALENZUELA ESPINOZA	1994 FIG. 2.8

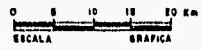


LEYENDA

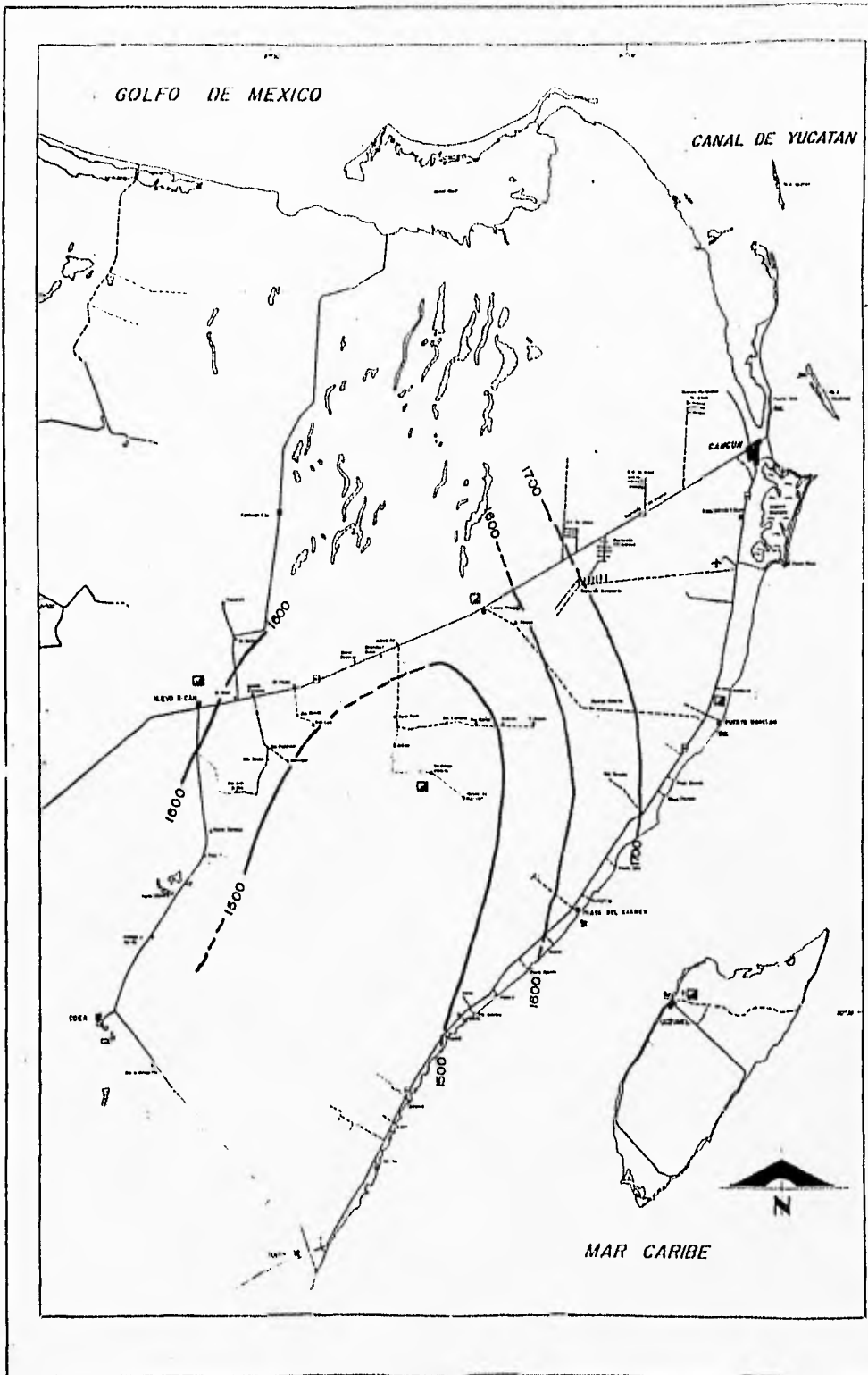
- ☐ ESTACION CLIMATOLOGICA
- 24 — CURVA DE IGUAL TEMPERATURA

SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

- ☐ CIUDAD
- POBLACION
- RANCHERIA
- CARRETERA
- TERRACERA
- VENDA
- ✈ AEROPUERTO INTERNACIONAL
- AEROPUERTO LOCAL
- EMBARCADERO
- ☒ DEPRESION



U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	TEMPERATURA	
	TESIS PROFESIONAL	
	ROQUE VALENZUELA	1994
	ESPINOZA	Fig. 2.7

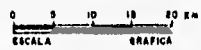


LEYENDA

- ESTACION CLIMATOLÓGICA
- 1600 CURVAS DE IGUAL VALOR DE EVAPORACION

SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

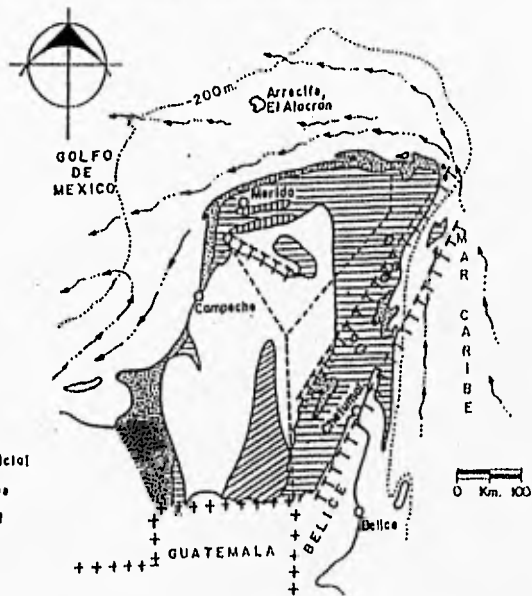
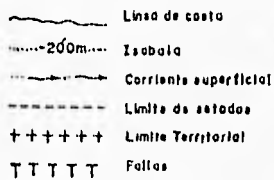
- CIUDAD
- PUEBLAZON
- RANCHERIA
- CARRETERA
- - - TERRACERA
- - - VEREDA
- ✚ MENDOLLETO INTERMUNICIPAL
- ✚ AEROPUERTO LOCAL
- EMBARCADERO
- ☪ DEPRESION



U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	EVAPORACION POTENCIAL	
	TESIS PROFESIONAL	
	ROQUE VALENZUELA ESPINOZA	1994 Fig. 2.8

UNIDADES ESTRATIGRAFICAS

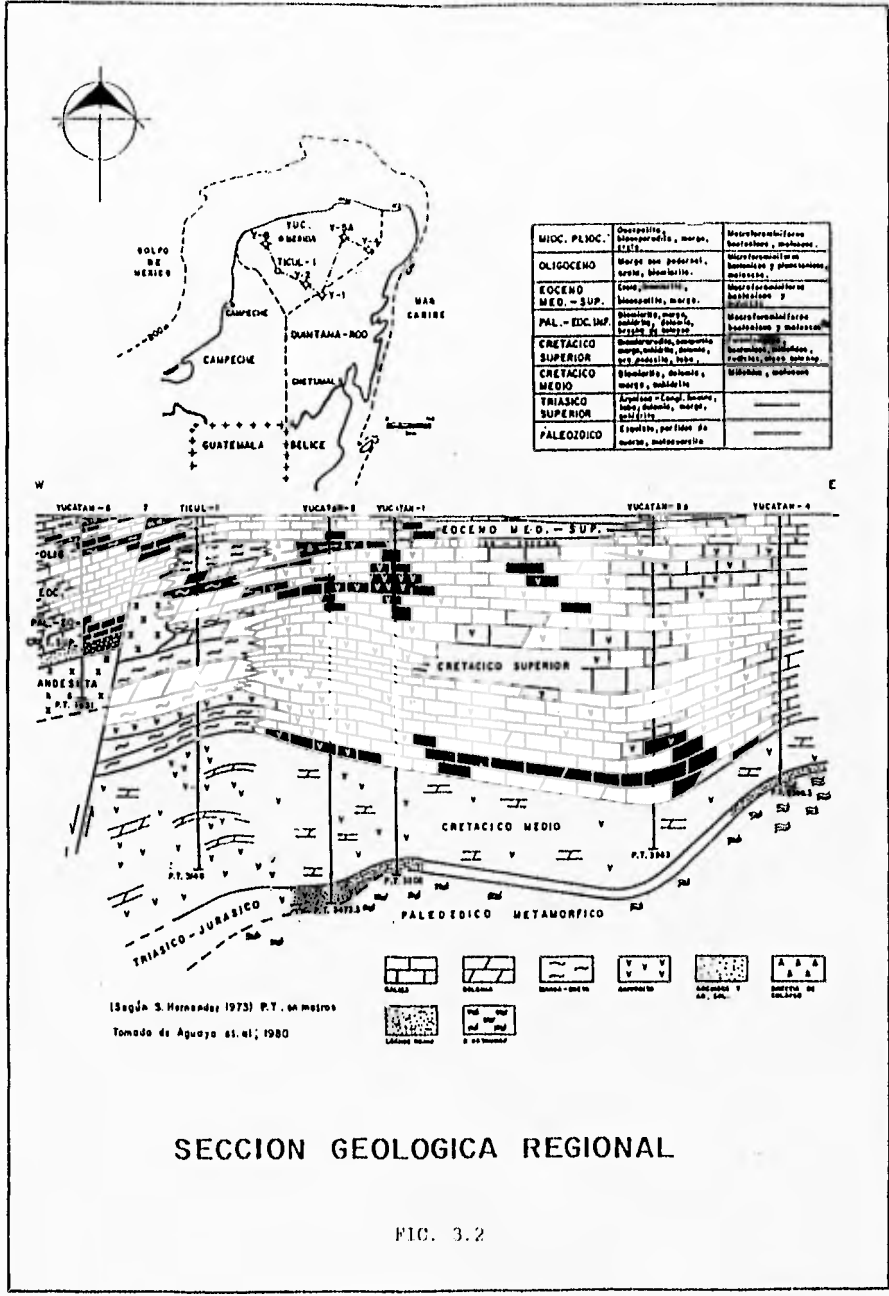
	PORCION NORTE	PORCION SUR Y CENTRAL	PORCION ORIENTAL
HOLOCENO PLEISTOCENO	SIN NOMBRE (Seds. calcareas)		SIN NOMBRE (Seds. calcareas)
PLIOCENO	CARRILLO-PUERTO (calizas)	INDIFERENCIADO	CARRILLO-PUERTO (calizas) ESTERO-FRANCO (calizas y dolomias) BACALAR (calizas y margas)
MIOCENO			
OLIGOCENO	SIN NOMBRE (Lutita, caliza, margas)		
EOCENO	CHUMBEC (calizas) PISTE (calizas)	CHUMBEC (calizas) PISTE (caliza, dolomia) XCABAL (caliza, dolomia)	INDIFERENCIADO
PALEOCENO			ICAICHE
CRETACICO SUP.	Lutita, margas, caliza.	ICAICHE (caliza, dolomia, evaporita) PETEN (?) (calizas)	PETEN (?) (calizas)



Segun Butlering y Bonet (en Aguayo et al; 1980)

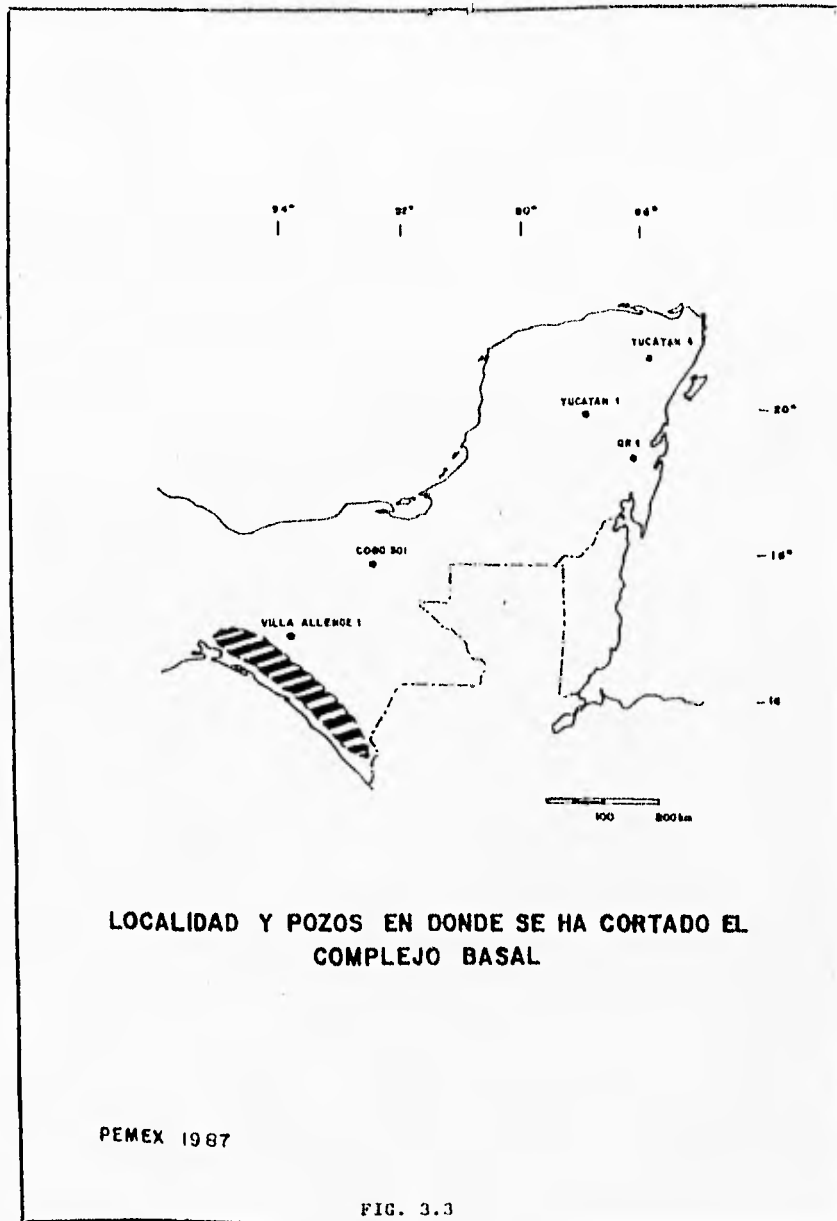
GEOLOGIA REGIONAL

FIG. 3.1



SECCION GEOLOGICA REGIONAL

FIG. 3.2



LOCALIDAD Y POZOS EN DONDE SE HA CORTADO EL COMPLEJO BASAL

PEMEX 1987

FIG. 3.3

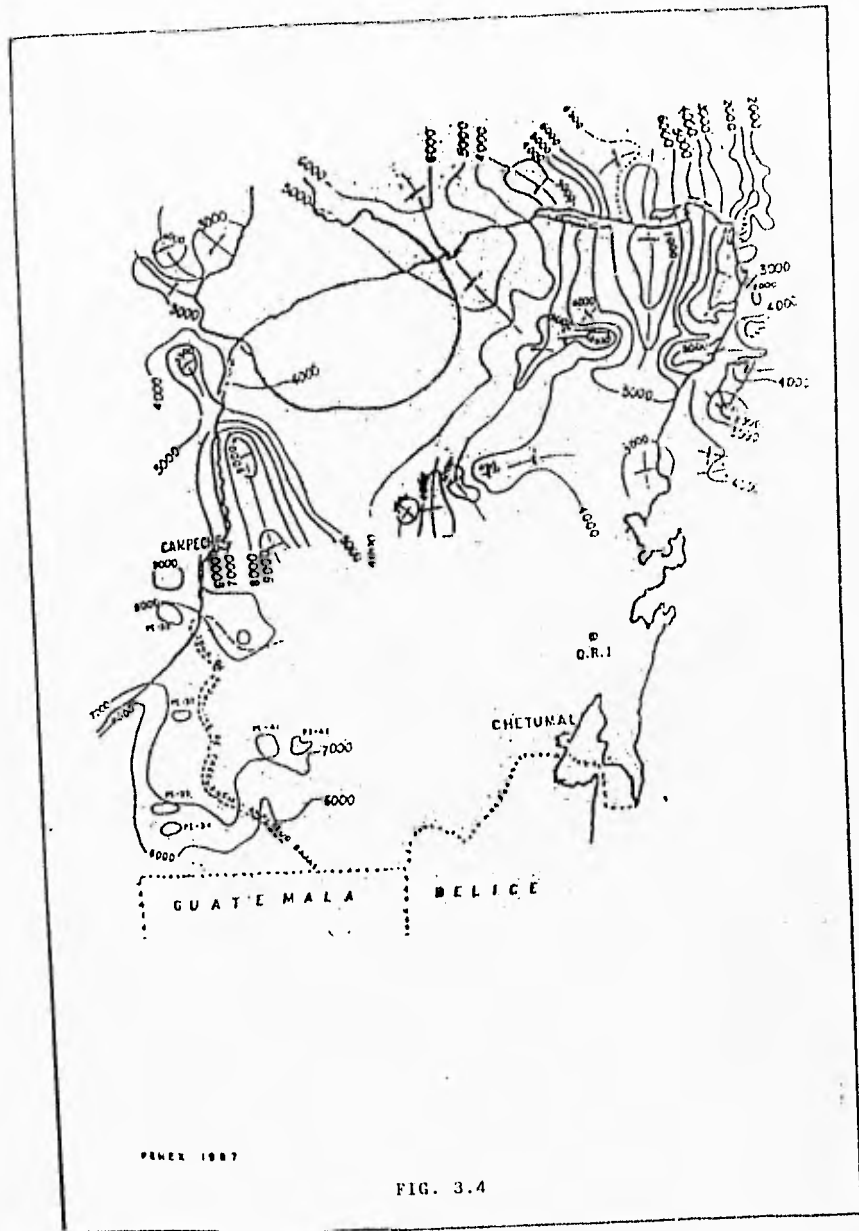
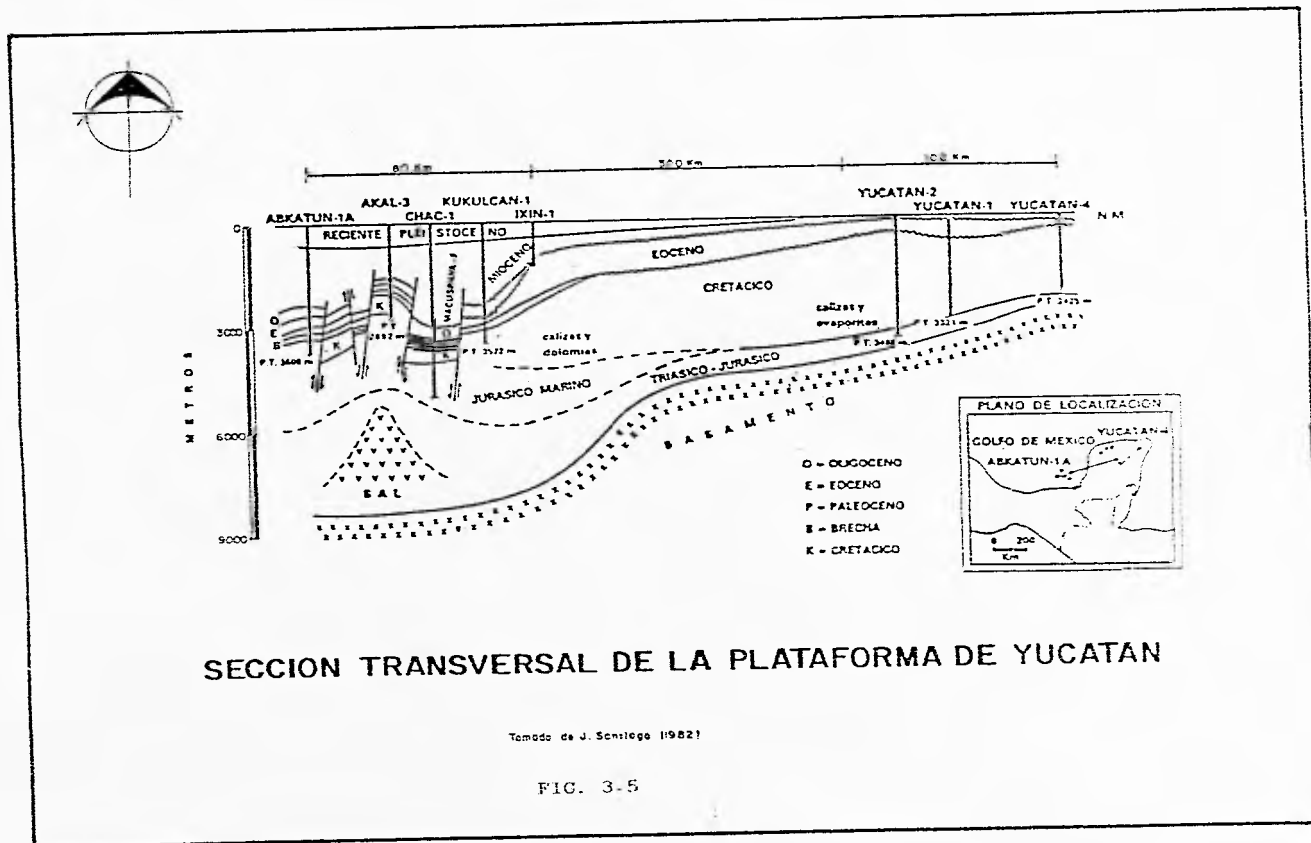


FIG. 3.4



SECCION TRANSVERSAL DE LA PLATAFORMA DE YUCATAN

Tomado de J. Sanstego (1982)

FIG. 3-5

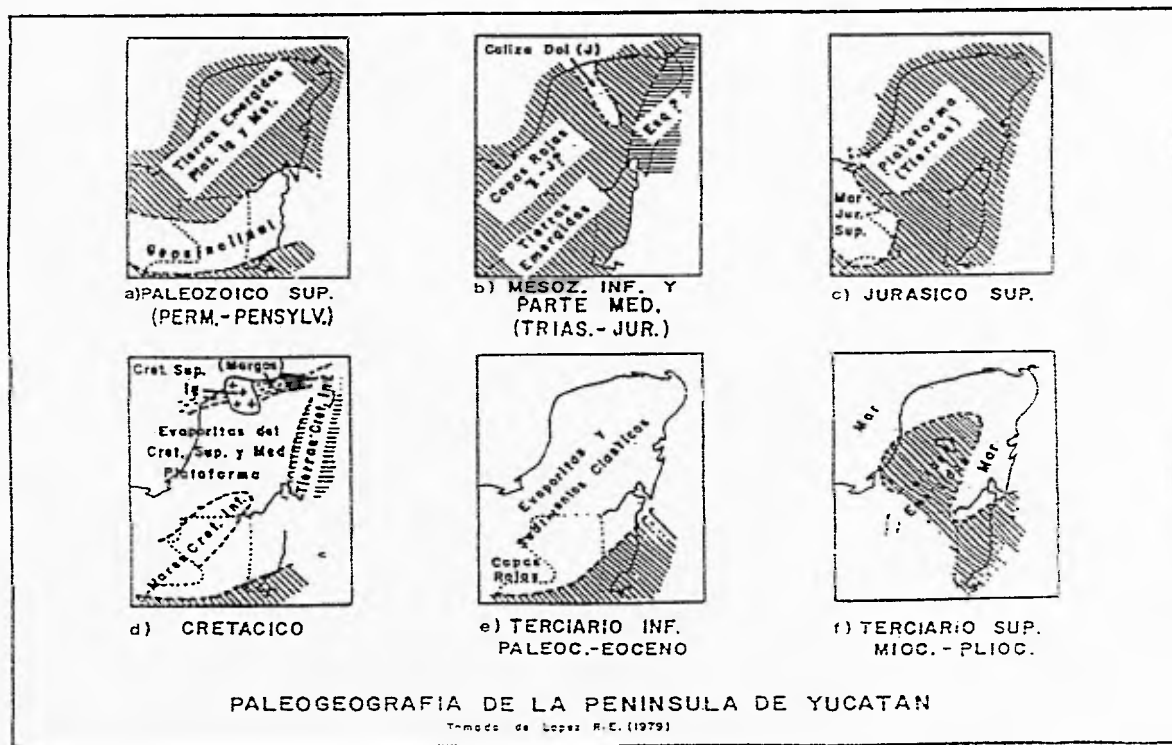
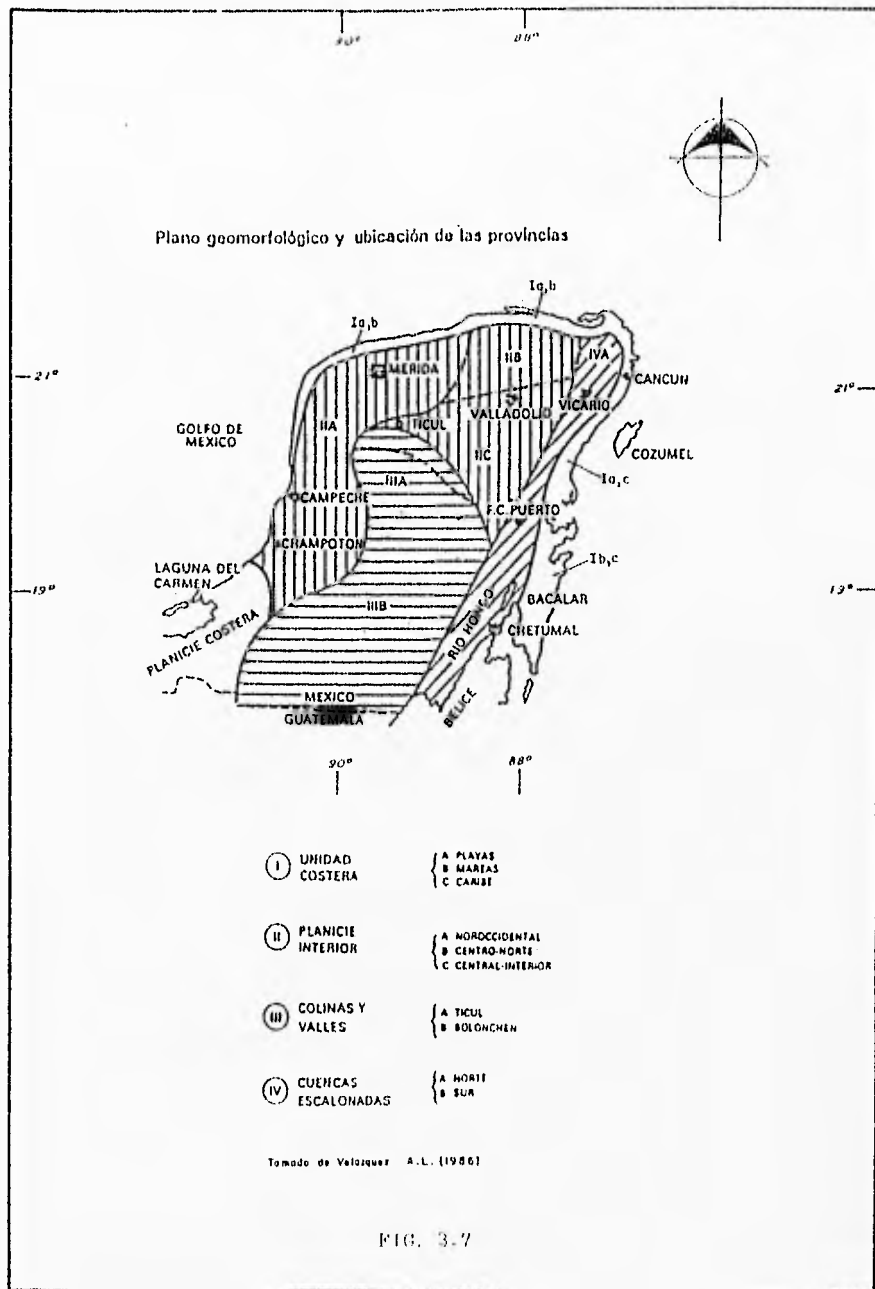
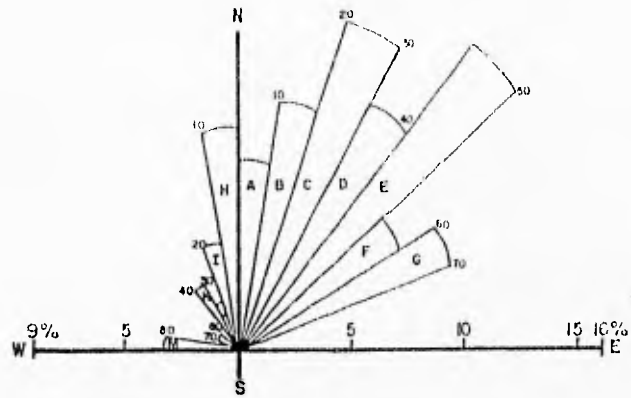
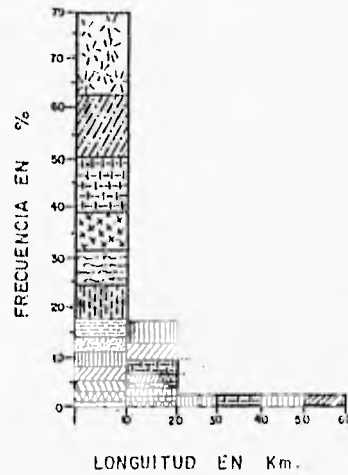
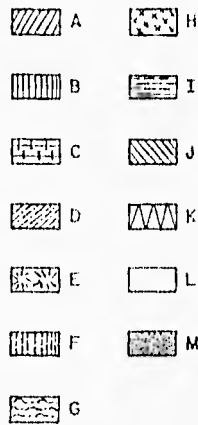


FIG. 3.6





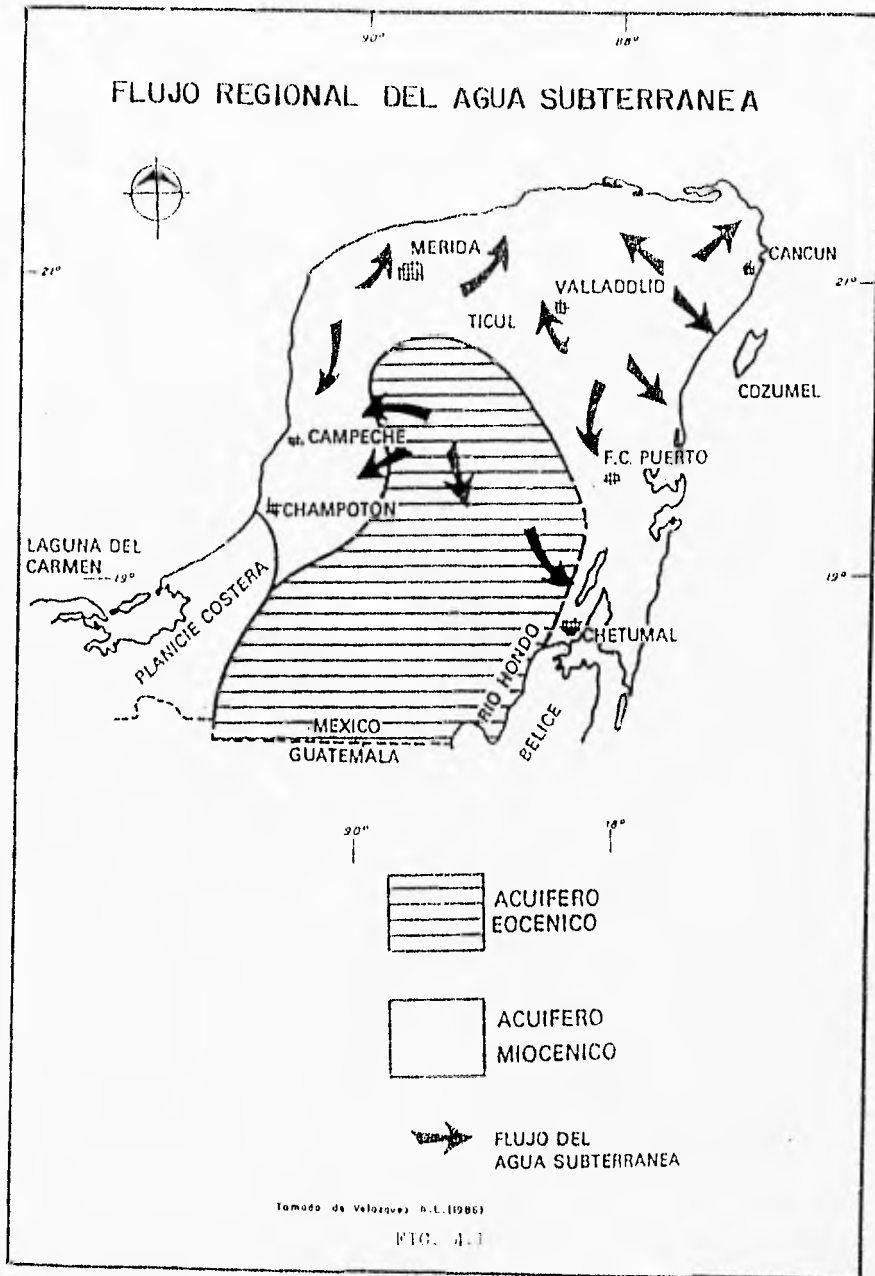
a) ROSETA DE FRACTURAS



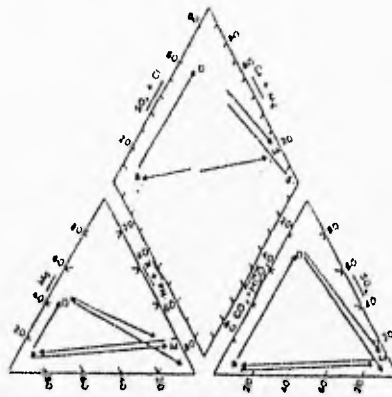
b) FAMILIA DE FRACTURAS

RELACION DE FRECUENCIA Y LONGITUD DE FRACTURAS

FIG. 3.8



Modelo esquemático de la evolución del carácter
geoquímico del agua en acuíferos carbonatados



Trayectorias de reacción

R-M ENRIQUECIMIENTO MEZCLA-DISOLUCIÓN EN ZONA DE DISPERSIÓN

R RECARGA

R-D DISOLUCIÓN DE CALCITA DOLOMITA Y YESO EVOLUCIONANDO
EN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO

O DESCARGA

D-M DOLOMITIZACIÓN

M MAR

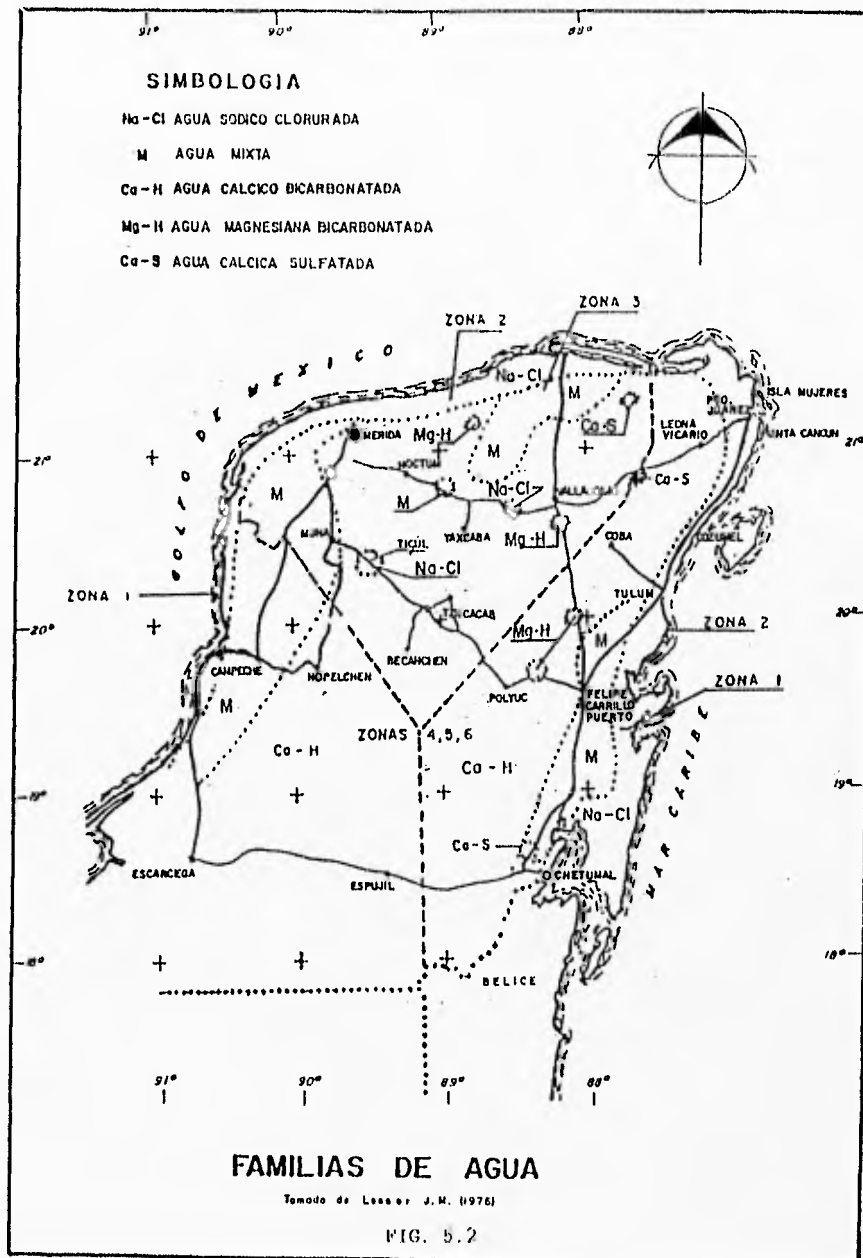
D-S DISOLUCIÓN DE HALITA INICIAL

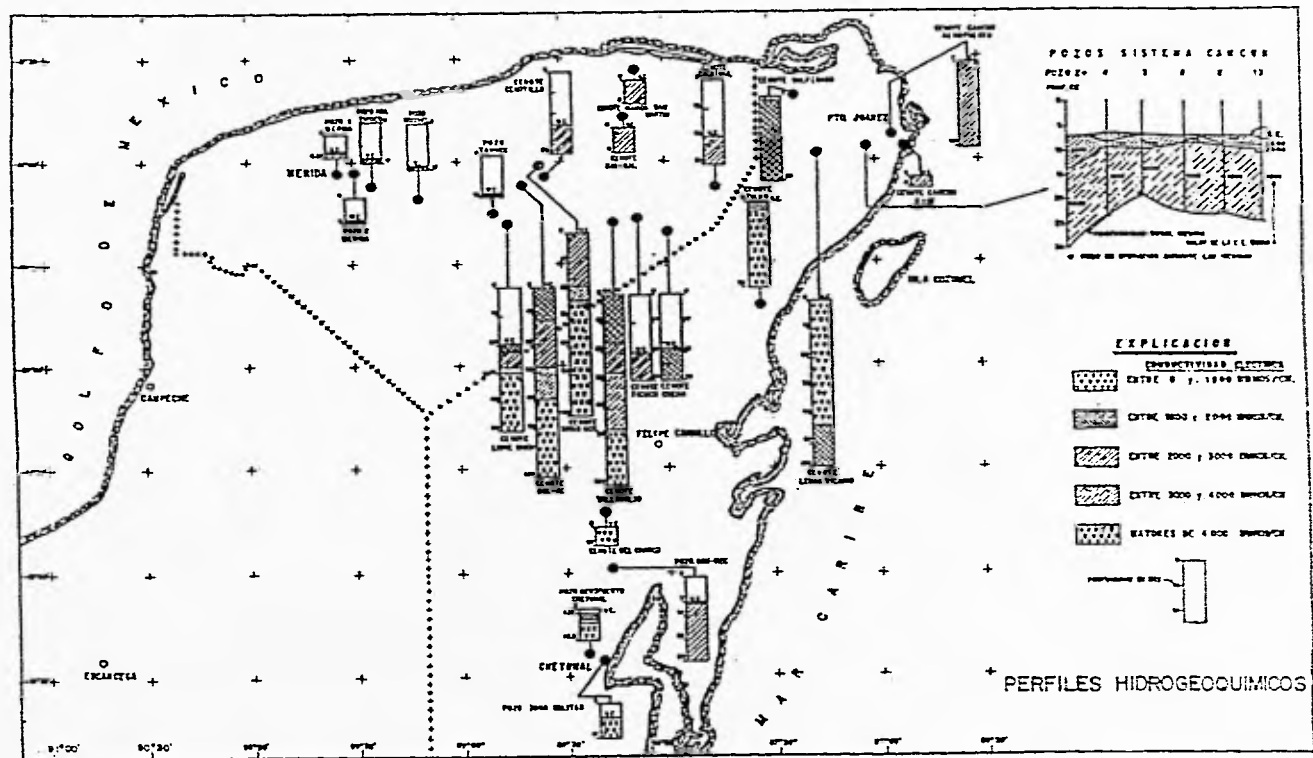
S SALMUERA

MODIFICADO DE BACK Y HANSHAW (1974).

Tomado de Velaquez A.L. (1986)

FIG. 5.1





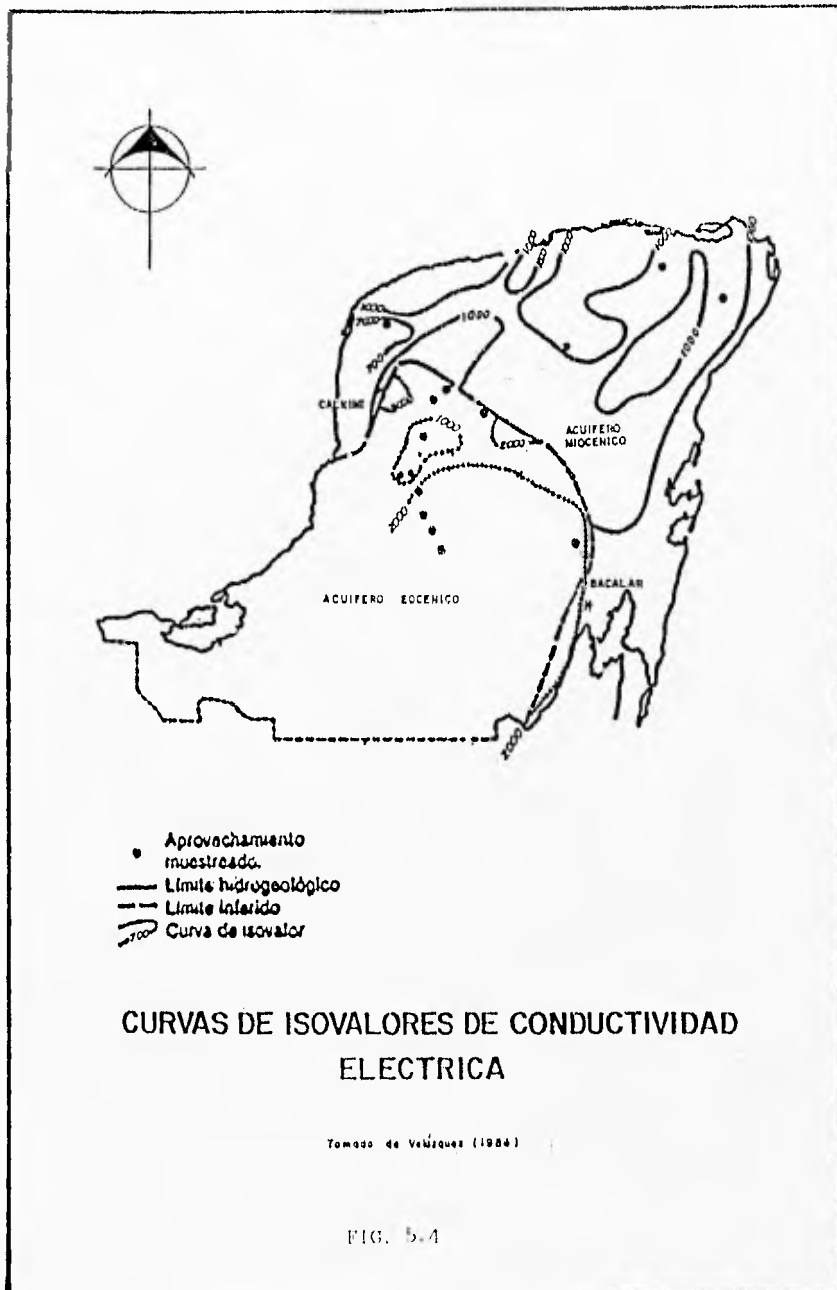


DIAGRAMA TRIANGULAR (PIPER)

CARACTERIZACION GEOQUIMICA

- Grupo 1: Familia Bicarbonatada - Cálrica área de recarga Central Valiarta - El Tintal.
- Zona A: Prevalece la dilución Nva. Valladolid - Central Valiarta.
- Zona B: Prevalece la disolución Nva. Xcan - El Tintal - Tres Reyes.
- Grupo 2: Aguas de Mezcla. Mezcla incipiente con agua Oceánica cerca a Cancún.
- Grupo 3: Aguas Mixtas - Mezcla y disolución.
- Grupo 4: Familia Sódica - Clorurada Influencia de Agua Oceánica Zona Costera.

TRAYECTORIAS DE REACCION

- R → M Enriquecimiento - Mezcla - Influencia Oceánica
- R → D Disolución de Calorito y Dolomita evolucionando en la dirección del flujo
- R Recarga
- D Descarga
- M Mar
- Según Back y Hanson (1971)
en Valdezquez A.L. (1986)

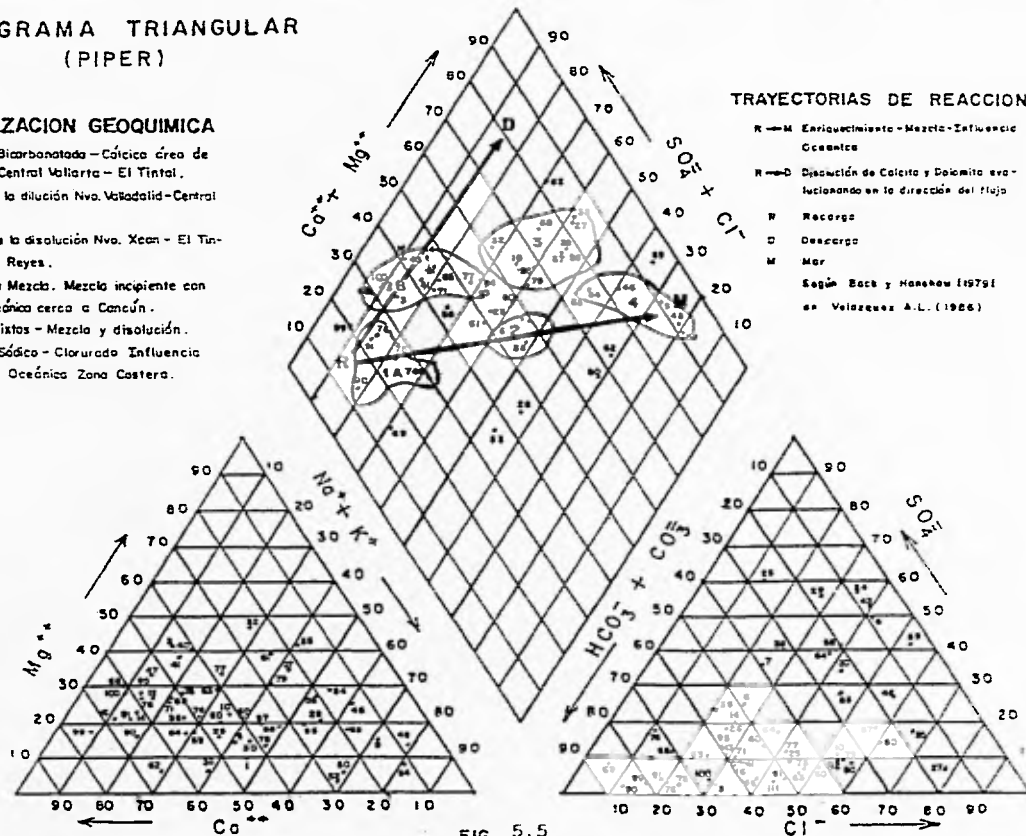


FIG. 5.5

RELACION DEL COCIENTE SO_4/Cl (meq/l) Y
LA CONCENTRACION DE SULFATOS (mg/l)

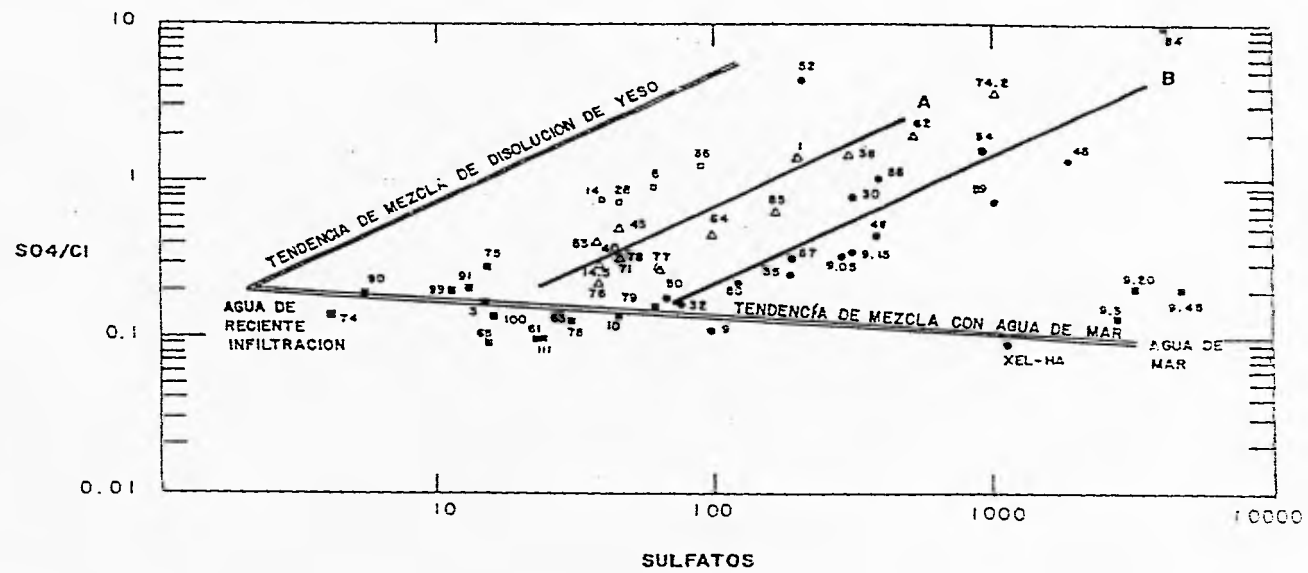


FIG. 5.6

RELACION DEL COCIENTE SO_4/Cl (meq/l)
Y LA CONCENTRACION DE SULFATOS (mg/l)

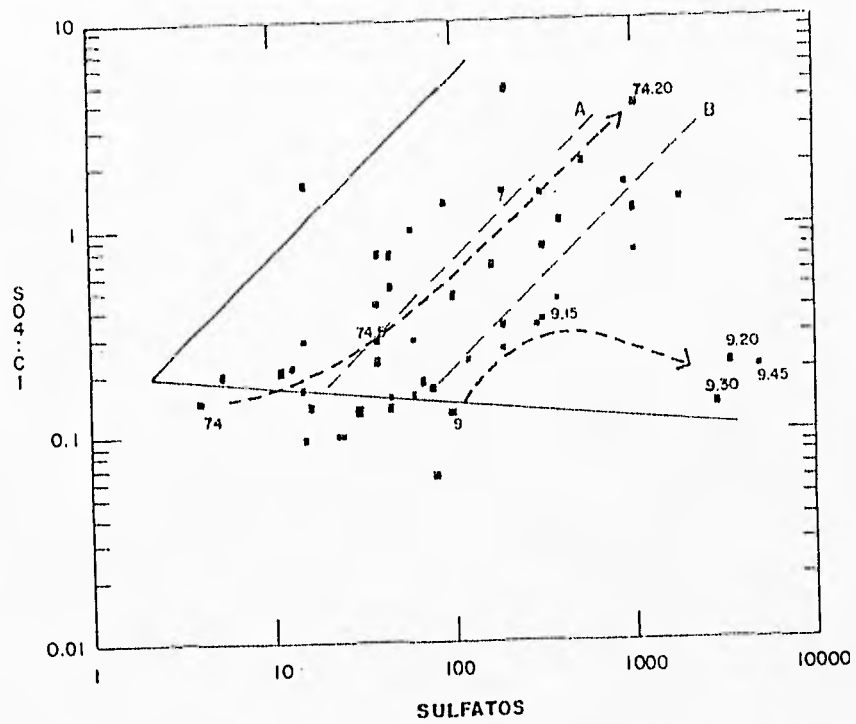
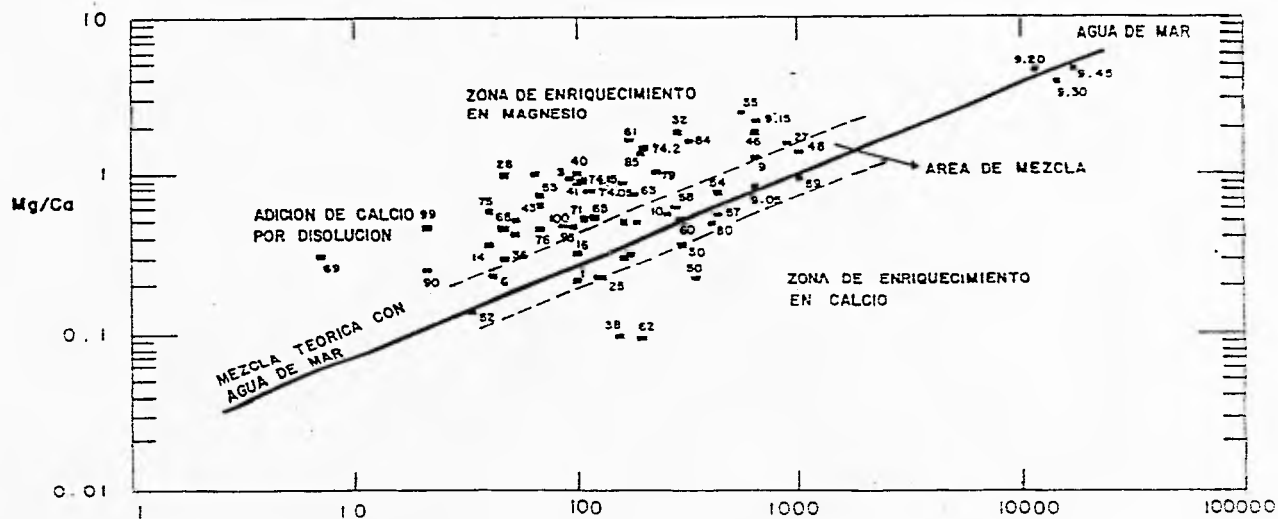


FIG. 5.7

RELACION ENTRE EL COCIENTE Mg/Ca (meq/l)
Y LA CONCENTRACION DE CLORUROS (mg/l)



CLORUROS

FIG. 5.8

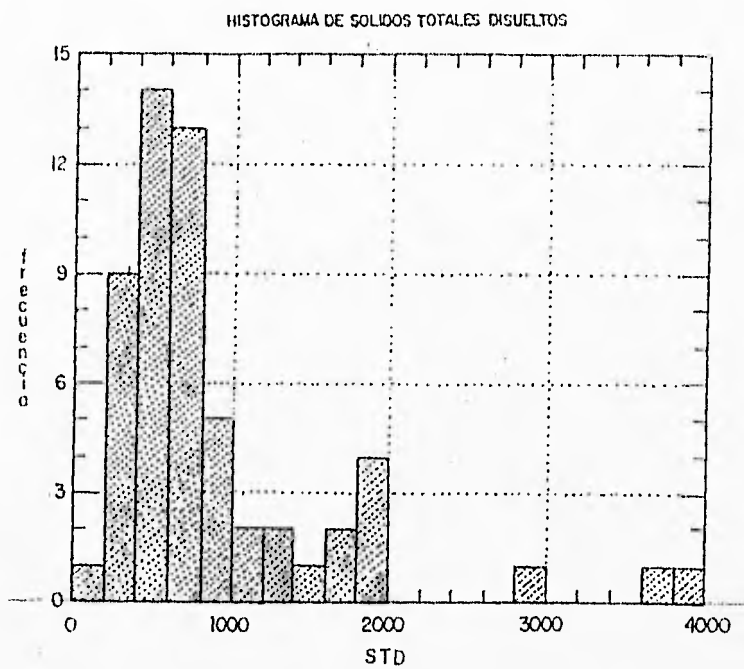


FIG. 5.9

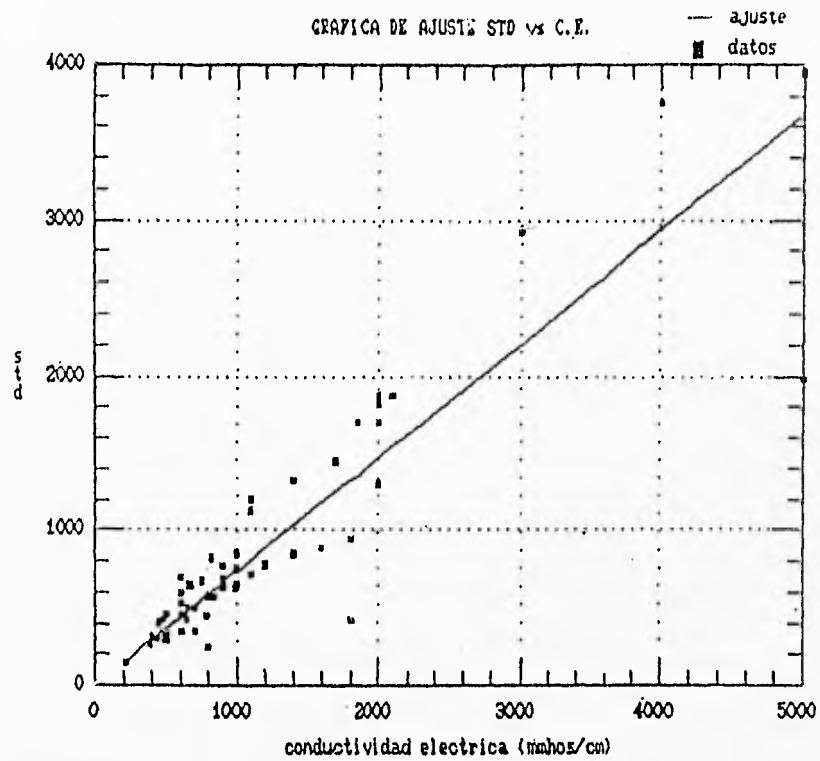


FIG. 5.10

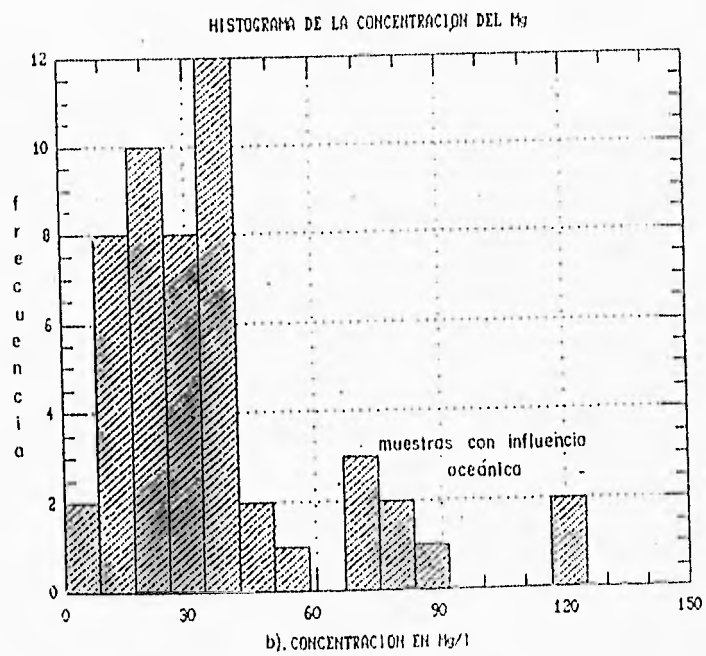
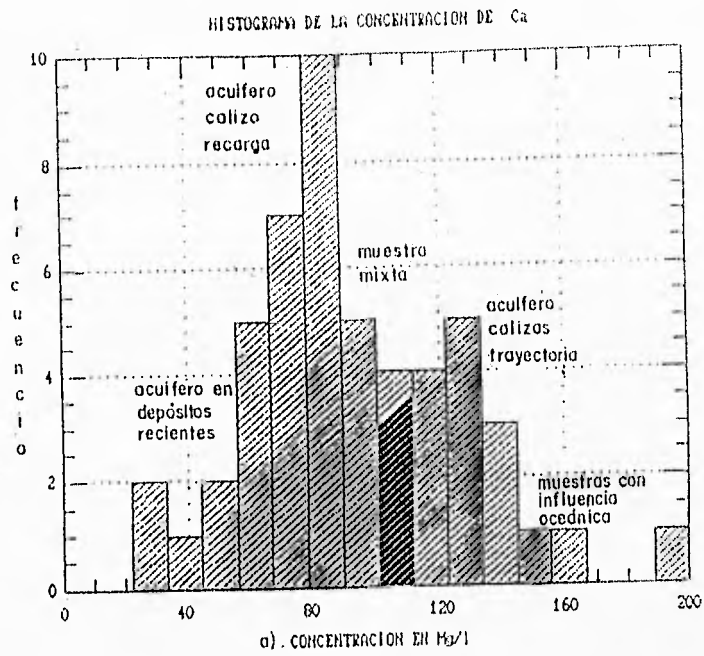


FIG. 5.11

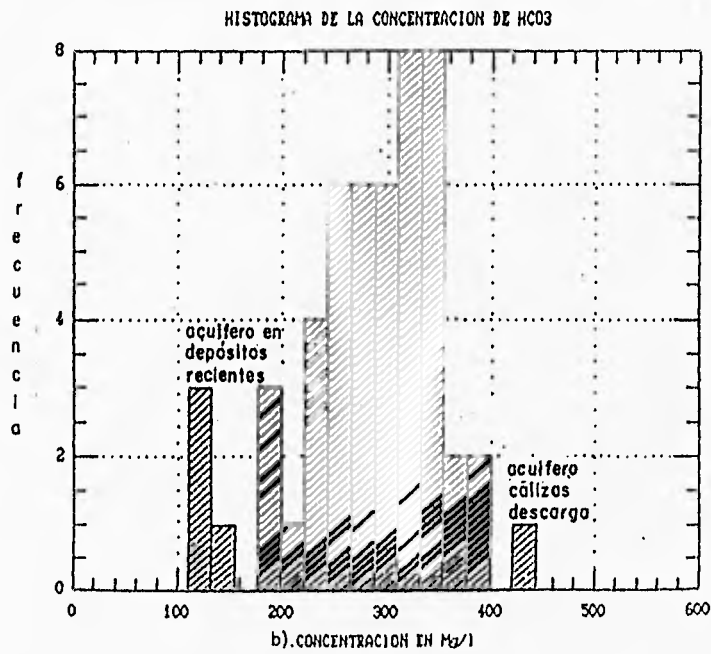
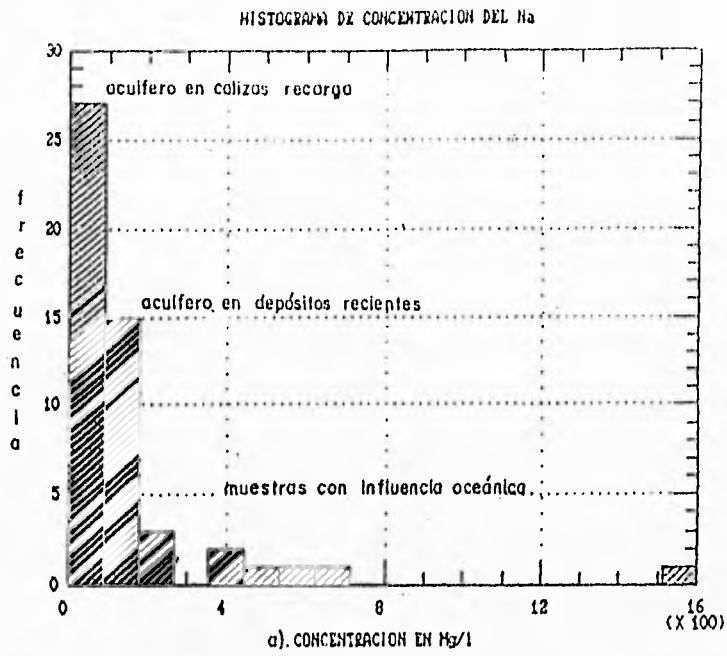
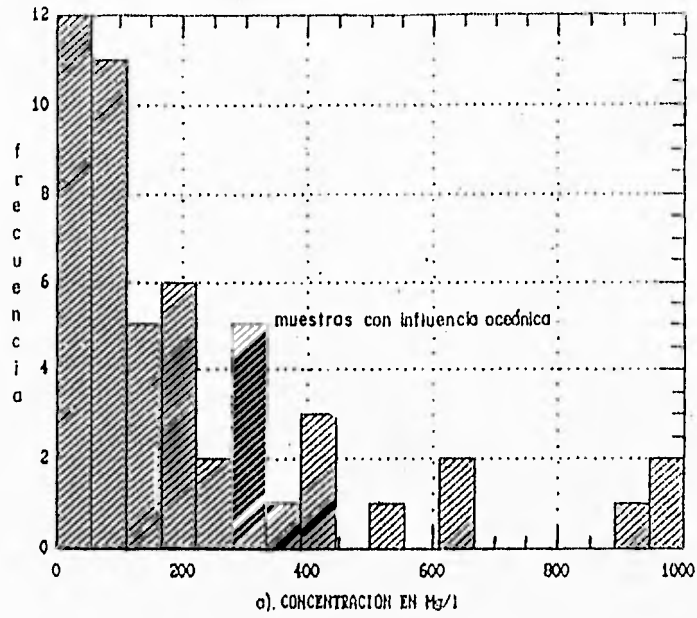


FIG. 5.12

HISTOGRAMA DE LA CONCENTRACION DE Cl



HISTOGRAMA DE LA CONCENTRACION DE SO4

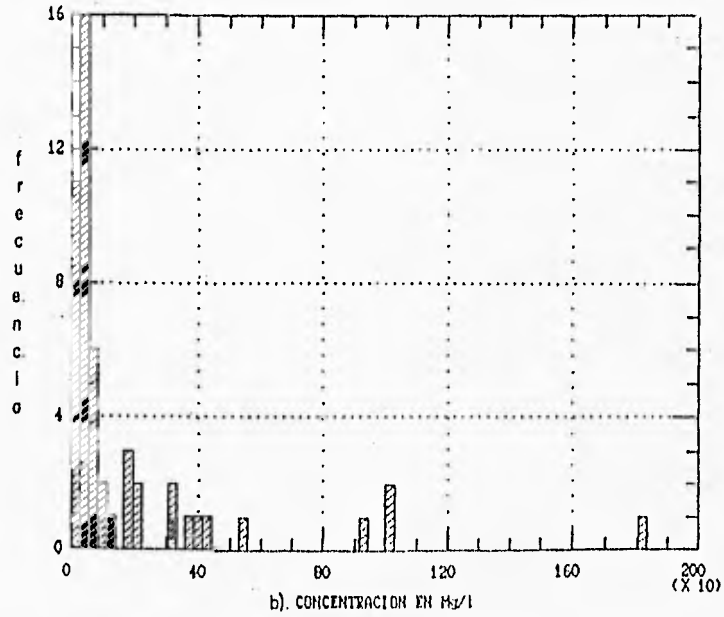
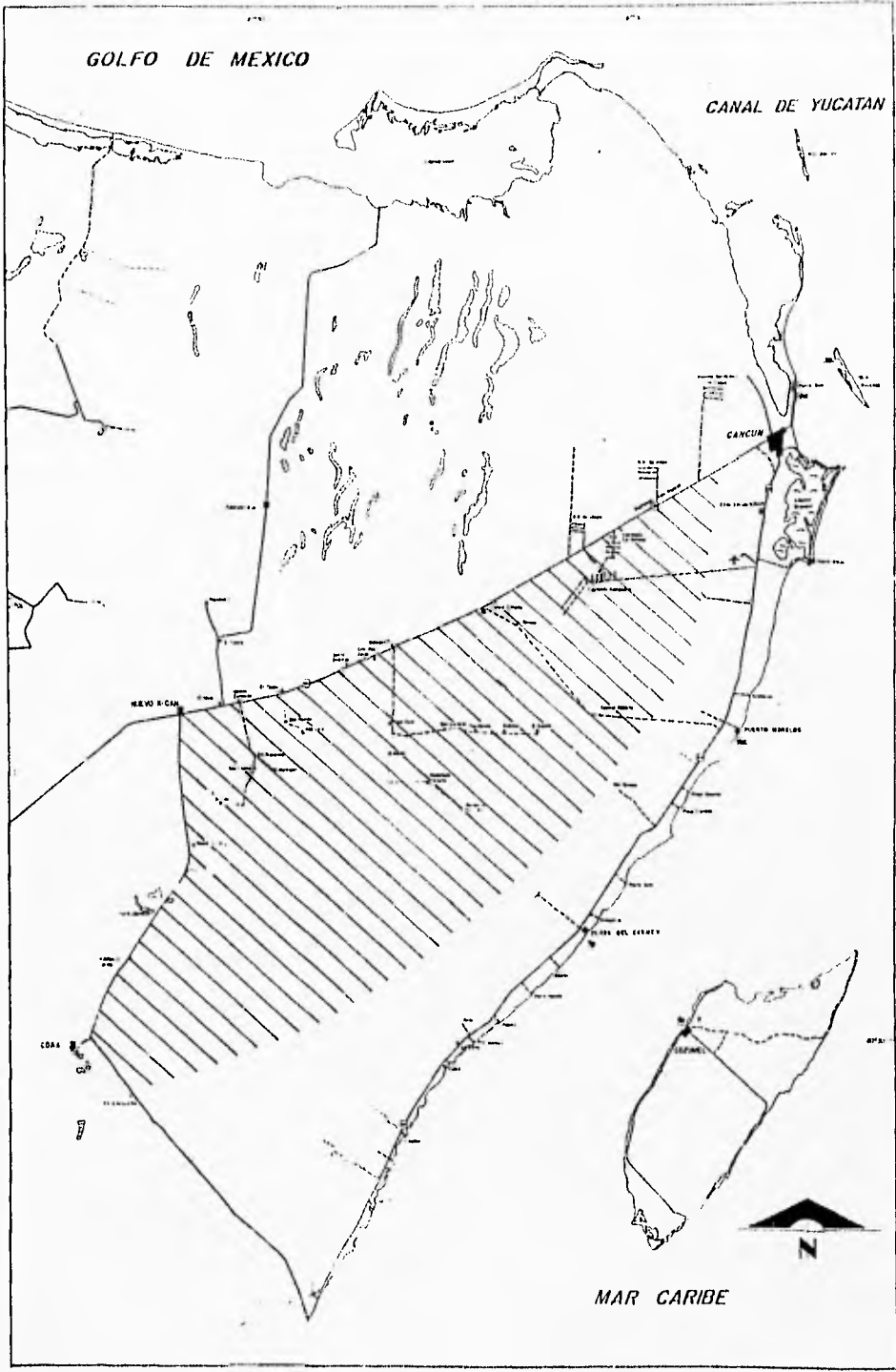


FIG. 5.13



GOLFO DE MEXICO

CANAL DE YUCATAN

CANCUN

NEVO RCM

PUERTO MORELOS

PROGRESO

COBA

TULUM

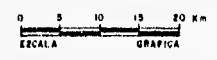
MAR CARIBE

LEYENDA

▨ AREA DE BALANCE

SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

- ▭ CIUDAD
- ◻ POBLACION
- RANCHERIA
- CARRETERA
- - - - - FERROCARRIL
- VEREDA
- ✈ AEROPUERTO INTERNACIONAL
- ✈ AEROPUERTO LOCAL
- ⊠ EMBARCADERO
- ⊠ DEPASIS



U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	AREA DE RECARGA EFECTIVA	
	TESIS PROFESIONAL	
	ROQUE VALENZUELA ESPINOZA	1994 Fig. B.1

ANEXO No. 3

FOTOS

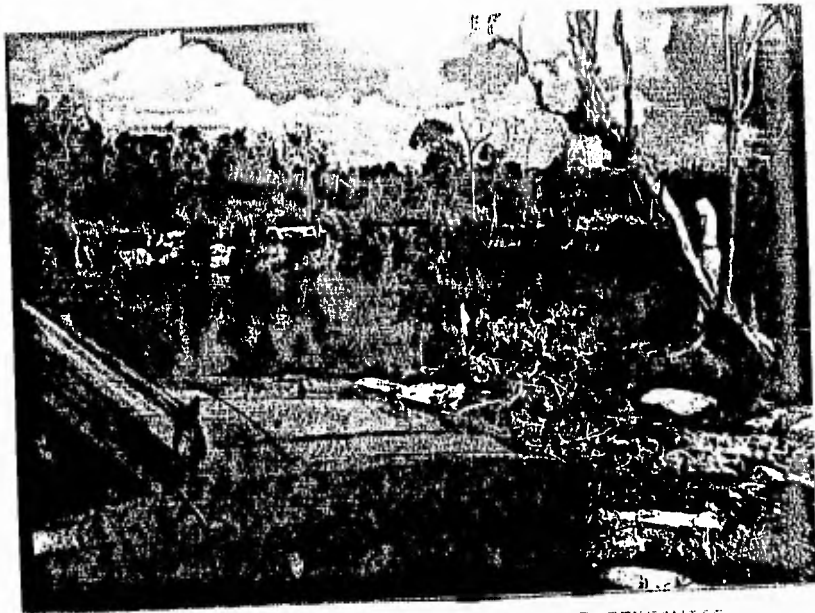


FOTO 1. CENOTE DE PLAYA DEL SECRETO, EN LAS CERCANIAS DE PUERTO MORELOS.



FOTO 2. CENOTE CON EQUIPO DE BOMBEO.



FOTO 3. NORIA DE EXTRACCIÓN MANUAL

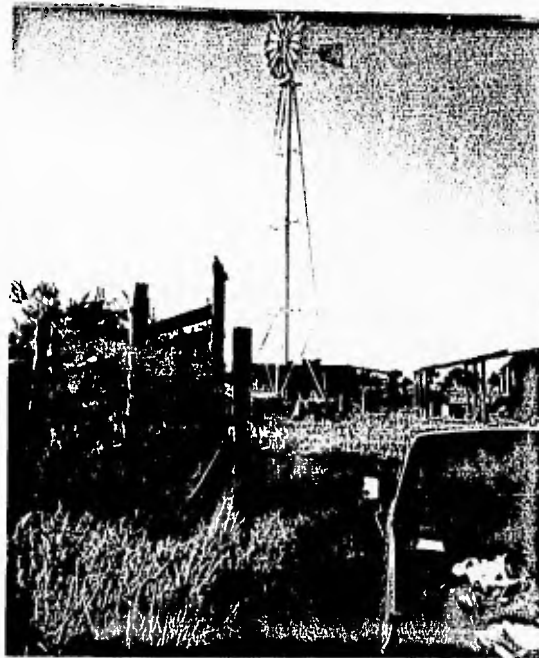


FOTO 4. NORIA CON PÓPALETE

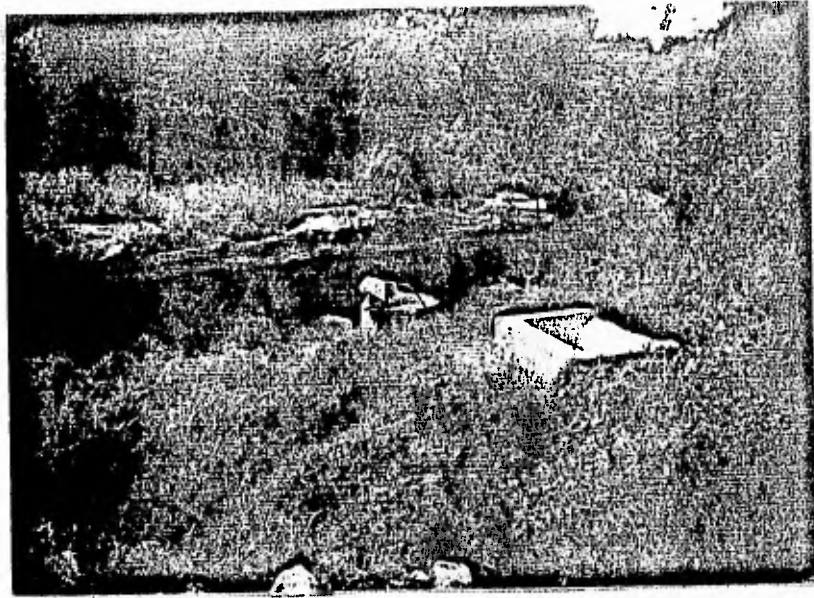


FOTO 5. NORIA CON EQUIPO DE BOMBEO

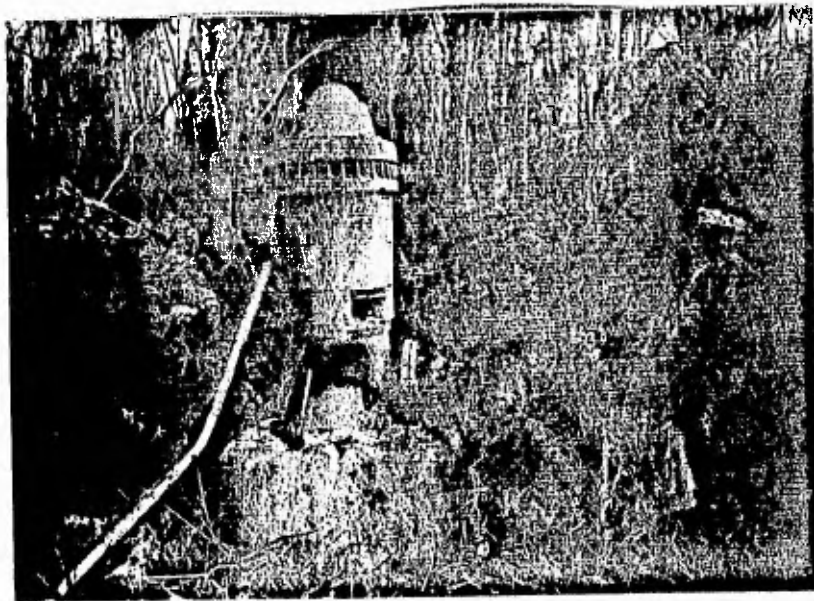


FOTO 6. POZO CON EQUIPO DE BOMBEO

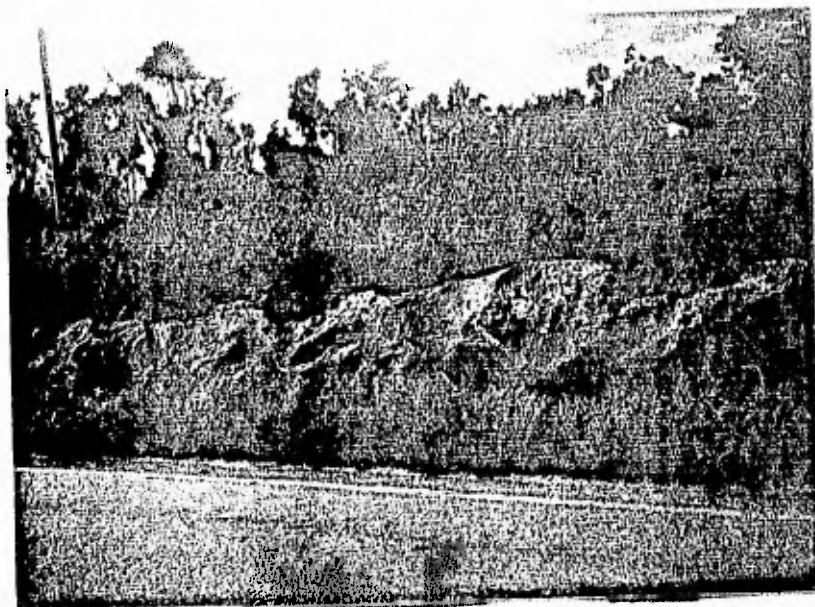


FIG. 1. SECTION THROUGH THE HILL AT THE EAST END OF THE HILL, SHOWING THE STRATIFICATION OF THE ROCKS.

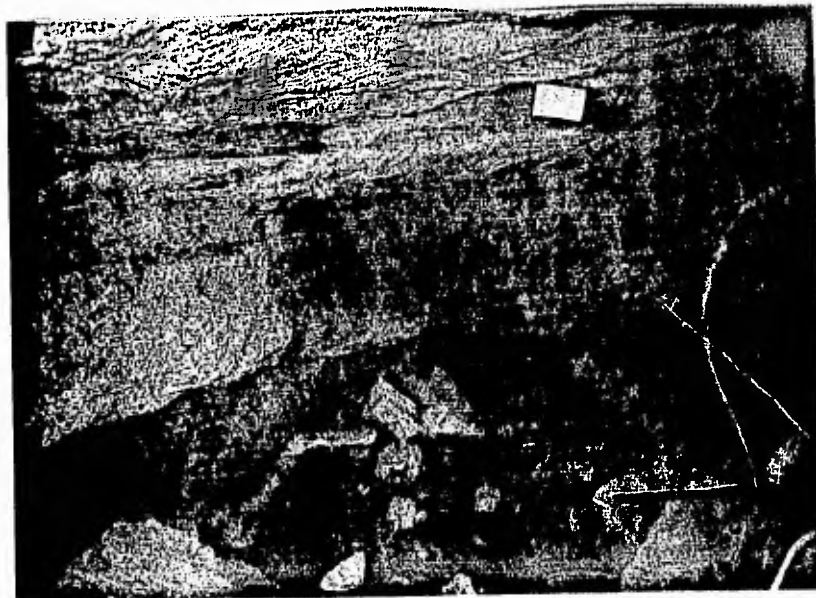


FIG. 2. STRATIFICATION OF THE ROCKS IN THE HILL AT THE EAST END OF THE HILL, SHOWING THE STRATIFICATION OF THE ROCKS.

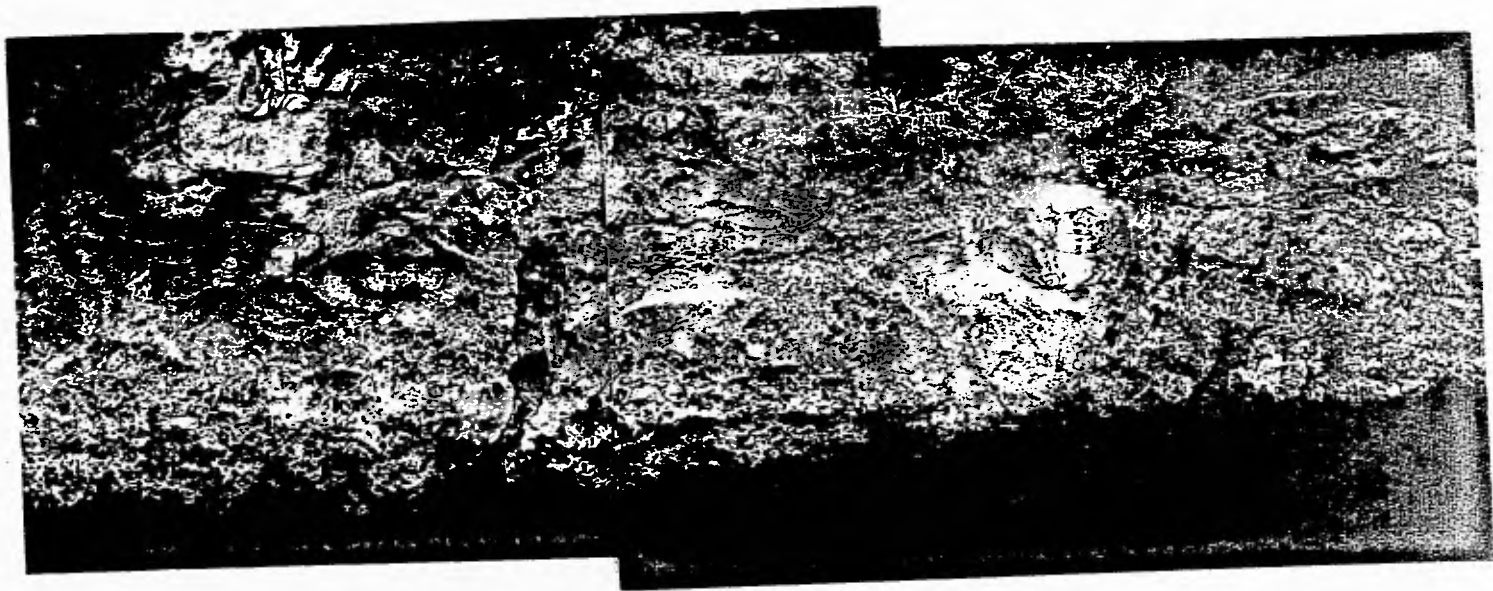


FOTO 9. FRACTURAS DE ORIENTACION NW-SE EN CALIZAS DE LA FORMACION
CARRILLO PUERTO, OBSERVADAS EN EL KM. 45.3 DE LA CARRETERA
CORRA-NUEVO ACOM.

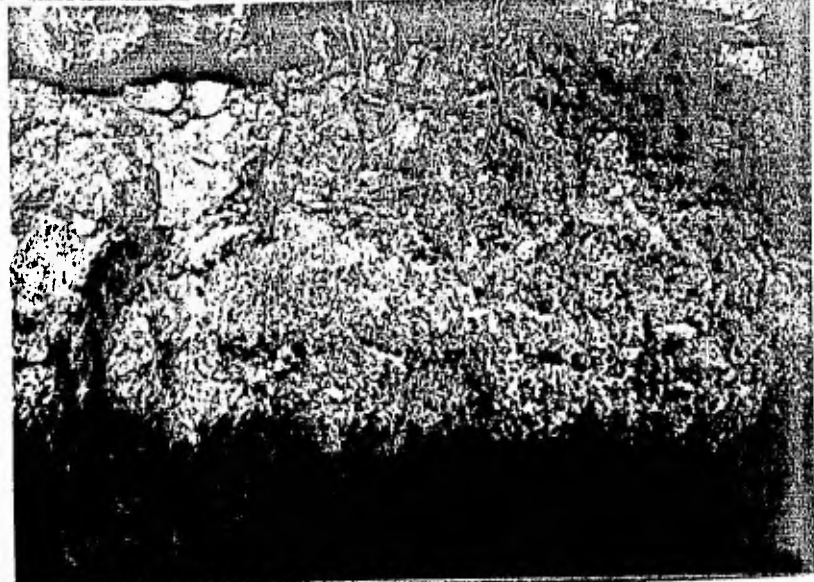


FOTO 10. FRACTURA DE ORIENTACION NW-SE CON BANDAS DE CaCO₃ EN SUS PAREDES (Km 65.3 DE LA C.)



FOTO 11. FRACTURA DE ORIENTACION NW-SE CON BANDAS DE CaCO₃ EN SUS PAREDES Y FRAGMENTOS DE CALIZA EN SU PARTE CENTRAL (Km 45.7 DE LA CARRETERA CERRA NUEVO XICAN).



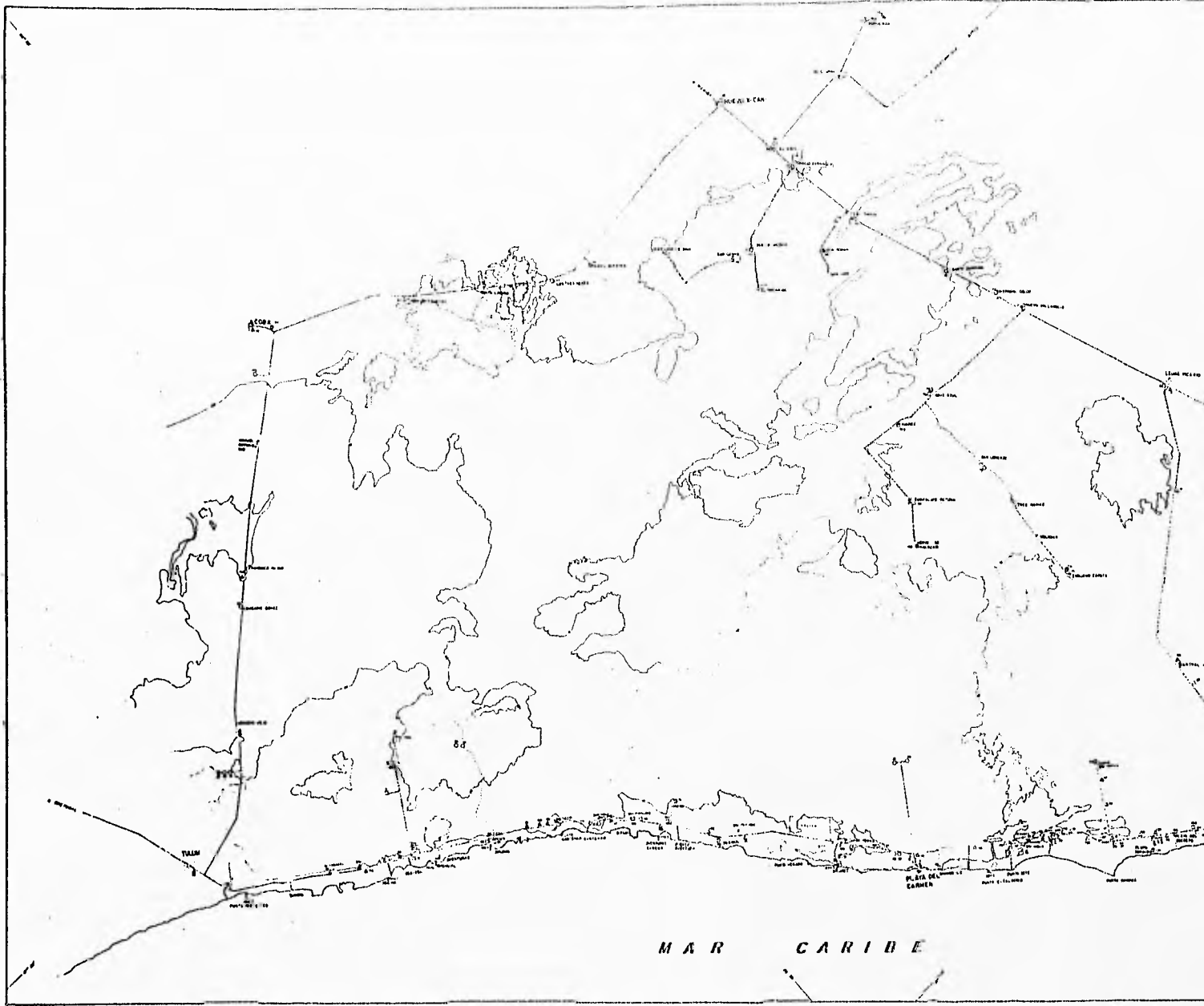
FOTO 12. SONDA ELECTRICA. PARTE DEL EQUIPO UTILIZADO EN LAS ACTIVIDADES DE CAMPO.



FOTO 13. BARRIL MUESTREADOR DE PROFUNDIDAD Y EQUIPO DE QUIMICA, UTILIZADOS EN LAS ACTIVIDADES DE CAMPO.

ANEXO No. 4

PLANOS



LEYENDA

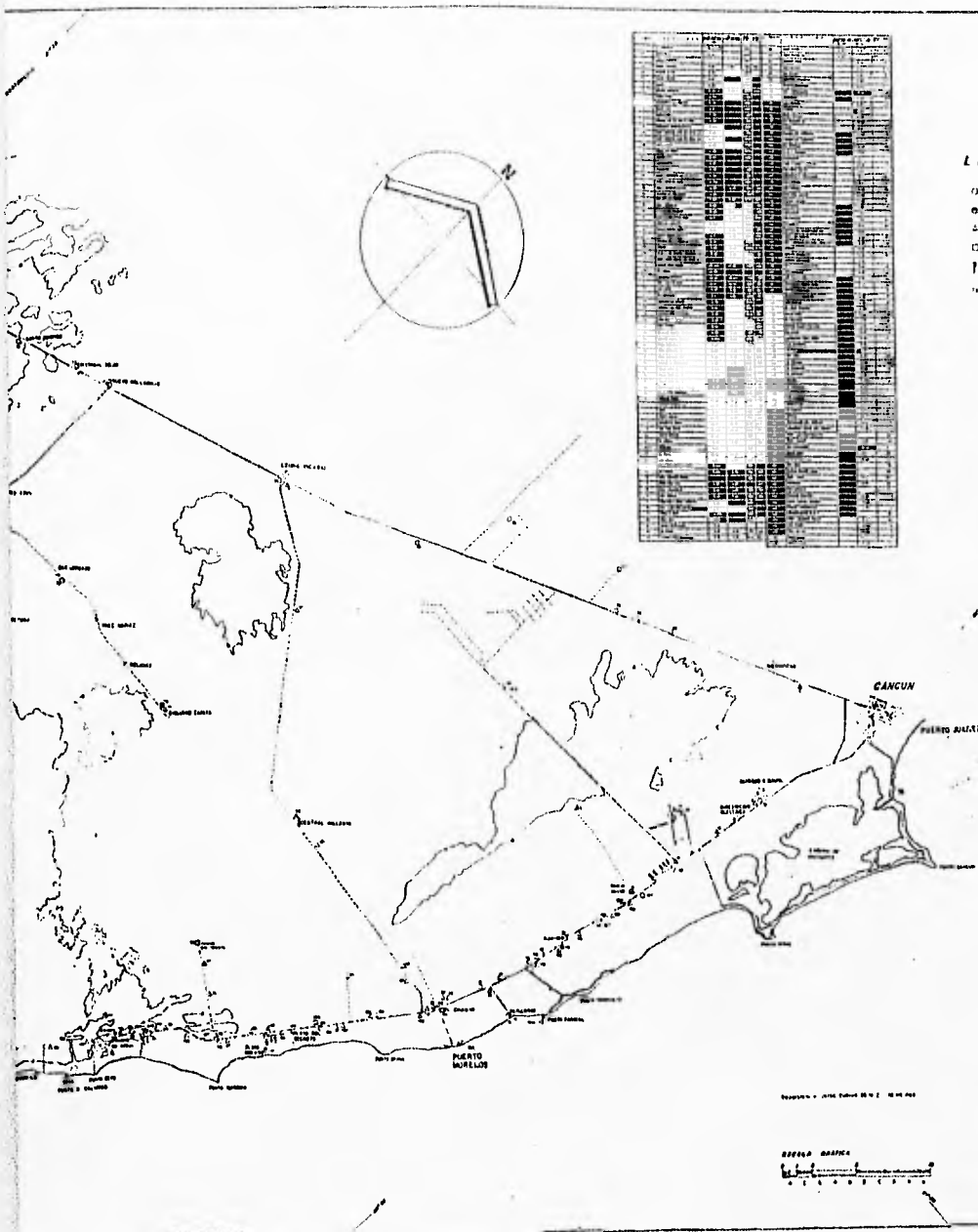
- POZO
- CANAL
- △ BOFA
- CANOTE
- ▭ BARRIO NATURAL DE SAN JUAN DE LOS RIOS
- ▭ BARRIO DE PROYECTOS

SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

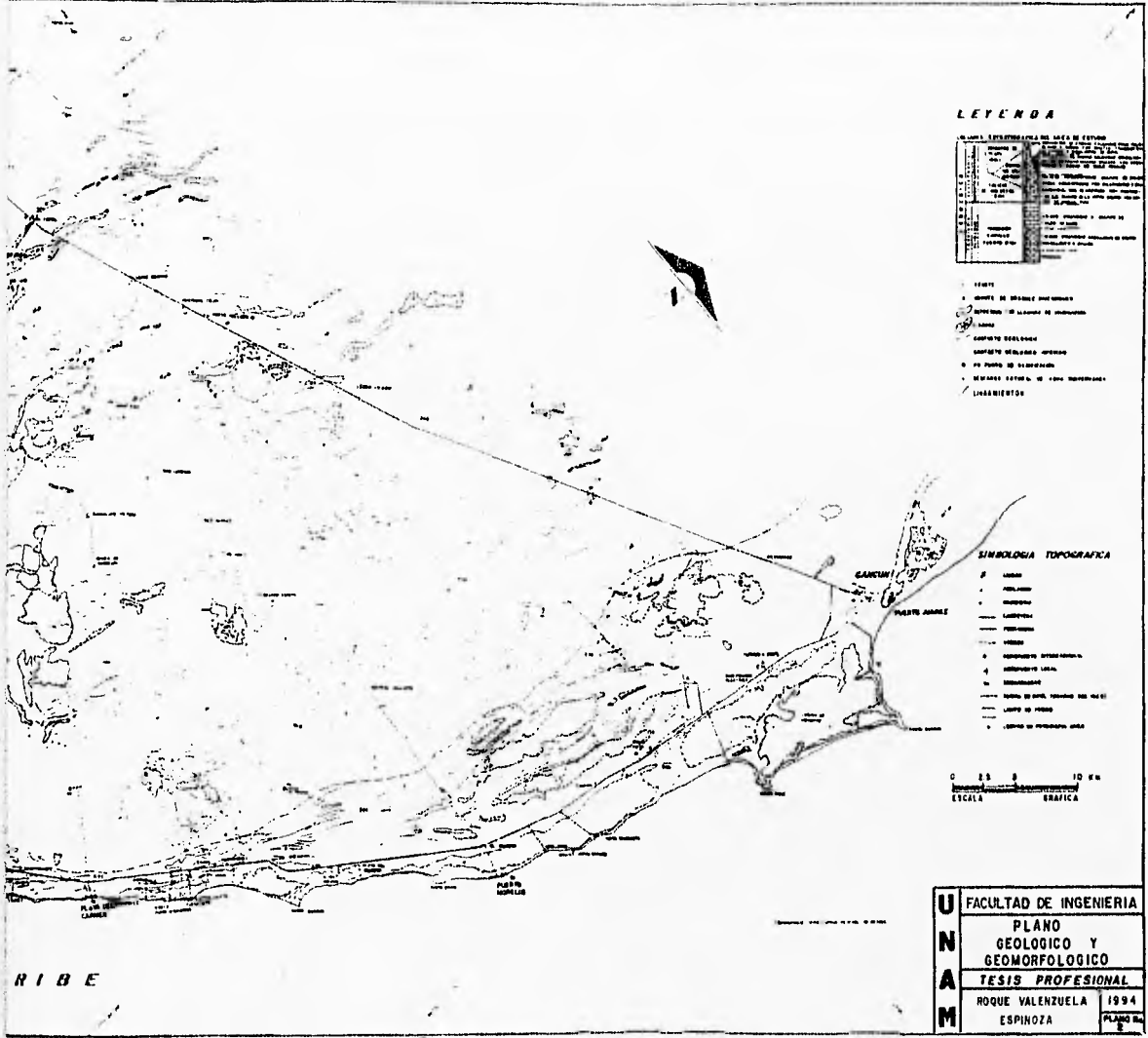
- ESTILO
- △ PUNTO ALTO
- BANCAL
- BARRIO
- BARRIO
- VECINA
- 2 APROVECHAMIENTO DISTANCIAL
- 4 APROVECHAMIENTO LOCAL
- BARRIO ALTO
- BARRIO DE BARRIO NATURAL DEL D.T.O.
- LOTE Y DE PUEBLO

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	CENSO DE APROVECHAMIENTO	
	TESIS PROFESIONAL	
	ROQUE VALENZUELA	1994
	ESPINOZA	PLANO M

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----







LEYENDA

LEYENDA

1. LINEA DE FRASCO DE AGUA

2. LINEA DE FRASCO DE AGUA

3. LINEA DE FRASCO DE AGUA

4. LINEA DE FRASCO DE AGUA

5. LINEA DE FRASCO DE AGUA

6. LINEA DE FRASCO DE AGUA

7. LINEA DE FRASCO DE AGUA

8. LINEA DE FRASCO DE AGUA

9. LINEA DE FRASCO DE AGUA

10. LINEA DE FRASCO DE AGUA

- 1. RIOS
- 2. CANCHALES DE AGUA
- 3. CANCHALES DE AGUA
- 4. CANCHALES DE AGUA
- 5. CANCHALES DE AGUA
- 6. CANCHALES DE AGUA
- 7. CANCHALES DE AGUA
- 8. CANCHALES DE AGUA
- 9. CANCHALES DE AGUA
- 10. CANCHALES DE AGUA

SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

1. LINEA DE FRASCO DE AGUA

2. LINEA DE FRASCO DE AGUA

3. LINEA DE FRASCO DE AGUA

4. LINEA DE FRASCO DE AGUA

5. LINEA DE FRASCO DE AGUA

6. LINEA DE FRASCO DE AGUA

7. LINEA DE FRASCO DE AGUA

8. LINEA DE FRASCO DE AGUA

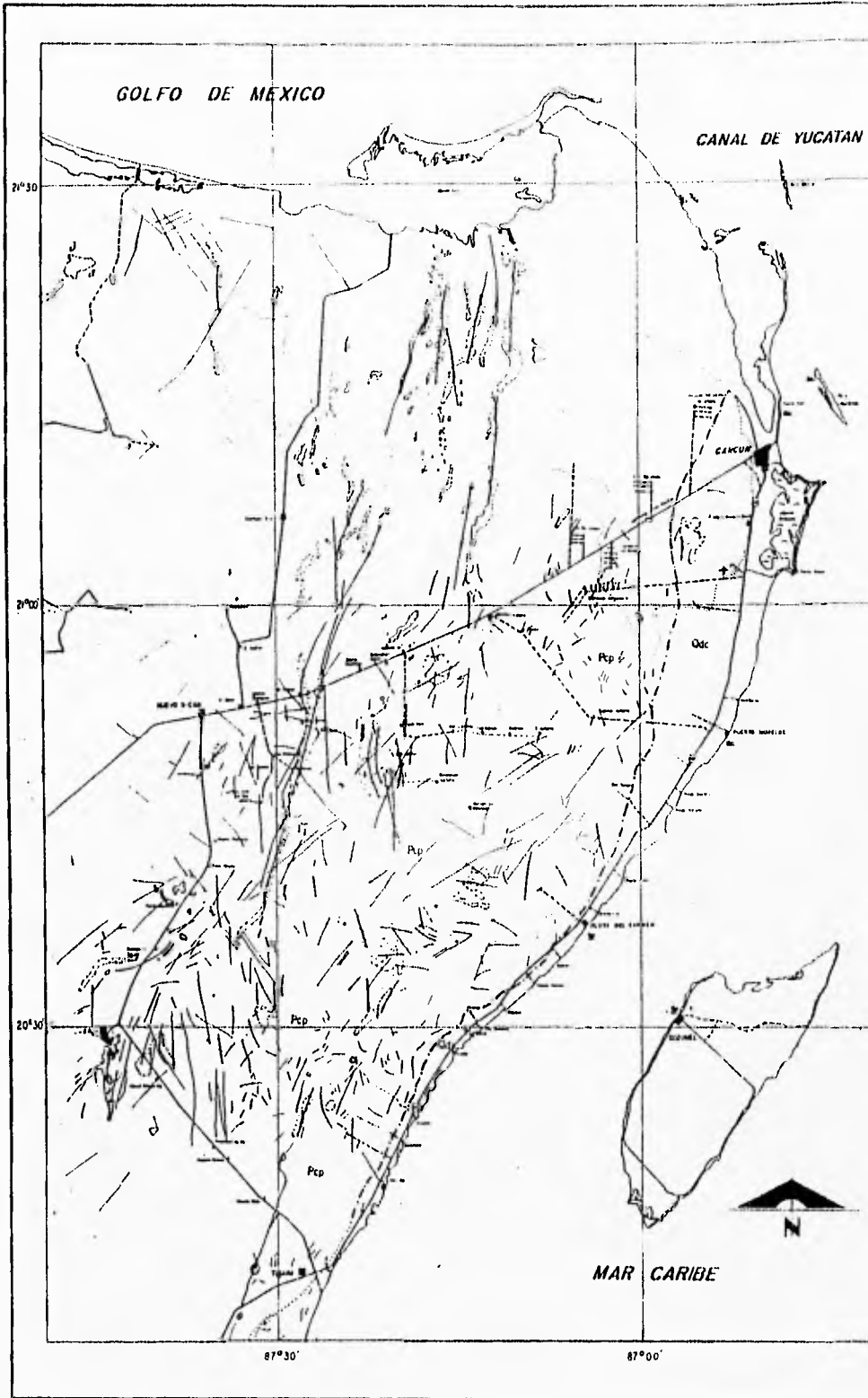
9. LINEA DE FRASCO DE AGUA

10. LINEA DE FRASCO DE AGUA

0 5 10 20 KM
ESCALA GRAFICA

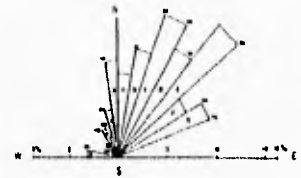
UNAM FACULTAD DE INGENIERIA
 PLANO GEOLOGICO Y GEOMORFOLOGICO
 TESIS PROFESIONAL
 ROQUE VALENZUELA ESPINOZA 1994
 PLANO No. 1

RIBE



LEYENDA

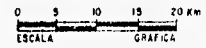
- CENOTE DE PEQUEÑAS DIMENSIONES
- CENOTE DE GRANDES DIMENSIONES
- LAGUNA
- FRACCIÓN
- ZONA DE MUDAS
- CONTACTO GEOLÓGICO
- CONTACTO GEOLÓGICO INFERIOR
- Pcp FORMACIÓN CARREÑO PLERIO
- Qdc DEPOSITOS CUATERNARIOS



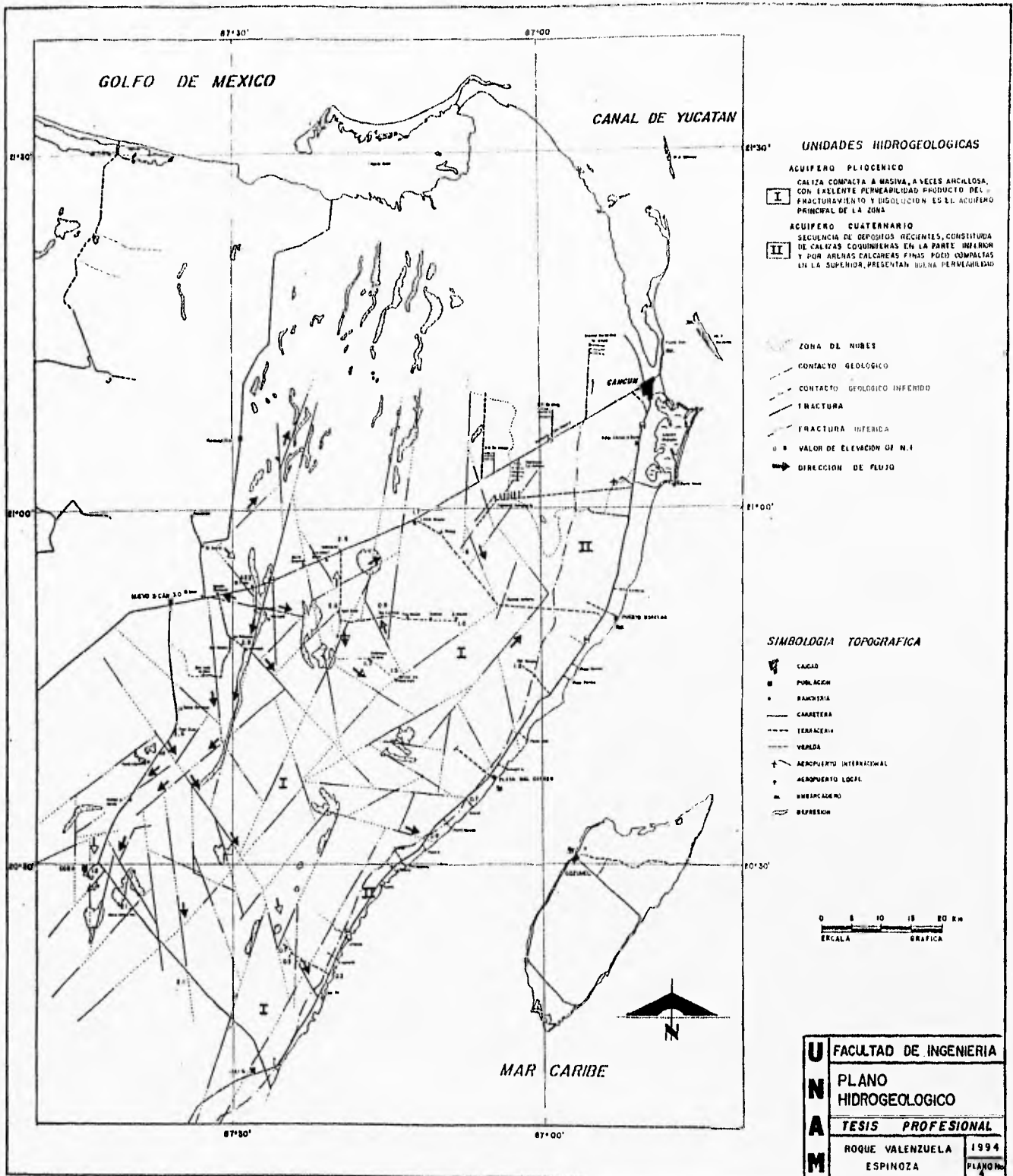
ROSETA DE FRACTURAS

SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

- ▭ CERRADO
- ▭ POL. ACN.
- RANCHO
- CARRETERA
- FERROCARRIL
- VEREDA
- ✈ AEROPUERTO INTERNACIONAL
- ✈ AEROPUERTO LOCAL
- EMBARCADERO
- ▭ DEPRESION



U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	ANALISIS ESTRUCTURAL	
	TESIS PROFESIONAL	
	ROQUE VALENZUELA ESPINOZA	1934 PLANO 3



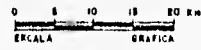
UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

- ACUIFERO PLEOCENICO**
 CALIZA COMPACTA A MASIVA, A VECES AREOLOSA, CON LENTE PERMEABILIDAD PRODUCTO DEL FRACTURAMIENTO Y DISOLUCION ES EL ACUIFERO PRINCIPAL DE LA ZONA
- ACUIFERO CUATERNARIO**
 SECUENCIA DE DEPOSITOS RECIENTES, CONSISTIDA DE CALIZAS COQUINILLAS EN LA PARTE INFERIOR Y POR ARELLAS CALCIERAS FINAS POCO CONSOLIDADAS EN LA SUPERIOR, PRESENTAN BUENA PERMEABILIDAD

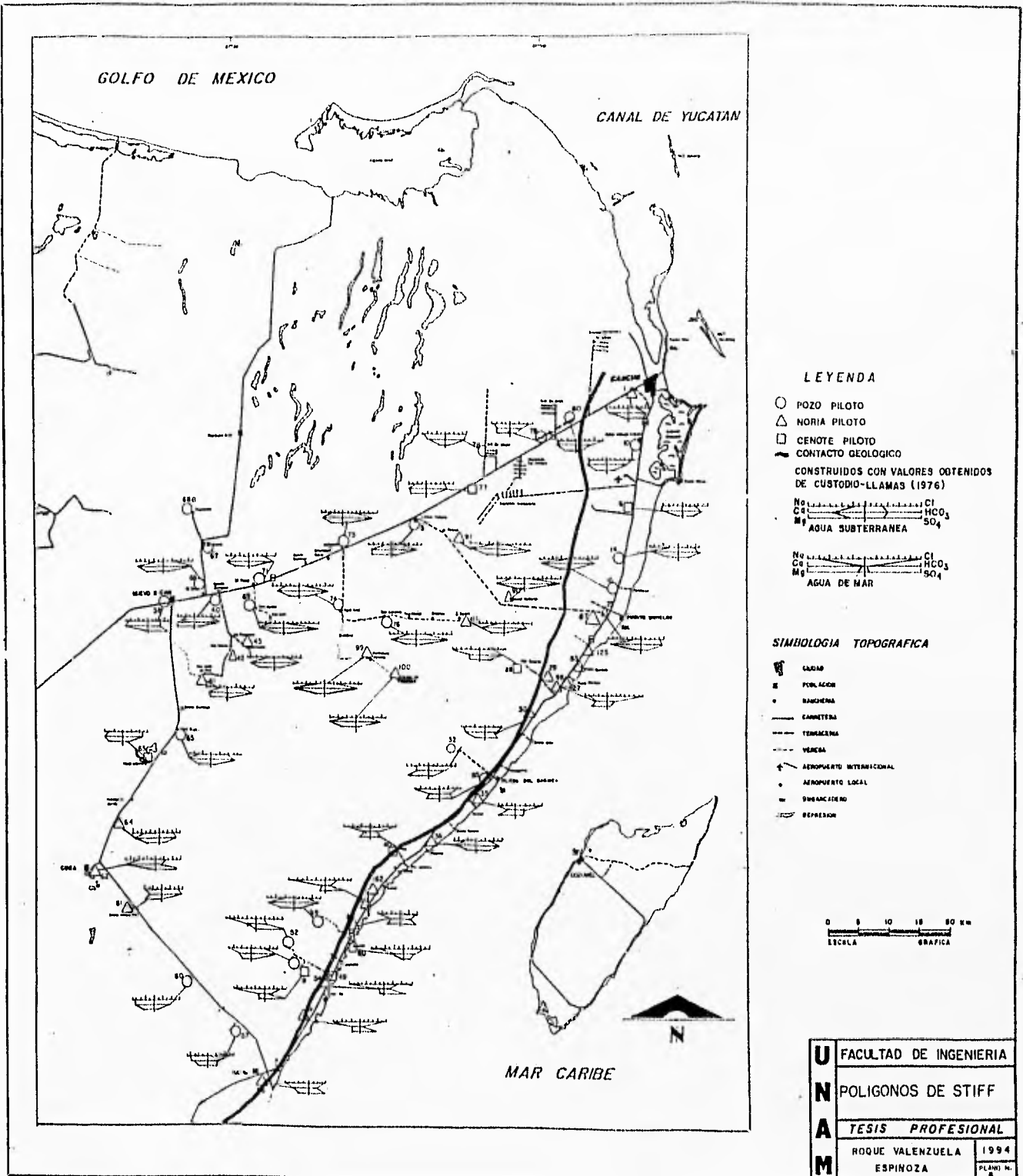
- ZONA DE NUBES
- CONTACTO GEOLOGICO
- CONTACTO GEOLOGICO INFERIDO
- FRACTURA
- FRACTURA INFERIDA
- VALOR DE ELEVACION DE M.N.
- DIRECCION DE FLUJO

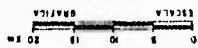
SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

- CALCIO
- POBLACION
- BANQUETA
- CARRETERA
- TERRAZAS
- VEREDA
- AEROPUERTO INTERNACIONAL
- AEROPUERTO LOCAL
- DESCRUCIAMIENTO
- DEPRESION



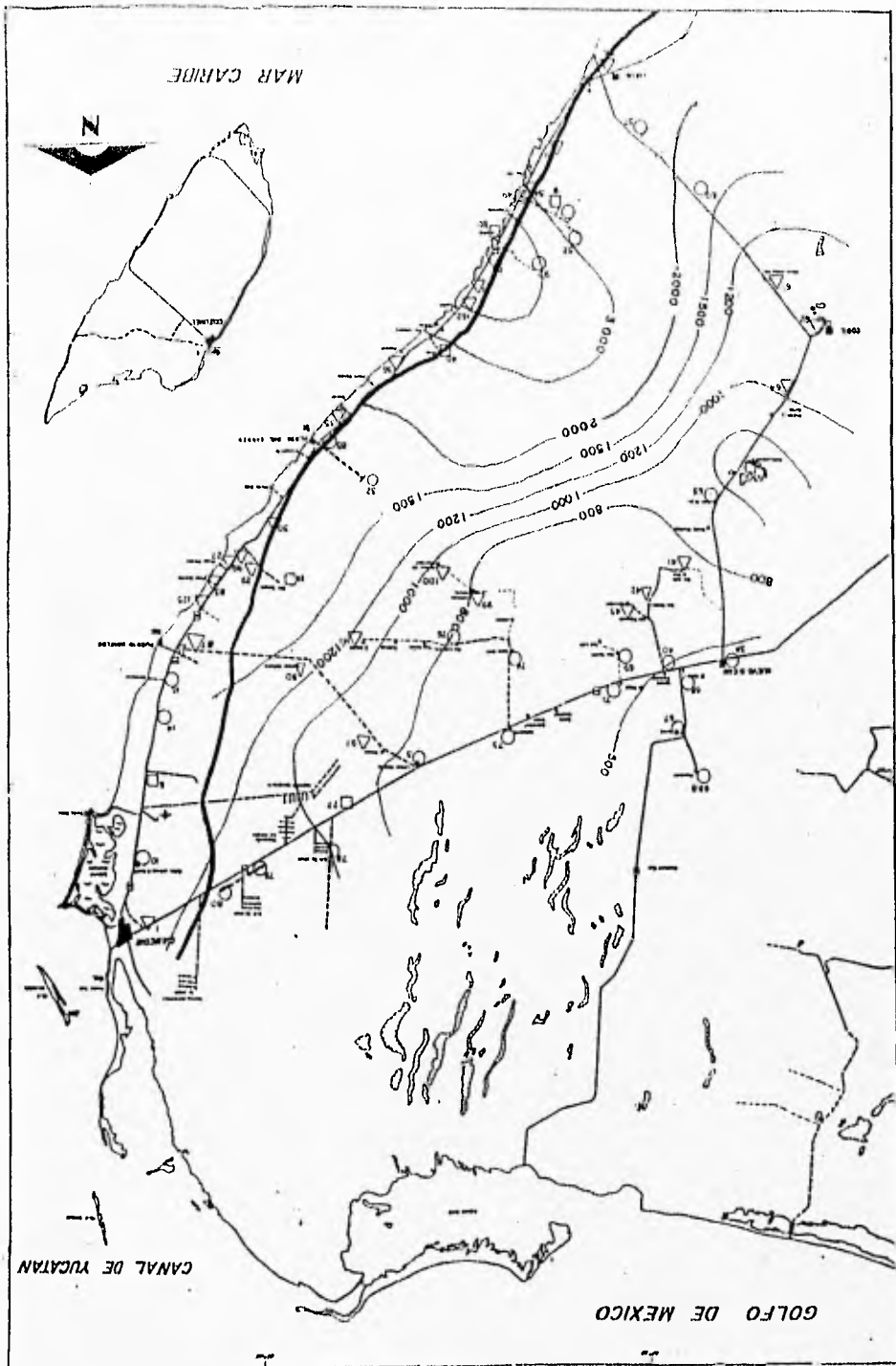
U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	PLANO HIDROGEOLOGICO	
	TESIS PROFESIONAL	
	ROQUE VALENZUELA	1994
	ESPINOZA	PLANO 4

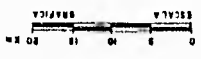




- SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA**
- CANAL
 - POZO
 - POZO PILOTO
 - △ MONIA PILOTO
 - GENOTE PILOTO
 - CONTACTO GEOLOGICO
 - NÚMERO DE APROVECHAMIENTO
 - ~ CURVAS DE ISOBALORES

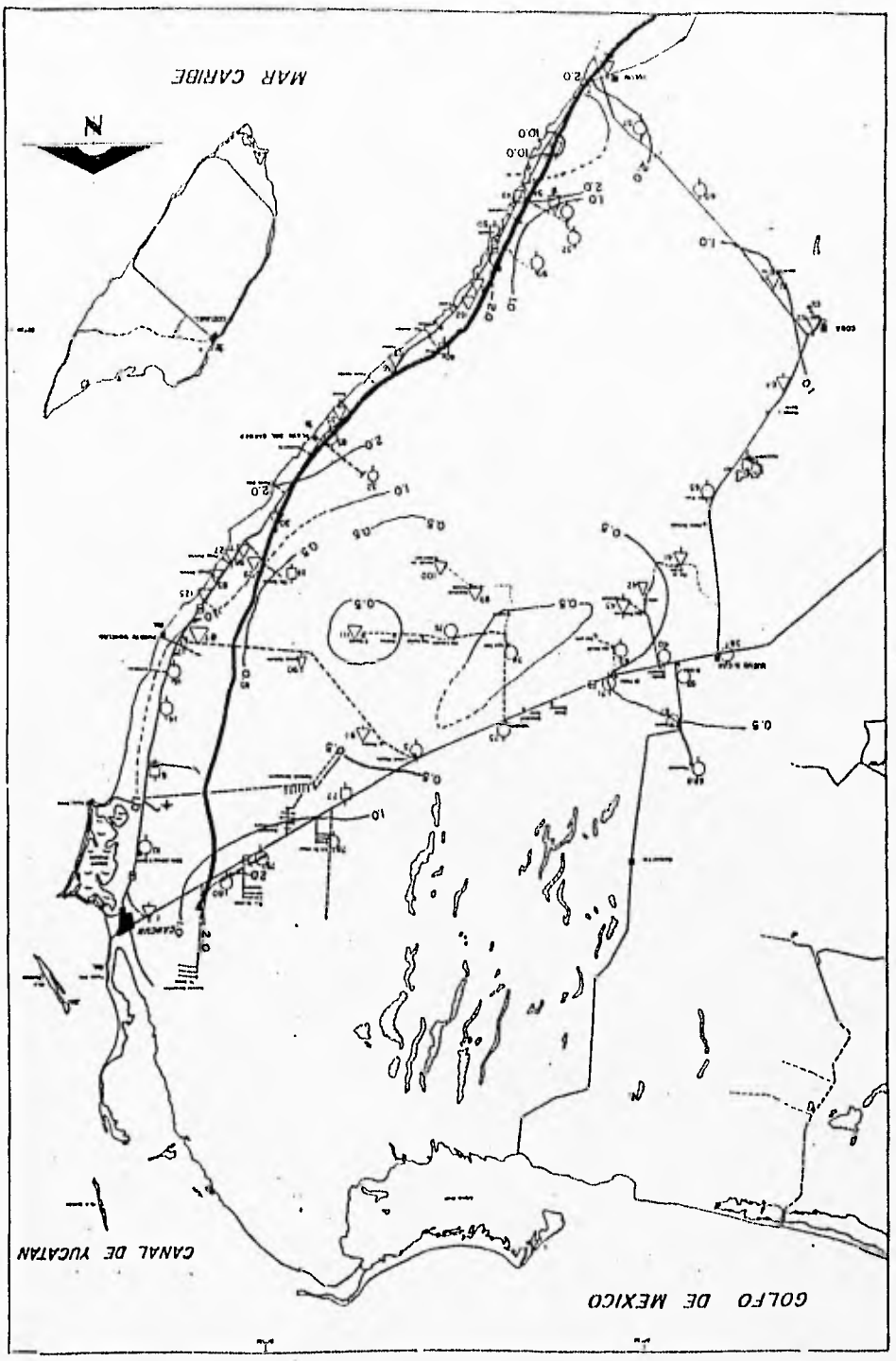
- LEYENDA**
- POZO PILOTO
 - △ MONIA PILOTO
 - GENOTE PILOTO
 - CONTACTO GEOLOGICO
 - NÚMERO DE APROVECHAMIENTO
 - ~ CURVAS DE ISOBALORES





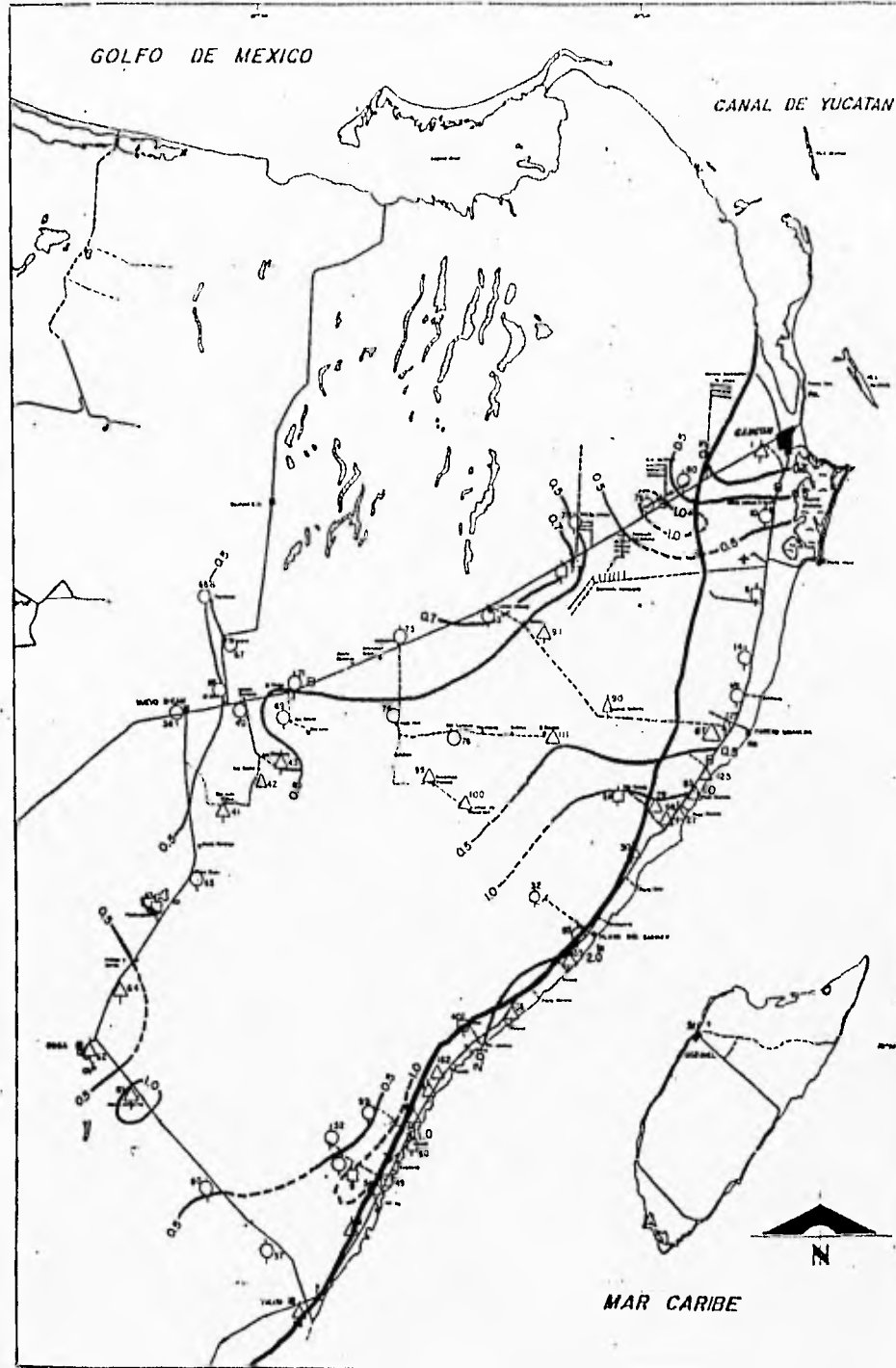
- SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA**
- ▬ BARRIO
 - ▬ BARRIO NO
 - ASESORIO LOCAL
 - ▬ ASESORIO INTERMUNICIPAL
 - ▬ VENTA
 - ▬ TERCERA
 - ▬ CANTONERA
 - AMCHENNA
 - PUEBLO
 - ▬ CAJON

- LEYENDA**
- POZO PILOTO
 - △ NORIA PILOTO
 - CENOTE PILOTO
 - CONTACTO GEOLOGICO
 - POZO CON ANALISIS FISICO-QUIMICO
 - NORIA CON ANALISIS FISICO-QUIMICO
 - CENOTE CON ANALISIS FISICO-QUIMICO
 - CURVA DE IGUAL VALOR
 - 50 NUMERO DE APROVECHAMIENTO



GOLFO DE MEXICO

CANAL DE YUCATAN

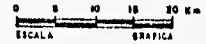


LEYENDA

- POZO PILOTO
- △ NORIA PILOTO
- CENOTE PILOTO
- CONTACTO GEOLOGICO
- POZO CON ANALISIS FISICO-QUIMICO
- △ NORIA CON ANALISIS FISICO-QUIMICO
- CENOTE CON ANALISIS FISICO-QUIMICO
- CURVA DE IGUAL VALOR
- 4.8 NUMERO DE APROVECHAMIENTO
- 0.38 VALOR DE LA RELACION IONICA

SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

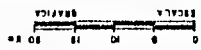
- CERCA
- POBLACION
- BARRIO
- CARRETERA
- FERROCARRIL
- VENEZA
- ✈ AEROPUERTO INTERNACIONAL
- AEROPUERTO LOCAL
- ENLARGAMIENTO
- DEPRESION



MAR CARIBE

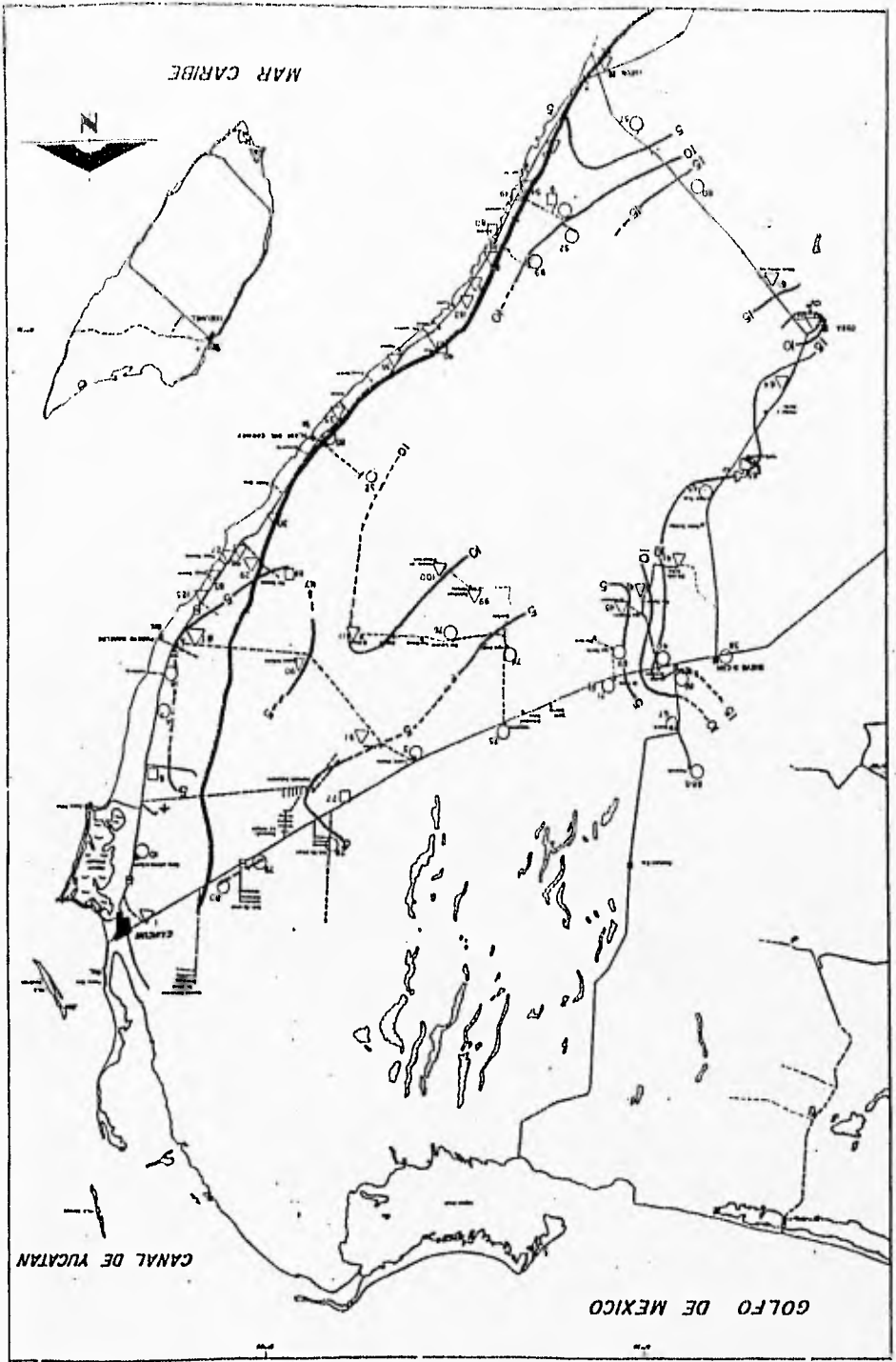
U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	RELACION IONICA Mg / Ca (Meq/l)	
	TESIS PROFESIONAL	
	ROQUE VALENZUELA ESPINOZA	1994 PLANO No. 8

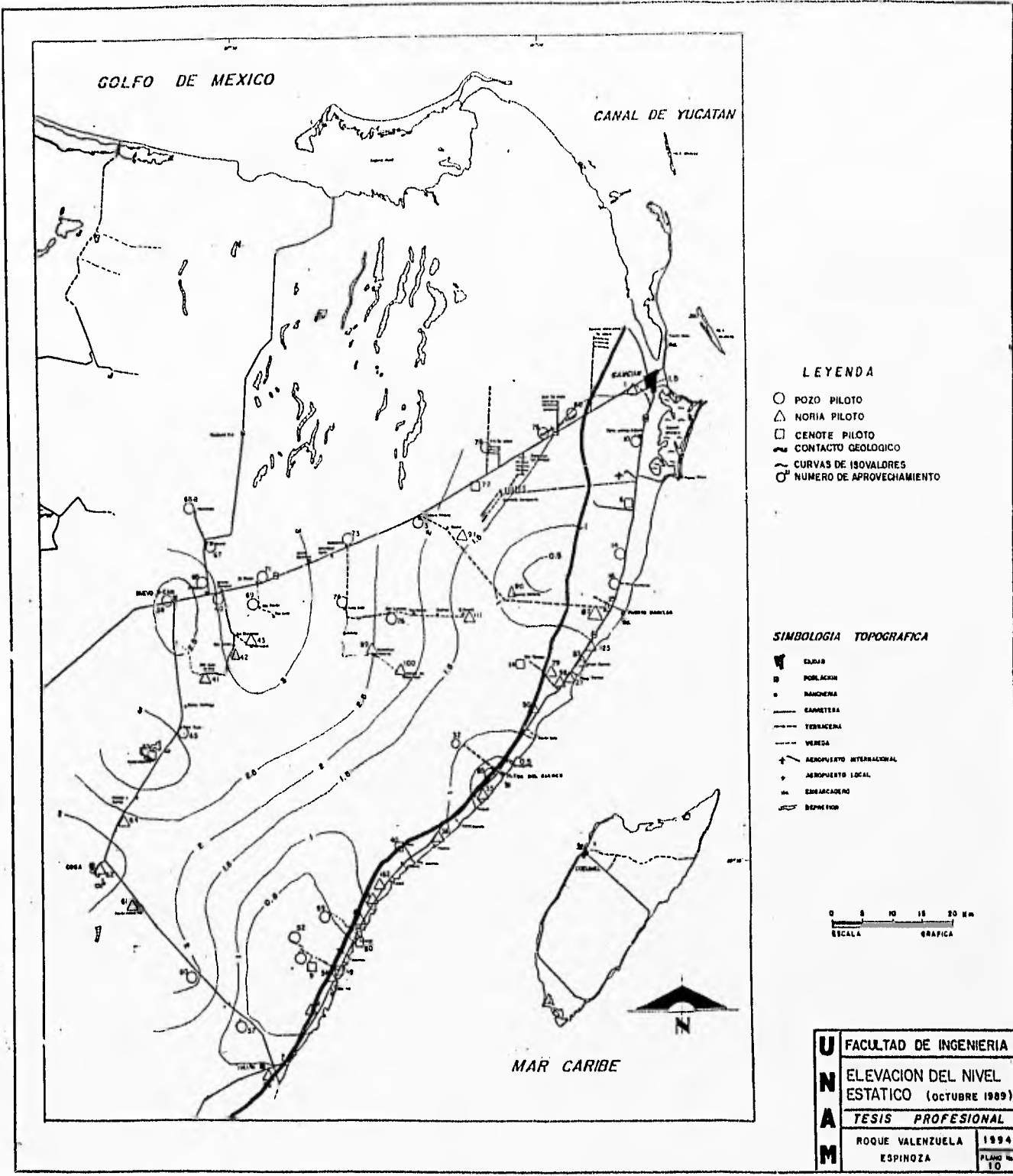
UNIVERSIDAD DE INGENIERIA	PROFUNDIDAD DE NIVEL
	ESTADISTICO (OCTUBRE '89)
ANÁLISIS	TESIS PROFESIONAL
	1994
MAGISTER	MOQUE VALENZUELA
	ESPIÑOZA



- SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA**
- CANAL
 - POZO ACUÍFERO
 - MANOJERA
 - CANCHAL
 - TEMPORAL
 - YERBA
 - AGUACERO INTERMEDIARIO
 - AGUACERO LOCAL
 - DRENANTE
 - BARRIO

- LEYENDA**
- POZO PILOTO
 - △ NORIA PILOTO
 - CENOTE PILOTO
 - CONTACTO GEOLOGICO
 - CURVA DE NIVEL PROFUNDIDAD
 - PROFUNDIDAD DEL NIVEL MEDIDO
 - NÚMERO DE APROVECHAMIENTO





GOLFO DE MEXICO

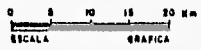
CANAL DE YUCATAN

LEYENDA

- POZO PILOTO
- △ NORIA PILOTO
- CENOTE PILOTO
- CONTACTO GEOLOGICO
- ~ CURVAS DE ISOVALORES
- ⊙ NUMERO DE APROVECHAMIENTO

SIMBOLOGIA TOPOGRAFICA

- EDIFICIO
- POBLACION
- RANCHERIA
- CARRETERA
- TERRACENA
- VEREDA
- ✈ AEROPUERTO INTERNACIONAL
- ✈ AEROPUERTO LOCAL
- ⚓ EMBARCADERO
- ⚓ DEPÓSITO



MAR CARIBE

U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO (OCTUBRE 1989)	
	TESIS PROFESIONAL	
	ROQUE VALENZUELA ESPINOZA	1994 PLANO No 10