

03090
3
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS PROFESIONALES Y DE POSGRADO
DEL COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES**

**INSTITUTO DE GEOFISICA
POSGRADO EN GEOFISICA**

FALLA DE ORIGEN

ESTUDIO GEOQUIMICO DEL ANILLO DE CENOTES, YUCATAN

T E S I S

**Que para obtener el grado de
MAESTRA EN AGUAS SUBTERRANEAS
Presenta**

Guadalupe Velázquez Olimán



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

Con amor y agradecimiento dedico esta tesis a:

Graciela (R.I.P) y Salvador, los autores de mi vida.

Javier, quien da luz a una faseta de mi vida. Con su cariño y respeto motiva una ilusión.

Daniela, Fabian, Ivan, Abraham, Erika y Ezequiel, quienes vienen pisando fuerte atrás de mi, y son un estímulo para salir adelante.

Pepe, Ana y Paty, quienes con su amor y apoyo siempre impulsan mis objetivos. Agradezco a Dios haber compartido el mismo vientre donde nos formamos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Luis E. Marín su interés para iniciar y realizar este proyecto, la dirección de la tesis, el apoyo económico otorgado durante los estudios de maestría, su amistad y haber abierto las puertas que me permitieron ampliar mi horizonte profesional. Al Dr. Eugene C. Perry por todo el apoyo técnico y profesional brindado que orientó y estimuló este trabajo, el apoyo económico, su confianza, generosidad, amistad y momentos compartidos.

Este trabajo se realizó con el apoyo económico de los proyectos de DGAPA-UNAM (INI06891) y del CONACyT (T2057) otorgados al Dr. Luis E. Marín. Por medio del Dr. Eugene C. Perry se recibió apoyo económico de la National Science Foundation grant (EAR 9304840). Agradezco al CONACyT la beca expedida para la realización de mis estudios.

Agradezco a todos los profesores que me impartieron clases, porque me legaron parte de su conocimiento. A la Dra. Rosa Ma. Prol por su apoyo durante su coordinación del posgrado y los momentos compartidos. A Norma Bravo, Ana Ma. Rodríguez y Ma. Eugenia Malagón, por su apoyo administrativo en el posgrado y por el tiempo compartido.

A los Drs. Dante Morán y Adrián Ortega, al M. en C. Carlos Gutiérrez y al M. en C. Salvador Peña por sus valiosos comentarios en la revisión de este trabajo. A Pedro Vera por sus correcciones, a Alberto Trejo y Francisco Velázquez, por su colaboración en campo y sus comentarios. A Liz y Esther Perry por su colaboración en campo y los momentos compartidos. A los Ings. Jorge Vidal y Renán Méndez de la Comisión Nacional del Agua en Yucatán, por las facilidades e información otorgadas para este proyecto. A Birgit por su disposición para asistir en cualquier necesidad, por su curso de métodos geofísicos. A Alfonso García por su soporte técnico en la realización de mis figuras. A David Vázquez y al personal de cómputo, por su asistencia. A Alejandra Cortes por su interés y compañerismo.

A mis compañeros de generación, Renato Castro, Erika Volbert, Marcela Cañedo, Esteban y Liz. A mis compañeros del posgrado, Lolita Ibáñez, Jaime Domínguez, Mario Fernández, David Escobedo, Carlos Ortiz, Marco Torres, Alexei, Frank, Eugenio Polanco, Carmen Hernández, Ricardo, Juan Payero, Alejandro Lara, Gaudencio, María, a todos gracias por los momentos compartidos y la ayuda brindada. A toda la gente nueva que se ha integrado al posgrado, Carlos fuentes, Lissette, Rogelio, Arturo, Martín, Alfredo, que me han indicado que es tiempo de abrir las alas y seguir adelante, también por los momentos compartidos. A mis compañeros del grupo "los Chicxulucos" Birgit Steinich, Pedro Vera, Eric Morales, Jacobo Guinzberg, Liz, y recientemente integrados Alberto, Francisco e Isabel, gracias por el espacio y experiencia compartidas.

Gracias al personal del Instituto, Dr. Marco Guzmán, Dr. Carlos Valdés, C.P. Araceli Carballeda, C.P. Ma. Esther Cervantes, C.P. Francisco Ferruzca, Ing. Raymundo Rodríguez, M. en C. Patricia Santillan, Ing. Guillermo Hernández, Graciela Solache, Alma, Sandra, Susana, a las

secretarías y todas las personas que con su buena disposición me ayudaron en cualquier trámite y necesidad.

Agradezco a la Familia Genis Velázquez y descendientes, que siempre me tienen presente en sus oraciones, a la Familia Olimán Vázquez, a la Familia Rosales Olimán, a Amadita Olimán Mejía, a la Familia Estevez Velázquez y descendientes, a la Familia Godínez Velázquez y descendientes, a todos agradezco sus buenos deseos y bendiciones. Agradezco a Marta Mellado porque me ha puesto un ejemplo en una etapa de su vida y por mantenerse cerca.

Especialmente agradezco a Elizabeth Prieto, por la ilusión compartida para la culminación de este proyecto, por el trozo de vida compartido, por su amistad, confianza, por estar siempre cerca y servicial en muchas de mis necesidades, por poner orden a mis desórdenes, por su entereza que hoy le permite disfrutar una de sus ilusiones: Frank Eduardo. A Pathy Carmona, por su paciencia, amistad, confianza y estímulo de tantos años. Gracias por ser un ejemplo latente de superación. A las familias Carmona Landa y Prieto Santa Anna, por brindarme siempre un espacio en su hogar y su corazón, gracias por su confianza y apoyo de tanto tiempo. A la Familia Marín Tobón, a Eugene y Joan Perry, por su hospitalidad, amistad y confianza en todos los momentos. A Teodoro Hernández, por su amistad y confianza. A Lolita Ibáñez, por su amistad, confianza, espacio y momentos compartidos. A Lissette López porque me ha enseñado la fortaleza de los cubanos, porque mantiene la ilusión de un mañana y, con quien he comprobado que la amistad no depende del tiempo ni la distancia, sino de la intensidad con que se entregue, gracias por su amistad, confianza, espacio y experiencias compartidas

Al creador del principio y fin, que ha puesto a toda esta gente en mi camino.

RESUMEN

Para dilucidar el papel que juega el anillo de cenotes (alineación semi-circular de dolinas cársticas) en el sistema hidrogeológico al noroeste de Yucatán, se utilizó la relación SO_4/Cl como trazador natural. Se analizaron y procesaron resultados de 39 sitios. La mayoría de ellos son pozos de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Yucatán, otros son sistemas naturales o pozos privados. Se hicieron cinco campañas de muestreo. Los meses muestreados fueron junio, septiembre y diciembre de 1993, abril y agosto de 1994. Se repitieron muestreos en nueve sitios en diferente época, con la finalidad de percibir algún cambio temporal en el sistema. La mayor concentración de sulfatos se encontró en Tzucacab, sitio localizado aproximadamente a 147.5 km (en línea recta) al sureste del puerto de Chicxulub.

De acuerdo a los índices de saturación y haciendo relaciones entre los iones principales, se observa que la fuente de sulfato, calcio, sodio y estroncio, no es solamente el proceso de mezcla entre agua de mar y agua saturada con $CaCO_3$, sino la disolución de evaporitas que subyacen el noroeste de Yucatán.

En los sitios que se encuentran al oeste y en la parte externa del semi-círculo, la relación equivalente SO_4/Cl fluctúa desde 1.096, para el sitio con mayor concentración de sulfatos, hasta 0.460, para un sitio casi sobre el anillo. Al cruzar el anillo, y conforme se acercan a la costa, los sitios van presentando una relación cada vez más semejante a la del mar (0.103). Estos resultados apoyan la hipótesis de que el anillo es un conducto de alta permeabilidad, donde converge agua procedente del sur, así como agua de la parte interna del semi-círculo, y es transportada a las costas este y oeste.

En la parte este del anillo, los resultados no muestran influencia de una fuente de sulfatos, pues la relación SO_4/Cl , tanto fuera como dentro del anillo, es parecida a la del mar. Estos resultados apoyan la hipótesis de que existe un parte-aguas en el mismo semi-círculo. Los datos indican una diferencia de los valores observados en la zona oeste, a partir de Telchaquillo. Los resultados de los análisis químicos de los pozos UNAM-2 y UNAM-5, muestreados a una profundidad de 350 y 400 m respectivamente, demostraron la presencia de la intrusión salina, a una distancia de 110 km de la costa norte.

INDICE

	Página
RESUMEN.....	v
Lista de Tablas.....	vii
Lista de Gráficas.....	viii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Apéndices.....	x
Capitulos	
1. INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	2
2. MARCO FISICO	4
2.1 Clima.....	4
2.2 Límites geomorfológicos.....	4
2.3 Fisiografía.....	4
3. GEOLOGIA	6
3.1 Geología anterior al impacto.....	6
3.2 Geología del impacto.....	7
3.3 Geología posterior al impacto.....	8
4. HIDROGEOLOGIA	10
4.1 Hidrogeología regional.....	10
4.2 Tipo de acuífero.....	10
4.3 Intrusión salina.....	11
4.4 Permeabilidad.....	11
4.5 Anillo de cenotes.....	12
5. METODOLOGIA	13
5.1 Planeación del trabajo de campo.....	13
5.2 Procedimiento de muestreo.....	13
5.3 Sitios y campañas de muestreo.....	16
5.4 Análisis y selección de muestras.....	17
5.5 Control de calidad para los análisis químicos.....	18
6. RESULTADOS Y DISCUSION	20
6.1 Resultados.....	20
6.2 Semicírculo de cenotes.....	21
6.3 Parteaguas.....	23
6.4 Variaciones temporales del acuífero.....	24
6.5 Intrusión salina.....	25
6.6 Interacción agua-roca.....	26
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
LITERATURA CITADA	33
APENDICES	68

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Lista de accesorios para campo	37
2. Parámetros de campo	39
3. Resultados químicos en meq/l, de las muestras tomadas en junio de 1993	41
4. Resultados químicos en meq/l, de las muestras tomadas en septiembre-diciembre de 1993	42
5. Resultados químicos en meq/l, de las muestras tomadas en abril y agosto de 1994, y muestras salinas de diciembre de 1993	43
6. Resultados químicos en meq/l, de las muestras que tuvieron un balance iónico con un porcentaje de error menor al 5 %	44
7. Relaciones $(SO_4/Cl) \times 1000$, $Na/Cl \times 1000$, Ca/SO_4 , $(K/Cl) \times 100$, $(Sr/SO_4) \times 1000$, $(Sr/Cl) \times 1000$	45
8. Índices de saturación para los minerales de anhidrita, aragonita, calcita, celestita, dolomita, yeso y halita	46
9. Excesos de los iones principales de las muestras del lente de agua dulce, con respecto a la concentración esperada para la mezcla entre agua del mar y agua subterránea saturada con $CaCO_3$	47
10. Factores de exceso de los iones principales de las muestras profundas con respecto al mar	48

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica	Página
1. Relación sulfato-cloruro, muestras del lente de agua dulce	49
2. Relación sodio-cloruro, muestras del lente de agua dulce	50
3. Relación sodio-cloruro, muestras profundas y del mar	51
4. Relación estroncio-sulfato, muestras del lente de agua dulce	52
5. Relación estroncio-sulfato, muestras profundas y del mar	53
6. Relación estroncio-cloruro, muestras del lente de agua dulce	54
7. Relación estroncio-cloruro, muestras profundas y del mar	55
8. Relación de exceso de calcio y magnesio contra exceso de sulfato, para las muestras del lente de agua dulce	56
9. (Ca/SO_4) contra SO_4 , muestras del lente de agua dulce	57
10. $(Exceso Ca/Exceso SO_4)$ contra Exceso SO_4 , muestras del lente de agua dulce	58
11. Relación potasio-cloruro, muestras del lente de agua dulce	59

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Ubicación de la zona de estudio	60
2. Localización de los pozos profundos UNAM-2 y UNAM-5, dirección de flujo del agua subterránea, semicírculo de cenotes	61
3. $(SO_4/Cl) \times 1000$, concentración de sulfatos en meq/l	62
4. Líneas de isorelación $(SO_4/Cl) \times 1000$	63
5. Niveles freáticos en los transectos de San Ingacio-Kopomá y Dzilam de Bravo-Sotuta. Figura tomada de Marín, 1990	64
6. Líneas de isorelación $(Na/Cl) \times 1000$	65
7. Líneas de isorelación $(Sr/Cl) \times 1000$	66
8. Líneas de isorelación $(K/Cl) \times 100$	67

LISTA DE APENDICES

Apéndice	Página
1. Procedimiento para el lavado de botellas	68
2. Procedimiento para determinar alcalinidad por el método de Gran, con el ejemplo de Peto	70
3. Resultados químicos en partes por millón (ppm)	74

INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

La zona de estudio se localiza al sureste de la República Mexicana, en el Estado de Yucatán (Figura 1). El Estado de Yucatán se distingue por ser una plataforma con muy poco relieve y tener una superficie que está ocupada por una capa de caliche. Esta superficie está caracterizada por su topografía cárstica. El fracturamiento de la zona vadosa, que se extiende hacia la superficie, la intemperización de la superficie, y la carstificación del subsuelo, han generado un sistema de alta permeabilidad, el cual permite la rápida infiltración de la precipitación pluvial. El poco relieve de la plataforma y la rápida infiltración del agua meteórica evitan la formación de ríos. Debido a estas particularidades, el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento para las actividades socio-económicas de la población.

Un rasgo singular en Yucatán, es el denominado "anillo de cenotes", que es una alineación semi-circular de dolinas cársticas, (Figura 2). Esta alineación, se puede apreciar en fotos aéreas del noroeste de la Península de Yucatán, también los cenotes se pueden ver en la imagen de satélite publicada por Pope y Duller (1989). Pope y otros, (1991; 1993) y Perry y otros, (1992) han propuesto una relación entre el anillo de cenotes y el cráter de impacto, ocurrido en el límite del K/T (Hildebrand y otros, 1991; Sharpton y otros, 1992; Swisher y otros, 1992). Sobreponiendo la figura que indica la localización de los anillos del cráter, identificados por Sharpton, y la imagen de satélite que muestra el semicírculo de cenotes, se puede observar que los cenotes del semicírculo se encuentran entre el segundo y tercer anillo propuesto por Sharpton (Perry y otros, 1995).

El anillo de cenotes ha sido propuesto como una zona de alta permeabilidad con características hidrogeológicas especiales. Se define como un conducto que intercepta agua subterránea, procedente del sur del estado y de la parte interna del anillo, y la

transporta a través de éste hacia las costas (Figura 2), (Marín y otros, 1987; Marín, 1990; Perry y otros, 1995).

Otra situación peculiar de Yucatán, es la presencia de intrusión salina. La explotación del acuífero debe ser bien conocida y controlada para evitar una disminución irreversible del espesor del lente de agua dulce y también la contaminación natural del acuífero. Para racionalizar la extracción del agua subterránea se debe conocer la geometría del acuífero; es importante determinar el frente de la intrusión salina para enmarcar el lente de agua dulce.

Los procesos hidrogeológicos que controlan el carácter químico del agua en Yucatán, son la disolución de minerales de carbonatos y la mezcla de agua dulce y agua salada (Back y Hanshaw, 1970). Al sur de Mérida, en Muna, el agua presenta concentraciones altas de sulfato (Figura 2), esto se atribuye a la presencia de yeso y anhidrita en el área, siendo posiblemente la Sierrita de Ticul la fuente de este ión (Back y Hanshaw, 1970).

1.2 Objetivos

La estrategia de este estudio fue utilizar los iones de cloruro y sulfato como trazadores naturales. El criterio para emplear estos iones fue: 1) considerar que normalmente el cloruro se comporta como un ión conservativo; 2) se escogió el sulfato aprovechando la fuente natural que se había inferido al sur del anillo de cenotes (Back y Hanshaw, 1970). A pesar de que parte del área de estudio es una zona costera, y el cloruro puede ser incorporado al agua de lluvia por transportación aérea desde el mar, no se consideró gran influencia de este proceso en las muestras de agua de este estudio, porque aunque no se puede negar la influencia del agua de lluvia en el contenido de cloruro y sulfato (para este caso) en el agua dulce del acuífero, se considera que el contenido de cloruro y sulfato es muy bajo en el agua de lluvia comparado con el contenido de estos iones en el agua subterránea de la zona de estudio. No se cuenta con información de las concentraciones de estos iones en el agua

de lluvia de Yucatán, pero como referencia se tomaron los datos de los lagos que se encuentran cerca de la costa oeste de Suecia (Stumm and Morgan, 1981); la concentración para cloruro es 0.16 meq/l y para sulfato es 0.22 meq/l. Estos datos están concentrados 1.5 veces con respecto a los originales, porque se considera la evaporación y la transpiración de las plantas antes de que el agua de lluvia llegue al lago. Para los fines de la influencia del agua de lluvia en Yucatán, también se debe considerar que el muestreo en su mayoría se realizó en pozos de agua potable, que tienen una profundidad que varía desde 13 hasta 60 metros (Tabla 2). Haciendo estas consideraciones, se utilizó el cloruro como índice de mezcla entre agua del lente de agua dulce y agua de la intrusión salina, para visualizar el avance de ésta última tierra adentro. Para esta situación particular, se tomó la relación sulfato/cloruro como indicador de dirección de flujo para: 1) dilucidar la influencia del semicírculo de cenotes en la dinámica del acuífero de Yucatán, y 2) delimitar el frente de la intrusión salina que subyace la mayor parte del noroeste de Yucatán.

2. MARCO FISICO

2.1 Clima

El clima dominante en Yucatán es de tipo tropical húmedo. La temporada de lluvias abarca los meses de junio a octubre, siendo julio y agosto los más lluviosos. El estiaje comprende los meses de noviembre a mayo. La distribución de la precipitación pluvial tiene una tendencia creciente de norte a sur y de poniente a oriente. El valor promedio anual de precipitación en el Estado, varía de 500 mm en su porción noroccidental a 1500 mm en su borde oriental. Según el mapa de isoyetas de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), el lugar con mayor precipitación en la zona de estudio se encuentra al sureste de Mérida, entre Maní y Oxkutzcab, con una precipitación media anual de 1300 mm (SARH, 1988).

2.2 Límites geomorfológicos

Geográficamente, la Península de Yucatán es una plataforma con muy poco relieve. Sus límites geomorfológicos incluyendo el banco de Campeche son, según López Ramos (1979) los siguientes: **a)** al norte y parte noroeste: el Talud Continental del Banco de Campeche; **b)** al sur el relieve positivo del Arco de la Libertad, que incluye el Petén de Guatemala y las montañas Mayas de Belice. Otros autores (Donnelly y otros, 1990) prefieren una interpretación del bloque Yucatán-Campeche como una unidad tectónica más que geomorfológica, denominada bloque Maya, ellos lo extienden al sur hasta el Valle de Motagua; **c)** al oriente el Talud Continental del Mar Caribe; y **d)** al oeste la Planicie Costera del Golfo de México.

2.3 Fisiografía

La fisiografía del área de acuerdo a varios autores (López Ramos, 1979; Morán, 1984; Weidie, 1985; Donnelly y otros, 1990) se ha definido en tres regiones: **1)** la Planicie Mérida-Valladolid-Puerto Juárez, ó también llamada "Ilanuras con dolinas". Esta provincia abarca las porciones norte y centro de Yucatán. Está formada por pendientes suaves y

elevaciones de unos cuantos metros sobre el nivel medio del mar. La altura promedio es de 15 m. La intensidad de carstificación varía considerablemente dentro de la planicie dependiendo si la superficie geomorfológica en cuestión, yace dentro del anillo de cenotes (semicírculo de dolinas cársticas) donde se observa muy poco relieve, o fuera del anillo donde se perciben relieves de unos cuantos metros hasta aproximadamente tres decenas (Tulaczyk y Perry, comunicación oral); **2)** la Sierrita de Ticúl formada por lomas de 50 a 100 m de altitud. Este lomerío tiene una orientación noroeste-sureste, con una longitud de aproximadamente 110 km (Figura 2); **3)** la Planicie central de la Península de Yucatán. Siendo ésta la más extensa de las tres, delimitándose al sur por Guatemala, al norte por la Península del Petén, al este y oeste la delimitan el Golfo de México y el Mar Caribe respectivamente. Esta área en general es de un relieve plano con algunas ondulaciones sin ninguna orientación fija.

3. GEOLOGÍA

En este capítulo se describe de manera general la estratigrafía y los procesos geológicos ocurridos en la Península. El objetivo de este capítulo es describir la relación que existe entre el cráter generado por el impacto de un cuerpo extraterrestre con la superficie de la tierra y el semicírculo de cenotes.

3.1 Geología anterior al impacto

En el área de estudio no hay afloramiento del basamento metamórfico, sin embargo éste aflora al sur de la Península. Entre los tipos de roca metamórfica expuestos, se pueden reconocer gneises, esquistos, filitas, argillitas, anfibolitas, mármol y cuarcitas (Weidie, 1985). El fechamiento de la filita, que se recuperó de las perforaciones hechas en el Golfo de México, registró una edad aproximada de 500 m. a. (Schlager y otros, 1984). La historia del Paleozoico tardío al Jurásico tardío incluye los siguientes episodios significativos: la existencia de una orogénesis, entre el Pérmico tardío y el Triásico tardío. Esta orogénesis se manifiesta como una elevación topográfica del basamento, con orientación norte-noreste en la frontera este de Yucatán, paralela a la costa del Caribe (Ward y otros, 1985). Desde el Triásico hasta el Jurásico tardío se llevaron a cabo varios eventos: a) sedimentación de material identificado como lechos rojos, producto de la erosión de las rocas de un borde oriental del Paleozoico tardío; los tipos de roca dominantes en estos depósitos son los conglomerados, areniscas arcillosas y pizarras (Weidie, 1985). b) Fracturamiento y fallamiento con dirección noroeste, debido principalmente a fallas normales acompañadas por grabenes y horsts, asociados a la apertura del Golfo de México. c) Las fallas encontradas al este de Yucatán, en las zonas de Catoche y Río Hondo, con orientación noreste, asociadas a la rotación antihoraria del bloque Yucatán respecto al bloque norte de centro América (Donnelly y otros, 1990). Con el Jurásico tardío empezaron las transgresiones marinas, cubriéndose la Península con aguas someras, marcándose el inicio de depósitos de carbonatos y evaporitas.

3.2 Geología del impacto

Con respecto a la evolución geológica de la Península después del Jurásico tardío, son importantes los trabajos publicados en la última década, los cuales modificaron la interpretación original de la geología en la Península de Yucatán. En 1980, Alvarez y otros propusieron que las extinciones masivas observadas en el límite del Cretácico-Terciario (K/T) ocurrieron por el impacto de un cuerpo extraterrestre con la tierra. En 1981, Penfield y Camargo presentaron un estudio geofísico, de gravimetría y campo magnético del noroeste de la Península de Yucatán, del cual interpretaron las anomalías de los registros como una estructura de impacto. Esta hipótesis fue apoyada por Hildebrand y otros (1991), Sharpton y otros (1992), quienes ubicaron la existencia de una estructura de impacto, en el límite del Cretácico-Terciario. Estudios más detallados han definido al cráter del impacto como una estructura multi-anillada, con un tamaño de aproximadamente 300 km de diámetro (Sharpton y otros, 1993). Por otro lado, la re-interpretación de dos de los sitios perforados en 1981 por el Deep Sea Drilling Project, publicado por Alvarez y otros (1992), presentan evidencia de una ola gigante en el límite del Cretácico-Terciario. Los principales puntos de evidencia expuestos por Alvarez y sus colaboradores son: 1) las calizas del Cenomaniano, subyacen un hiatus que abarca cinco pisos del Cretácico. 2) Se encontraron 45 m de gijaros de lutita, que cubren a las calizas del Cenomaniano; esto se debe posiblemente a un derrumbe submarino de edad K-T. 3) Existen más de 2.5 m de areniscas depositadas por corrientes. Estas areniscas contienen anomalías de iridio, tectitas, y cuarzo impactado; esto se considera material expulsado como resultado del impacto de un cuerpo extraterrestre con la superficie de la tierra.

A raíz de los resultados publicados acerca del cráter de impacto, se ha despertado el interés de investigadores involucrados en esta zona, para indagar alguna relación entre el semicírculo de cenotes (descrito anteriormente) y dicho cráter. Ya se han propuesto

hipótesis que tratan de explicar el posible origen del anillo de cenotes. Pope y otros (1991) sugieren que el anillo se formó por el derrumbe de material del impacto que se encontraba en el borde del cráter de Chicxulub. Perry y otros (1992) propusieron que el anillo se pudo haber formado por un arrecife en el mar Paleoceno, edificado sobre el material proyectado en el borde del cráter, y ésto posteriormente pudo haber favorecido un canal de flujo de agua subterránea. Los resultados de un experimento de sismica de reflexión que cruzan la extensión del cráter en el mar, indican que existe un fallamiento normal que coincide con el anillo y ésto ha producido un desplazamiento de las rocas Cenozoicas hacia la cuenca hecha por el impacto (Camargo-Zanoguera y Suárez, 1994). Estas fallas observadas posiblemente se deben a la recarga de la cuenca; la evidencia más firme de que la cuenca era un lugar de relleno durante el Oligoceno, es que la distribución de los estratos del Oligoceno y Mioceno dentro del anillo, se encuentran disconformes sobre los estratos del Eoceno. Además de que mientras los depósitos del Oligoceno están ausentes fuera del anillo, dentro de éste se registraron aproximadamente 150 m de rocas Oligocénicas en el pozo Sacapuc 1, que se encuentra cerca del centro de la cuenca (López Ramos, 1973; Perry y otros, 1995). El sistema de fallas del cráter de impacto, probablemente activado por la recarga de la cuenca, ha favorecido la disolución y formación de cavidades.

3.3 Geología posterior al impacto

Prosiguiendo con la evolución geológica de la Península, enseguida se describen de manera general los eventos ocurridos durante el Terciario. Con el hundimiento paulatino de la plataforma de Yucatán durante el Cretácico y las transgresiones marinas, se siguen favoreciendo los depósitos extensos de carbonatos y evaporitas. Las facies cambian gradualmente de arenas continentales y conglomerados a carbonatos dolomíticos que corresponden a un intervalo de evaporación. En los sedimentos del Eoceno inferior se encuentran calizas que contienen pedernal y yeso (Back y Hanshaw, 1970); estos

depósitos afloran en la Sierrita de Ticul (SARH, 1988). Sobre la secuencia anterior, yacen calizas del Eoceno Medio, microcristalinas, de coloración clara, grano fino, estratificación masiva, que también contienen pedernal; esta secuencia se encuentra expuesta en la parte centro y sur de Yucatán. En las estratificaciones del Eoceno Medio Superior y Eoceno Superior se encuentran calizas blancas cristalinas, con textura sacaroide de estratificación masiva, expuestas al noreste de la Sierrita de Ticul.

Las rocas del Oligoceno se encuentran expuestas al sur de la ciudad de Mérida (SARH, 1988). Al norte de Mérida en el pozo Sacapuc 1, se han encontrado estratos que tienen un espesor hasta de 150 m sin embargo, no se observa la presencia de estos depósitos fuera del anillo (Perry y otros, 1995, López Ramos, 1973). La ausencia del Oligoceno fuera del anillo de cenotes apoya la hipótesis de Perry y otros (1995) de que mientras la parte externa del anillo era una zona de erosión, la parte interna era una cuenca de sedimentación. Las rocas del Oligoceno están constituidas principalmente por calizas, que varían de color blanco a crema, con arcillas blancas y capas silíceas (Back y Hanshaw, 1970). Según el mapa geológico de la SARH (1988) esta litología presenta un aspecto coquinoide; el espesor de esta unidad decrece de norte a sur. Al norte y oriente de Yucatán, a excepción de la faja costera, se encuentran los estratos del Plioceno y Mioceno (SARH, 1988), que están constituidos principalmente por calizas coquinoideas, calizas amarillas altamente masivas con intercalaciones arenosas. En la faja costera, que tiene un ancho entre 5 y 30 km, se encuentran calizas coquinoideas de color amarillo blanquisco con una matriz porosa criptocristalina de composición calcárea, las cuales presentan de manera local fuerte intemperismo; están compuestas en su mayoría por conchas de pelecípodos. Estos depósitos son de edad Cuaternaria (Back y Hanshaw, 1970).

4. HIDROGEOLOGIA

4.1 Hidrogeología regional

A la hidrogeología de Yucatán lo que le da características muy particulares, es una plataforma con muy poco relieve y alta permeabilidad. En consecuencia, el gradiente hidráulico es muy bajo, con un promedio de 10 mm/km (Marín, 1990). El fracturamiento de la superficie y la carstificación del subsuelo, favorecen la rápida infiltración de la lluvia. Estas fracturas en la costa se encuentran rellenas, porque ahí se está llevando a cabo un proceso de cementación de los poros y de pequeñas fracturas como resultado de la precipitación de calcita (Perry y otros, 1989). El bajo relieve, la alta permeabilidad y el fracturamiento en la superficie no permiten la formación de ríos. A excepción de ríos muy cortos cerca de la costa (Bocas de Dzilam) (Perry y otros, 1995), no existe drenaje superficial en el noroeste de Yucatán.

4.2 Tipo de acuífero

El acuífero cárstico en la zona de estudio es libre, excepto por una estrecha banda que tiene un rango de 5 a 30 km de ancho, que se extiende a lo largo de la costa (Perry y otros, 1989). Se encuentra limitado inferiormente por material poco permeable, como son pizarras arcillosas y margas. Los sedimentos en la parte superior de la columna geológica, están constituidos principalmente por calizas masivas altamente recristalizadas (dolomitas), que contienen en algunas zonas, capas de arcilla y sílice. Por el tipo de depósitos, la permeabilidad es más baja en estas zonas. En la secuencia superior se encuentran calizas coquinoideas con intercalaciones arenosas. Debido a los esqueletos y fósiles depositados en esta sección, el flujo de agua se facilita y el suelo adquiere valores altos de permeabilidad. También se han encontrado evaporitas en diferentes lugares, algunos de los cuales son: a) en el pozo Ticul 1 de PEMEX, se encontraron a 500 m; b) en el pozo UNAM-5 se observó yeso, a una profundidad de 330

m (Marín, comunicación oral); c) en X-Can (al este de Mérida) también se encontraron capas de anhidrita a 125 m (Back y Hanshaw, 1970).

4.3 Intrusión salina

El acuífero cárstico de Yucatán forma un lente de agua dulce que flota sobre agua salada. El espesor saturado del lente de agua dulce controla la cuña de agua salada que está presente en la zona costera. El espesor saturado del lente va creciendo tierra adentro, en la zona de estudio varía en un rango de menos de 30 m, para una faja de 20 km a partir del litoral, hasta aproximadamente 70 m (Marín, 1990).

4.4 Permeabilidad

La circulación del agua subterránea en la Península de Yucatán está altamente influenciada por la permeabilidad secundaria desarrollada en este medio. La disolución química de las rocas sedimentarias del Terciario, ha favorecido el desarrollo de un sistema cárstico en la Península. Las calizas cuya porosidad ha sido favorecida por la gran solubilidad de los minerales de carbonatos, son altamente permeables (Back y Hanshaw, 1970). Otro aspecto importante para la permeabilidad secundaria, es el fracturamiento, que permite el flujo de agua y con él la disolución preferencial del subsuelo a lo largo de los planos de fractura. Según los núcleos obtenidos de la perforación hecha al sur de Telchaquillo (pozo UNAM-2), se observan fracturas y zonas permeables hasta profundidades de 350 m (Marín, comunicación oral).

Hay varios tipos de permeabilidad que se pueden apreciar en algunos sistemas cársticos, principalmente se observan la permeabilidad cavernosa y la permeabilidad intergranular. La primera se favorece por variaciones en el nivel del mar, la interfase de agua dulce-agua salada frecuentemente presenta un carácter disolvente, porque el agua de mezcla se encuentra subsaturada con respecto a calcita. La formación de cavernas también se inicia en el nivel freático, debido a la mezcla de agua del acuífero con agua

proveniente de la superficie. El CO₂ disuelto en el agua meteórica y aquel producido por la descomposición de las raíces en el subsuelo provocan que el agua que se infiltra tenga un carácter disolvente. La permeabilidad intergranular se observa donde hay fósiles de material más soluble que la calcita pura, que se están disolviendo por un proceso selectivo.

4.5 anillo de cenotes

Un hecho importante que afecta la hidrogeología de Yucatán es el denominado "anillo de cenotes". Marín (1990) propuso la hipótesis de que el semicírculo de cenotes es un conducto de alta permeabilidad, que transporta agua subterránea a lo largo de éste hacia la costa. Esta hipótesis es evidenciada por: 1) la alineación de los cenotes mismos; 2) los resultados de mediciones de nivel freático, realizados en dos cortes norte-sur que cruzan el semicírculo de cenotes y uno este-oeste, caracterizados por una declinación del nivel de agua hacia el anillo de cenotes, (Figura 3); 3) la presencia de "ojos de agua" dulce donde el anillo intercepta la costa; 4) a pesar de la fuerte corriente de arena hacia la costa de Yucatan, que forma barreras de arena, estas barreras se mantienen abiertas hacia el mar debido al flujo de agua dulce (esteros de Celestún y Bocas de Dzilam); 5) Asimismo, Steinich y Marín (en prensa) encontraron valores bajos de resistividad que indican una alta permeabilidad en el anillo.

5. METODOLOGÍA

5.1 Planeación del trabajo de campo

Conforme a los objetivos de este estudio, el trabajo de campo realizado fue el muestreo de agua subterránea, el cual se planeó de la siguiente manera: se ubicaron en un mapa de la zona de estudio los posibles pozos a muestrear, dependiendo de su cobertura y del tiempo que se había programado para el muestreo. Se utilizaron las cartas topográficas con escala 1:250 000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Las cartas utilizadas fueron: Mérida F16-10, Tizimin F16-7, Calkini F15-9-12. Se hizo una lista del equipo y accesorios necesarios para el muestreo, Tabla 1. Después de la primera salida a campo, realizada del 22 al 24 de junio de 1993, se tuvo idea del número de pozos que se podían muestrear en función de su accesibilidad y distribución. En este caso la mayoría de pozos fueron de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Yucatán (JAPAY). En promedio se muestrearon cinco pozos por día.

5.2 Procedimiento de muestreo

Se llevaron a campo botellas de 125 ml, previamente lavadas con solución al 10% de ácido nítrico. Se utilizaron tres botellas por pozo, una para la determinación de alcalinidad, otra para el análisis de aniones y otra para el análisis de cationes; todas las botellas tuvieron el mismo procedimiento de lavado; el procedimiento para el lavado de botellas se describe en el Apéndice 1.

Los parámetros de campo (pH, temperatura, conductividad, potencial de redox y oxígeno disuelto), fueron medidos con un registrador de multiparámetros de la calidad del agua. El equipo utilizado fue un Hidrolab Datasonde 3. El equipo se calibró para pH con soluciones buffer de pH cuatro y siete. Para la calibración de redox se utilizó quinidrona; se agregó un poco de la sustancia tanto en la botella de buffer de pH cuatro

como en la de siete, la quinidrona debía estar ligeramente en exceso y se dejaba durante dos o tres horas para que la solución se equilibrara.

La medida de los parámetros de campo se hizo en un dispositivo de flujo en línea (flow-through device), para que el flujo se encontrara en contacto directo y constante con los electrodos del equipo. Las medidas se apuntaron una vez que los parámetros estaban estabilizados. Las muestras se tomaron después de medir los parámetros mencionados.

Debido a que algunos sitios no contaban con llaves en la tubería antes del sistema de cloración ó simplemente no tenían llaves para muestreos, ó eran sistemas naturales (como cenotes) ó pozos particulares, se tuvieron que hacer medidas y muestreos indirectos. En estos casos hubo que bombear el agua manualmente o introducir algún depósito para extraer agua. Homún (22/06/93), Mama (22/06/93) y San José Tipceh (18/12/93), fueron sitios donde había fuga en el eje de las bombas, aquí se usó un depósito para almacenar el agua que goteaba; estas muestras presentaron balances iónicos aceptables (Tabla 3 y 4). Otros sitios se tuvieron que medir y muestrear en los tanques de almacenamiento, estos fueron: Uxmal (18/12/93) y Dzitas (23/04/94); el balance iónico de la muestra de Dzitas excedió el límite aceptable (Tablas 3 y 4 respectivamente). En Abalá (23/06/93) el sitio era un cenote, por lo tanto se usó una cubeta para introducir los electrodos; su balance iónico fue aceptable (Tabla 3). En Yaxha (23/06/93) el sistema de bombeo era manual, se utilizó una cubeta para ir almacenando el agua que se extraía; este sitio presentó balance iónico aceptable (Tabla 3), pero la muestra se eliminó de la selección final por una causa que se explica posteriormente. La medida y el muestreo de Libre Unión (25/04/94), se hicieron en una fuga de la tubería; su balance iónico no fue aceptable (Tabla 5). Este tipo de muestreo no es confiable, porque bajo el sol tan intenso de Yucatán hay evaporación; además, se

pierde fácilmente el CO_2 , esto conlleva a que los índices de saturación de las fases de carbonatos probablemente no demuestren las condiciones originales del sistema.

Las muestras fueron filtradas, para evitar sólidos suspendidos (como por ejemplo, partículas de CaCO_3) que alteren las concentraciones originales de la muestra por disolución. Se utilizó un porta-filtro de polisulfona (PSF), que tiene un depósito superior y un recipiente. Se utilizó una membrana desechable (filtro) de nylon, con un tamaño de poro de $0.22 \mu\text{m}$ y un diámetro de 47 mm. La técnica utilizada en el filtrado, consiste en generar un vacío en el recipiente del portafiltro con una bomba Master Flex, modelo 7533-40. Las características de la bomba son: a) tiene una velocidad de flujo que varía de 340 a 1700 ml/min.; b) requiere de una fuente de poder de 10.8 a 13.2 voltios en corriente directa (3 A), esto facilita su operación, ya que puede conectarse fácilmente al encendedor de cigarrillos o a la batería del vehículo.

La preservación de la muestra desde su toma hasta el análisis químico es muy importante, para evitar alteraciones de la composición original; por ejemplo, con los cambios de temperatura se puede propiciar la precipitación de algunas especies. Las muestras fueron preservadas tomando las siguientes medidas: a) se acidificaron las botellas de cationes con ácido nítrico concentrado (grado reactivo), hasta alcanzar un pH menor de dos, con esto se mantienen los cationes en solución, evitando que se absorban a las paredes de las botellas o que se precipiten. Por el problema que implica transportar ácido en el avión, la mayoría de las muestras a excepción de las de diciembre, no se acidificaron en campo. Se acidificaron en la ciudad de México ó en los Estados Unidos, dejándolas por lo menos dos semanas antes de su análisis, para permitir la redisolución de cualquier partícula de carbonato que se hubiera precipitado; b) se mantuvieron las muestras a baja temperatura, tanto en campo (en una hielera) como durante su almacenamiento antes de los análisis; c) se determinó la alcalinidad lo más pronto posible, normalmente al final de la jornada del día. La alcalinidad fue determinada

por el método de Gran (Drever, 1988; Stumm and Morgan, 1981), utilizando un titulador digital (Hach kit) y con ácido sulfúrico (1.6 N). La ventaja de este método sobre el colorimétrico es que no requiere de experiencia ni tanta habilidad en el manejo del equipo, también es más preciso y exacto. El procedimiento para la determinación de la alcalinidad se describe e ilustra en el Apéndice 2.

5.3 Sitios y Campañas de muestreo

La Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua (CNA) permitió el acceso a los pozos de agua potable de los municipios de Yucatán. Se prefirió muestrear en estos pozos porque se podía contar con información de su construcción, profundidad, además de que su localización fue relativamente fácil. Otra ventaja fue que normalmente se encontraban funcionando cuando se llegaba al sitio, de esta manera se ahorró tiempo, porque el flujo era estable.

En cinco campañas de muestreo se cubrió un total de 54 sitios muestreados; de los cuales 45 pozos fueron de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY) y nueve sitios fueron pozos particulares y sistemas naturales. Las campañas de muestreo fueron en junio, septiembre y diciembre de 1993, abril y agosto de 1994. Algunos sitios se muestrearon dos o tres veces en distintas campañas para estudiar la evolución geoquímica temporal del acuífero. Los sitios repetidos en su muestreo fueron: Abalá (2), Celestún (3), Chocholá (3), Estero Celestún (2), Kochol (2), Kopoma (3), Maxcanú (2), Opichen (3), Sacalúm (2), San José Tipceh (2), Santo Domingo (2), Tecoh (2), Tekit (2), Telchaquillo (2), Ticul (2); el número entre paréntesis indica cuantas veces fue muestreado el sitio. Treinta y siete sitios fueron muestras únicas, 13 fueron repetidos dos veces y cuatro sitios se repitieron tres veces. Los pozos UNAM-2 y UNAM-5, se muestrearon por dos métodos: 1) se introdujo en el pozo una botella de acero inoxidable, diseñada para abrir a presión a una profundidad específica (350 m y 400 m, respectivamente), y 2) por bombeo. La muestra colectada por bombeo se tomó cuando

se estimó que el agua que fluía, correspondía a la profundidad alcanzada por el otro método. El motivo de muestrear por los dos métodos mencionados fue, comparar uno con otro. La finalidad del muestreo en estos pozos no fue para observar evolución temporal, sino la influencia salina en el acuífero. Se colectaron 75 muestras en las cinco campañas de muestreo.

5.4 Análisis y selección de muestras

Los análisis químicos se corrieron en el Departamento de Geología de la Universidad de Northern Illinois. La técnica empleada para la determinación de aniones fue cromatografía de iones, usando un supresor de iones Dionex y una celda de conductividad. Los aniones determinados en el laboratorio fueron cloruros y sulfatos. Para algunas muestras, los cromatogramas mostraban concentraciones considerables de nitratos, pero no se calcularon las concentraciones porque para los objetivos del estudio los nitratos sólo eran índice de materia orgánica. Además los análisis de nitratos deben ser corridos dentro de un periodo corto, lo cual no era posible para estas muestras. Para la determinación de los cationes, se utilizó un espectrómetro Beckman V DC plasma. Los cationes determinados fueron: calcio, magnesio, sodio, potasio y estroncio.

La selección de las muestras y el procedimiento para el análisis de éstas se hizo de la siguiente manera: de los 75 muestreos realizados, se hicieron análisis químicos de 73 muestras. Se excluyeron dos muestras de los análisis químicos; la del campo experimental en Uxmal (muestreada en diciembre de 1993) y la de Kopomá (tomada en agosto de 1994). La lectura de redox en el pozo de Kopomá nunca se estabilizó, debido a que se había implementado un sistema de cloración y estaba contaminando la muestra. Sin embargo se contaba con dos muestras anteriores de junio y septiembre de 1993.

El primer grupo de muestras se analizó en julio de 1993, en este primer grupo se analizaron 15 muestras correspondientes al mes de junio del mismo año (Tabla 3). El segundo grupo se analizó en febrero de 1994, los análisis correspondieron a los muestreos de septiembre y diciembre de 1993. Del muestreo de diciembre, se postergó el análisis de las muestras salinas de: Estero Celestún (19/12/93), Estero Celestún (20/12/93) y Mar Celestún (19/12/93). En este segundo grupo, se analizaron 23 muestras (Tabla 4). El análisis del tercer grupo se hizo en octubre-noviembre de 1994. Las muestras analizadas correspondían a los muestreos de abril y agosto del mismo año. También se analizaron las muestras salinas pendientes. En este último grupo se analizaron 35 muestras (Tabla 5). Los resultados de las Tablas 3, 4 y 5 se reportan en meq/l. En el Apéndice 3, se encuentran los resultados en ppm.

5.5 Control de calidad para los análisis químicos

Como control de calidad para los análisis químicos se calculó el porcentaje de error del balance de cargas en los análisis. En base a los resultados, se seleccionaron las muestras con las que se hizo la interpretación del estudio. La ecuación del error del balance de cargas (Freeze y Cherry, 1979), es la siguiente:

$$E = \frac{\sum m_c - \sum m_a}{\sum m_c + \sum m_a} \times 100 \quad (1)$$

Donde :

E = error del balance de carga expresado en porciento

m_c = miliequivalentes por litro de las especies catiónic

m_a = miliequivalentes por litro de las especies aniónica

De las 73 muestras analizadas, se eliminaron 24 que presentaban errores mayores al 5% permisible (Freeze y Cherry, 1979), Tablas 3, 4 y 5. Para las concentraciones del mar se tomaron los datos de Drever (1988). Fueron cincuenta muestras las que se utilizaron para el estudio (Tabla 6).

Hay tres factores que fueron relacionados con los altos porcentajes de error en el balance iónico: 1) la contribución de nitratos, los cuales no fueron determinados; 2) algunas muestras se congelaron durante su almacenamiento; 3) posiblemente el tiempo de almacenamiento fue otro factor. Las muestras de cationes congeladas durante su almacenamiento son: Chochola (09/10/93), Muna (12/18/93), Díaz Ordaz (12/20/93) (Tabla 4), Estero Celestún (12/20/93) (Tabla 5). La mayoría de muestras tomadas en abril y agosto de 1994 presentan porcentajes de error positivos, éstos se relacionan con la contribución de nitratos. Las muestras de abril fueron las que tuvieron mayor tiempo de almacenamiento antes de su análisis. En el caso de Celestún agua potable (08/22/94) (Tabla 5), la razón del balance iónico fuera de rango fue que no se analizaron cloruros ni sulfatos porque la muestra se tomó después del sistema de cloro (el redox nunca se estabilizó). Como ya se contaba con dos muestras anteriores, se prefirió no hacer el análisis de los aniones. En la muestra de Yaxha (06/23/93) (Tabla 3) no se pudo cuantificar el potasio, porque la concentración del estándar preparado era menor que la que contenía la muestra, y aunque presenta un balance "aceptable" se desechó de la selección final. Se infirió que la muestra había sido contaminada tal vez con sudor, porque fue tomada de manera indirecta.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Resultados

El pozo de Tzucacab, localizado aproximadamente a 147.5 km en línea recta al sureste del puerto de Chicxulub, presenta la concentración más alta de sulfatos (11.36 meq/l) de los pozos que se encuentran en el lente de agua dulce ó pozos no profundos (Tabla 6, Figura 3). Los pozos que se definen como profundos en este estudio son los de UNAM-2 y UNAM-5 (Figura 3). Estos fueron muestreados por dos métodos, a una profundidad aproximada de 350 y 400 m respectivamente. En la Gráfica 1, se encuentran marcados algunos sitios que tienen alto contenido de sulfatos, estos sitios están fuera de la línea esperada para la mezcla entre agua de mar y agua de lluvia. Las líneas de isorelación de SO_4/Cl (Figura 4) indican que existe al menos una fuente de sulfatos al sur del anillo de cenotes. Estos resultados sugieren que, en el sistema hidrogeológico de Yucatán, hay un proceso de disolución de minerales de fases diferentes a la de carbonatos. Se evaluaron índices de saturación por medio del programa SOLMIN (Kharaka y otros, 1988). El agua subterránea en la zona de estudio se encuentra sobresaturada con respecto a dolomita, aproximadamente saturada con respecto a calcita, y subsaturada con respecto a yeso, anhidrita, halita y celestita (Tabla 8).

Los pozos profundos tienen concentraciones mucho más altas que las del mar, tanto en sulfatos (69.19 y 86.91 meq/l respectivamente) como en los demás iones (Tabla 6); los factores de exceso de estos pozos con respecto al mar se presentan en la Tabla 10. Las concentraciones de estos pozos indican que a la profundidad que se muestreo, estaba ocurriendo lo siguiente: 1) ya se había cruzado la interfase del mar y el agua dulce. La evidencia de esto es que la relación sulfato/cloruro (113.0 y 152.6 respectivamente, Tabla 7) y también la relación Na/Cl (859 y 835 respectivamente, Tabla 7) son muy parecidas a la del mar (103.4 para SO_4/Cl y 857 para Na/Cl); y 2)

posiblemente se muestreo agua que está en contacto con evaporitas, ésto lo explica el exceso de los iones en estos pozos con respecto al mar.

6.2 Semicírculo de cenotes

Se utilizó la relación sulfato/cloruro como indicador de la dirección de flujo para entender la influencia del semicírculo de cenotes en la hidrogeología del acuífero de Yucatán. Siguiendo la relación ($SO_4/Cl \times 1000$) en la zona oeste del área de estudio, se observa que en la parte externa del anillo, en los sitios de Tzucacab, Peto, Maní, Mama, Opichen, Kopomá y otros, la relación varía entre 1096.4, para Tzucacab, y 460.1, para Kopomá que se encuentra casi sobre el anillo (Figurá 3 y Tabla 7). Al cruzar el anillo, todos los sitios muestreados presentan relaciones cada vez más similares a la del mar (103.4).

Los resultados de las mediciones de nivel freático realizados en dos transectos: 1) San Ignacio-Kopoma y 2) Dzilam de Bravo-Sotuta, se observan en la Figura 5 (Marín, 1990), en la Figura 2 se ubican los sitios en la zona de estudio. En el primer trasecto se aprecia un decremento en el nivel freático, que ocurre en la parte interna del semicírculo, a partir de Uman hasta el anillo de cenotes en Kopomá; esto indica que el flujo de agua subterránea va de norte a sur. En el segundo transecto, se observa la disminución constante del nivel freático, que se empezó a medir en Sotuta, alcanzando el menor valor en algún punto sobre el anillo de cenotes; en esta sección está implícito el flujo de agua subterránea de sur a norte. Las líneas de isorelación de SO_4/Cl (Figura 4), muestran un decremento de esta relación que va de sur a norte. Este decremento con dirección preferencial, se interpreta como migración de flujo. Otro resultado es el contenido de sulfato en los pozos profundos. El pozo localizado aproximadamente sobre el anillo (UNAM-2), tiene un 25% menos sulfato que el que se encuentra al sur (UNAM-5) (Figura 2, Tabla 6).

Los resultados anteriores conllevan a lo siguiente: 1) el decremento de la relación SO_4/Cl al cruzar el semicírculo, y la tendencia de flujo que se observa en las líneas de isorelación, apoyan la propuesta de Marín y otros, (1987), Marín (1990) y Perry y otros, (1995), de que el anillo es un conducto de alta permeabilidad que intercepta el agua que viene del sur y la transporta a través del semicírculo de cenotes al mar, desembocando en los puntos donde el anillo intercepta la línea de costa. La evidencia de la desembocadura del agua que viene del anillo, son los ojos de agua dulce que brotan en los Esteros de Bocas de Dzilam y Celestún (Baleocera) (Figura 2); 2) correlacionando los resultados de las mediciones de nivel freático (Figura 5) con la diferencia de sulfato que existe en los pozos profundos, tomando en cuenta la posición de éstos con respecto al anillo, se infiere que el agua que proviene del sur, es diluida por la que llega al conducto procedente de la parte interna (Figura 2).

Para este caso en particular (Yucatán) donde existe una fuente de estroncio y una fuente conocida para el cloruro (el mar), podría utilizarse la relación Sr/Cl como un trazador natural, que sugiera preferencia de flujo del agua subterránea. La fuente para estroncio se infirió a partir de la relación Sr/Cl , que presenta valores más altos que la relación en el mar, para todos los sitios muestreados (Tabla 7). En la Gráfica 7 se perciben al menos dos fuentes, para estroncio, al sur del anillo de cenotes. Los sitios con mayor relación Sr/Cl son Tekit (10.67) y Peto (16.53) (Tabla 7 y Tabla 6). Con los antecedentes de la dirección preferencial de flujo del agua subterránea (mediciones de nivel freático), y con la tendencia de decremento hacia el norte que se observa en la relación SO_4/Cl (Figura 4); se observa el mismo comportamiento del agua subterránea en las líneas de isorelación de Sr/Cl (Figura 7).

Con respecto a los valores altos para la relación Sr/Cl que se observan al este de la zona de estudio (en la parte interna del anillo), en los sitios de Temax y Buctzotz, se discuten posteriormente, porque se observa el mismo comportamiento para la relación

Na/Cl, y posiblemente esto este relacionado con alguna fuente de evaporitas en la parte este del área de estudio.

6.3 Parteaguas

El flujo de agua dulce que se observa tanto en Bocas de Dzilam (costa este) como en el Estero de Celestún (costa oeste), es evidencia de un parteaguas en algún punto sobre el anillo de cenotes (Perry y Velázquez, en preparación). Por medio de hidrogeoquímica se identificó el área donde existe el parteaguas. Las relaciones SO_4/Cl en la parte este de la zona de estudio, no muestran la misma característica que aquellos al oeste. La relación SO_4/Cl en los sitios al este, es más parecida a la del mar. Este patrón se observa tanto en los lugares que se encuentran dentro como en aquellos que están fuera del anillo de cenotes (Figura 3). Con la diferencia de resultados entre la zona este y oeste del área de estudio, con respecto a la relación sulfato/cloruro, y con la ayuda de las concentraciones de sulfato, se estima que el parteaguas del semicírculo de cenotes se encuentra al sur de Telchaquillo (Figura 3, Tabla 7). Este hecho evita que el agua procedente del suroeste, caracterizada por la alta concentración de sulfatos, sea transportada a través del anillo y descargada en la costa este. Esta hipótesis es apoyada por los resultados de un estudio de resistividad, que indican que al este de Abalá existe un sistema de fracturas que no están relacionadas con la zona al oeste (Steinich y Marín, en arbitraje).

Al sur de Telchaquillo, entre otros pozos, los de Tekit y Mama tienen relaciones (Sr/Cl) altas (10.67 y 10.13 respectivamente, Figura 7, Tabla 7). Hacia el este y oeste de estos sitios se aprecia un decremento en los valores de esta relación (Figura 7). Esta observación coincide con la hecha para la relación SO_4/Cl (Figura 3 y 4), con respecto al punto donde se encuentra el parteaguas del anillo de cenotes.

Al noroeste de Telchaquillo se encuentra Temax, que tiene un valor de 9.01 para la relación (Sr/Cl) (Figura 7, Tabla 7). Los valores altos al noroeste del área de estudio,

también se observan para las relaciones Na/Cl (Figura 6) y K/Cl (Figura 8). La explicación para esta concentración de líneas de isorelación, con valores altos al noreste de la zona de estudio, podría ser: una fuente de evaporitas ó bien algún proceso hidrogeoquímico, que de alguna manera concentra estos iones. Para la relación SO_4/Cl no se aprecia este fenómeno ocurrido al noreste (Figura 3 y 4), posiblemente para esta zona el sulfato esté afectado por reacciones de óxido-reducción.

6.4 Variaciones temporales del acuífero

Se analizó la relación SO_4/Cl , así como los índices de saturación con respecto a calcita, para los pozos que fueron repetidos en su muestreo, con el fin de observar la influencia de la recarga pluvial. Primero se consideraron los pozos que se muestrearon en temporada de lluvias. Los sitios que se muestrearon tanto al inicio de la temporada (en el mes de junio), como en los meses más lluviosos (agosto y septiembre), fueron: Tecoh, Abalá, Kopomá, Sacalúm y Opichen. Se observó que la relación SO_4/Cl decrece en los meses de agosto y septiembre con respecto a junio, la excepción en este comportamiento es Tecoh, (Figura 3, Tabla 7); también comparando los índices de saturación para calcita, se observa un cambio de sobresaturación en el mes de junio a subsaturación para el final de la época de lluvias. La excepción para este cambio fue Kopomá (Tabla 8). No hay una explicación inmediata a estas excepciones, ya que son excepciones para uno de los dos comportamientos. Para tener una certeza de la correlación de los resultados con las estaciones del año, se debe medir varias veces en los mismos periodos.

Los sitios repetidos en su muestreo entre la época de estiaje y lluvia, fueron: Opichen, Ticul, Celestún, Maxcanú y Kochol. La relación SO_4/Cl para estas muestras, presenta valores ligeramente más altos en diciembre con respecto a los de agosto y junio (Figura 3, Tabla 7). La excepción para este comportamiento es Maxcanú. Observando los índices de saturación para calcita, Opichen y Ticul presentan la misma tendencia,

sobresaturación en la época de estiaje o al principio de las lluvias y subsaturación para el mes más lluvioso (Tabla 8). Las otras tres muestras se encuentran casi saturadas en las dos temporadas.

El cambio en la relación SO_4/Cl y el cambio en el carácter disolvente del agua con respecto a calcita, entre el principio y final de la temporada de lluvias, así como entre la época de estiaje y lluvia, demuestran que: a) la infiltración de la recarga pluvial es rápida, esto conlleva a la dilución del agua subterránea, b) que el anillo tiene una alta permeabilidad. Esta característica del sistema hidrogeológico de la zona de estudio, también se comprueba con los resultados de las mediciones de niveles freáticos (Steinich y Marín, en arbitraje), y con el flujo de agua dulce, que mana en los Esteros de Bocas de Dzilam y Celestún (Perry y Velázquez, en preparación).

6.5 Intrusión salina

La intrusión salina había sido detectada por Socki y otros, (1984) a más de 40 Km de la costa en Yucatán. En este estudio se utilizaron las relaciones Na/Cl y SO_4/Cl para delimitar la intrusión salina en el área de estudio, porque estos iones se encuentran en mayor concentración en el mar y su relación es representativa de la intrusión salina. No obstante la presencia de evaporitas en la zona de estudio que dificulta delinear con precisión el frente de la intrusión marina, si se pudo detectar la intrusión a más de 100 km de la costa. En la Gráfica 1 (de SO_4 contra Cl) se aprecian tanto los sitios que están alineados con respecto al agua de mar diluida como aquellos influenciados por alguna otra fuente para estos iones. En la Gráfica 2 (de Na contra Cl), no todos los sitios se alinean con respecto a lo esperado en la mezcla de agua de mar y agua de lluvia, y en esta Gráfica es difícil distinguir los sitios influenciados por la intrusión salina de aquellos afectados por alguna otra fuente.

Las relaciones $Na/Cl \times 1000$ y $SO_4/Cl \times 1000$ (Tabla 7) para los sitios cercanos a la costa, como por ejemplo Sierra Papacal, Kinchil, Dzilam González y otros, muestran la

clara influencia de la intrusión, además existen sitios hacia el sur y sobre todo en la parte sureste, que también presentan relaciones parecidas a las del mar. Algunos de estos sitios son: Sotuta, Homún, Huhí, Tecoh, Telchaquillo (Figuras 3 y 6, Tabla 7). En otros puntos más lejanos, aproximadamente a 110 km de la costa, igualmente se observa la influencia de la intrusión salina, estos sitios son los pozos profundos de UNAM-2 y UNAM-5 que tienen relaciones SO_4/Cl (113.0 y 152.6 respectivamente, Figura 2, Tabla 7), muy parecidas a las del mar (103.4). La relación Na/Cl en los pozos profundos (859 y 835 respectivamente, Tabla 7), también es muy semejante a la del mar (857). En la Gráfica 3, se aprecia la correlación de estos pozos con respecto al mar para la relación Na/Cl . A pesar de que en los pozos profundos se nota la presencia de la intrusión salina a más de 100 km de la costa, en los pozos del lente de agua dulce no se puede delimitar con precisión el frente de ésta, porque en el sistema hidrogeológico de Yucatán hay iones disueltos que provienen de fuentes que fueron formadas en un ambiente marino. Sin embargo en la zona oeste del área de estudio, se distingue una línea de isorelación Na/Cl que va delimitando los sitios que tienen una relación semejante a la del mar (Figura 6, Tabla 7).

6.6 Interacción agua-roca

Hasta aquí, los resultados se han discutido principalmente en torno a la relación sulfato/cloruro, estroncio/cloruro, sodio/cloruro y a los índices de saturación con respecto a calcita. Los dos primeros parámetros se ocuparon como trazadores naturales para dilucidar el funcionamiento del semicírculo de cenotes, ubicado en el noroeste de la Península. Con ayuda de la relación SO_4/Cl y los índices de saturación con respecto a calcita, se evaluó de manera cualitativa la respuesta del acuífero a la recarga pluvial. Nuevamente la relación sulfato/cloruro y la relación Na/Cl , permitieron estimar el frente de la intrusión salina.

Existen otras relaciones entre iones, diferentes a las analizadas anteriormente, y también índices de saturación con respecto a minerales asociados con evaporitas, que revelan que el sistema hidrogeológico de Yucatán no sólo está controlado por la intrusión salina y la disolución de especies de carbonatos. Una de las cosas que llamó la atención de los resultados químicos de las muestras de los pozos profundos, UNAM-2 y UNAM-5, fue que tienen mucho más contenido de estroncio que en el mar (2.97 y 4.01 veces respectivamente, Tabla 10). Aunque para todos los iones estos pozos presentan excesos de concentración con respecto al mar, el número de veces que exceden la concentración del mar, es mayor para los iones de calcio y estroncio (Tabla 10). En la Gráfica 3, de Sr contra SO_4 para las muestras profundas, se aprecia el exceso para estos iones con respecto al mar y también la diferencia entre estos pozos. En la Gráfica 5, se aprecian también los excesos con respecto al mar y la diferencia de contenido entre los pozos profundos, ahora para Sr y Cl. La Gráfica 2, de Sr contra SO_4 para muestras con baja conductividad (pozos del lente de agua dulce), sugiere que el estroncio es incorporado al agua subterránea de Yucatán por alguna fuente adicional al mar, ya que en esta Gráfica, se observa que todos los sitios muestreados están fuera de la línea esperada para la mezcla entre agua de lluvia y agua de mar. En la Gráfica 4 (de Sr contra Cl para las muestras del lente de agua dulce) se observa nuevamente que las características geoquímicas del lente de agua dulce, se deben al menos a dos fuentes, una de ellas el mar y la otra posiblemente disolución de evaporitas. La relación $(\text{Sr}/\text{Cl} \times 1000)$ para las muestras en la zona de estudio, es mucho mayor que la relación en el mar; la diferencia va desde 2.5 hasta 50 veces (Tabla 7). Los índices de saturación para celestita señalan que existe un carácter disolvente, en toda la zona de estudio y para cualquier época del año (Tabla 8).

La influencia de evaporitas en el sistema hidrogeológico de Yucatán, también se percibe con otros iones. En la Gráfica 6 (de Na contra Cl, para muestras del lente de

agua dulce), se aprecia que algunas muestras están fuera de la línea esperada para la mezcla entre agua de lluvia y agua de mar. En la Gráfica 7 (de Na contra Cl, para las muestras de los pozos profundos), se distingue la concentración entre los pozos profundos y la diferencia de concentración entre éstos y el mar. La misma relación sulfato/cloruro (Tabla 7), así como las concentraciones de sulfato en los pozos del lente de agua dulce, principalmente aquellos al suroeste, sugieren la presencia de evaporitas al suroeste de Yucatán. En la Gráfica 1, se aprecian los sitios que denotan la influencia de esta evaporitas.

Una manera de evaluar cuanto difieren las concentraciones de las muestras del lente de agua dulce, con respecto a las concentraciones esperadas en la mezcla entre el agua de mar y agua subterránea saturada con CaCO_3 , es normalizar las concentraciones de cada ion para cada muestra. Se escogió una muestra arbitraria (Buctzotz) (Tabla 2 y 6), que presentaba dos características: 1) estaba entre aquellas que tienen la más baja cantidad de sólidos disueltos y 2) no mostraba evidencia de estar influenciada por alguna reacción especial. A partir del contenido de cloro (supuestamente conservativo), se evaluó una relación de mezcla (R):

$$R_{\text{muestra}} = \frac{(m_{\text{Cl}})_{\text{muestra}} - (m_{\text{Cl}})_{\text{Buctzotz}}}{(m_{\text{Cl}})_{\text{mar}} - (m_{\text{Cl}})_{\text{Buctzotz}}} \quad (2)$$

Donde:

m_{Cl} = concentración de cloruro en meq/l.

Este factor se aplicó a cada muestra del lente de agua dulce, para obtener el exceso de cada ion (Tabla 9), con respecto a la concentración esperada en la mezcla entre el agua del mar y agua subterránea saturada con CaCO_3 , por ejemplo, para SO_4 :

$$\{ \text{"Exceso"} \text{SO}_4 \}_{\text{muestra}} = (m_{\text{SO}_4})_{\text{muestra}} - [(m_{\text{SO}_4})_{\text{Buctzotz}} + R_{\text{muestra}} \cdot ((m_{\text{SO}_4})_{\text{mar}} - (m_{\text{SO}_4})_{\text{Buctzotz}})] \quad (3)$$

donde:

R_{muestra} = factor de relación de mezcla

m_{SO_4} = concentración de sulfato en meq/l.

La mayoría de las muestras tienen un exceso positivo, porque se escogió una de las muestras más diluidas para la normalización. Los excesos positivos indican que el agua subterránea tiene mayor cantidad disuelta de determinado ion, que aquella esperada de la mezcla de agua subterránea saturada con carbonato de calcio y agua de mar.

Para las muestras de los pozos profundos (UNAM-2 y UNAM-5), no se utilizaron las ecuaciones (2) y (3) para cuantificar sus excesos, porque estos pozos tienen mayor concentración de iones que el agua del mar, la comparación se hizo ion a ion. Se calculó el número de veces que exceden la concentración del mar. Con respecto a estroncio y calcio, tienen entre 2 y 4 veces mayor concentración que en el mar. Para sulfato, cloruro y sodio, el exceso varía entre un 2 y un 50 % (Tabla 10).

En la Gráfica 8, se observa una clara correlación para el "exceso" de calcio contra el "exceso" de sulfato. La correlación para los excesos de estos iones, sugiere la presencia de yeso y anhidrita en el sistema. Aunque para todos los sitios muestreados la relación Ca/SO_4 es mayor que la relación en el mar, hay sitios que tienen valores sobresalientes para esta relación, por ejemplo: Buctzotz, Dzilam González, Homún, Huhí, Kantunil, Kinchil, Temax, Tunkas y otros (Tabla 7, Figura 3). Estos lugares presentan valores parecidos a los del mar en la relación SO_4/Cl (Tabla 7, Gráfica 9); todos estos pozos tienen mayor concentración de calcio que de sulfato, sugiriendo que en esos sitios el agua está controlada por disolución de carbonatos. Las muestras que tienen concentraciones altas de sulfatos como por ejemplo: Tzucacab, Uxmal, Opichen, Kopomá, Peto, Sacalum, San José Tipceh, Santa Elena y otros (Tabla 6, Figura 3), tienen una relación Ca/SO_4 con valores alrededor de uno (Tabla 7, Gráfica 9), además estas muestras son las que no presentan influencia marina en sus relaciones SO_4/Cl (Tabla 7). Si en el sistema se tuviera solamente la disolución de yeso-anhidrita, la

relación sería exactamente de uno. En la Gráfica 10 (de "exceso" Ca/"exceso" SO_4 contra ("exceso" SO_4), se observa que para las muestras que presentan "exceso" de sulfato, la relación de ("exceso" Ca/"exceso" SO_4), mantiene un valor al rededor de 0.66, indicando probablemente la disolución de yeso y anhidrita. También en la Gráfica 8, las muestras que tienen un mayor "exceso" de sulfato están acompañadas con aquellas que tienen también un mayor "exceso" de calcio y "exceso" de magnesio. Posiblemente el agua de estos sitios indiquen el proceso de dedolomitización (Perry, comunicación oral).

Ocho sitios presentan una ligera deficiencia de sulfato ("excesos" negativos) (Tabla 9). La mayoría de estas muestras forman como un anillo aproximadamente sobrepuesto al semicírculo de cenotes (Figura 3). Estos puntos incluyen tres muestras (Dzilam González, Kantunil y Tunkas) que presentan relaciones SO_4/Cl más bajas que la relación en el mar (Tabla 7). Dichas deficiencias probablemente se pueden atribuir a la reducción de sulfato. La reducción de sulfato se ha identificado como un proceso importante en el noroeste de Yucatán (Socki y otros, 1984), pero solamente en cenotes abiertos que encuentran la intrusión salina a profundidad. Marcella y Stoessel (1994) consideran la reacciones redox de sulfato en cenotes que tienen importancia local en la diagénesis de carbonatos, en el este de la Península.

El potasio no está relacionado directamente con algún mineral que se encuentra en disolución, y la mayoría de sitios muestran una relación potasio/cloruro parecida a la relación en el mar (Tabla 7). Sin embargo en la Gráfica 11, se aprecian cuatro sitios (Peto, Abalá, Telchaquillo y Sotuta, Figura 8) que sobresalen de la correlación estandar K/Cl observada en los demás sitios. Posiblemente esta anomalía se deba a contaminación antropogénica. El uso de fertilizantes es inherente en una zona agrícola; en Yucatán hay una alta producción de naranja. En la Figura 8 se aprecian los anillos de isorelación K/Cl con valores altos, para los sitios mencionados arriba.

7. CONCLUSIONES

El semicírculo de cenotes es un conducto de alta permeabilidad, que capta agua subterránea procedente del sur y la transporta a lo largo de éste hacia la costa. Esta hipótesis se apoya con las siguientes evidencias: 1) el decremento que se percibe en la relación SO_4/Cl , conforme los sitios al oeste van acercándose al semicírculo; 2) la semejanza de la relación SO_4/Cl con la del agua de mar, en los sitios que se encuentran en la parte interna del anillo y 3) la presencia de agua dulce (ojos de agua) en bocas de Dzilam (costa este) y en el estero de Celestún (costa oeste).

Los resultados de los pozos profundos de UNAM-2 (350 m) y UNAM-5 (400 m), indican que el frente de la intrusión salina llega hasta aproximadamente 110 km de la costa norte. Esta información es apoyada por los resultados de sondeos eléctricos (Steinich y Marín, en prensa), y mediciones del espesor saturado de agua dulce (Marín, 1990).

El flujo de agua dulce que desemboca en las costas este y oeste es evidencia de un parteaguas en el anillo de cenotes, el cual se ubica aproximadamente al sur de Telchaquillo. Las evidencias para esta hipótesis son: 1) el cambio en los valores de la relación SO_4/Cl que venían observándose en la parte oeste del área de estudio, este cambio se presenta a partir de Telchaquillo hacia el este; 2) el decremento de la relación Sr/Cl hacia el este y oeste, a partir aproximadamente del norte de Tekit.

Los índices de saturación del agua subterránea con respecto a los minerales de celestita, anhidrita, yeso y halita, las relaciones de Sr/SO_4 , Sr/Cl , Na/Cl , exceso $Ca/exceso SO_4$ y la propia relación SO_4/Cl , indican que los procesos geoquímicos que controlan el sistema hidrogeológico de la zona de estudio son: 1) la intrusión salina, 2) la disolución de especies de carbonato, y 3) la disolución de otras fases químicas como yeso, celestita, anhidrita y halita. Con estos resultados se sabe que el sulfato, estroncio, sodio y cloruro se incorporan al sistema por disolución de evaporitas, además ser el mar la otra fuente.

La relación K/Cl en algunos lugares, como Peto, Abalá, Telchaquillo, Sotuta (localizados al noroeste), es mucho más alta que en el mar. Posiblemente esto refleje contaminación antropogénica, tal vez fertilizantes utilizados en las naranjeras.

Recomendaciones

Tomar varias muestras del agua de lluvia en la zona de estudio, para tener una referencia de su concentración; y así establecer con mayor precisión la línea de mezcla

entre agua del mar y agua de lluvia. También para evidenciar que la influencia del agua de lluvia en el agua subterránea, con respecto a los iones de cloruro, sulfato y sodio, no es tal que impida utilizar estos iones como índices de la intrusión salina.

Se recomienda no dejar las muestras almacenadas por periodos largos (más de tres meses) sin analizar. Tampoco deben congelarse las muestras antes del análisis químico. Es importante determinar nitratos en las muestras. Estos factores influyeron para que los balances iónicos, resultaran fuera del rango aceptable (5%).

Con respecto a las variaciones observadas en la relación SO_4/Cl y en los índices de saturación para calcita, atribuidas al cambio de estación, se recomienda realizar dos o tres campañas de muestreo que puedan confirmar esta hipótesis.

LITERATURA CITADA

- Alvarez, L. W., W. Alvarez, F. Asaro, and H. V. Michel, 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction, *Science*, v. 208, p. 1095-1108.
- Alvarez, W., Smit, J., Lowrie W., Asaro F., Margolis S. V., Claeys P., Kastner M., and Hildebrand A. R., 1992, Proximal impact deposits at the Cretaceous-Tertiary boundary in the Gulf of Mexico: A restudy of DSDP leg 77 Sites 536 y 540. *Geology*, v. 20, p. 697-700.
- Anónimos, 3a impresión, 1992, Carta topográfica, Calkini, F15-9-12: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, escala 1:250,000.
- Anónimos, 2a impresión, 1987, Carta topográfica, Mérida, F16-10: México, D. F., Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, escala 1:250,000.
- Anónimos, 2a impresión, 1987, Carta topográfica, Tizimin, F16-7: México, D. F., Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, escala 1:250,000.
- Back, W., and Hanshaw, B., 1970, Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan: *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 330-368.
- Camargo-Zanoguera, A., y Suárez, G., 1994, Evidencia sísmica del cráter de impacto de Chicxulub: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración* (en prensa).
- Donnelly, Thomas W., Gregory S. H., Richard C. F., López R. E., 1990, Northern Central America; The Maya and Chortis Blocks. *The Geology of North America*, Vol. H, Caribbean Region, The Geological Society of America, p. 37-55.
- Drever, J. I., 1988, *The Geochemistry of Natural Waters*. 2da Ed. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., U. S. A., 437 p.
- Fairbanks, R. G., 1989, A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation: *Nature*, v. 342, p. 637-642.
- Freeze R. A., y Cherry J. A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U. S. A., 604 p.

- Hildebrand, A. R., Penfield G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Camargo, A., Jacobsen, S. B., and Boynton W. V., 1991, Chicxulub crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, México: *Geology*, v. 19, p. 867-871.
- López Ramos E., 1979, *Geología de México*, tomo III. Ed. Edición Escolar, México, p. 263 a 295.
- López Ramos E., 1973, *Estudio Geológico de la Península de Yucatán: Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros Boletín*, v. 25, p. 23-26.
- López Ramos, E., 1975, Geological summary of the Yucatán Peninsula, in Nairn, A. E. M., and Stehli, F. G. eds, *The ocean basins and margins: The Gulf of Mexico and the Caribbean*: New York, Plenum Press, p. 257-282.
- Marcella, L. M. and R. K. Stoessell, 1994, Potential dolomitization in Yucatan sinkholes with seawater salinity fluids affected by sulfur-redox reactions. Abstr. in GSA 1994 Annual Meeting, abstracts with programs p. A-36.
- Marín, L. E., 1990, *Field investigations and numerical simulation of the karstic aquifer of northwest Yucatán, México (tesis doctoral): Northern Illinois University, De Kalb, IL., 183 p.*
- Marín, L. E., Perry, E. C., Booth, C., and Villasuso, M., 1987, *Hydrogeology of the northwestern Peninsula of Yucatán, México: EOS (transactions, American Geophysical Union)*, v. 69, p. 1292.
- Marín, L.E., Perry, E. C., Pope, K. O., Duller, C. E., Booth, C. J., and Villasuso, M., 1990, Hurricane Gilbert: Its effects on the aquifer in northern Yucatán, México, in Simpson, E. S., and Sharp, J. M., Jr., eds., *Selected papers on hydrogeology from the 28th International Geological Congress, Washington, D. C.: Hannover, Verlag Heinz Heise*, p. 111-128.
- Morán, Z. Dante J., 1984, *Geología de la Republica Mexicana: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México*, p. 77-85.
- Penfield, G., y Camargo, A., 1981, Definition of a mafic igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetic and gravity (abs.): *Society of Economic Geologists 51st Annual Meeting, Abstracts and Biographies*, p. 37.

- Perry, E. C., 1990, Aspects of the hydrogeology of the northwest region, Yucatán Peninsula, México, in Hari Krishna, J., et al., eds., *Tropical hydrology and Caribbean water resources*: Bethesda, Maryland, American Water Resources Association, p. 357-365.
- Perry, E. C., Winter, D. J., Sagar, B., and Wu, B., 1992, The Chicxulub structure: Surface manifestation and possible isotope signature: Lunar and Planetary Science Conference, 23rd, Abstracts, p. 1057-1058.
- Perry E., and Velázquez, G., 1993, Determination of flow direction in the Ring of Cenotes in the Yucatán State, México (abs.): *Geos (Unión Geofísica Mexicana)*, v. 13, no. 5, p. 59.
- Perry, E., Swift, J., Gamboa, J., Reeve, A., Sanborn, R., Marín, L., and Villasuso, M., 1989, Geologic and environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatan, México: *Geology*, v. 17, p. 818-821.
- Perry, E., Marín L., McClain, J., Velázquez G., 1995, Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: Its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater: *Geology*, v. 23, no. 1, p. 17-20.
- Pope, K., y Duller, C., 1989, Satellite observations of ancient and modern water resources in the Yucatan Peninsula, in Alvarez, R., ed., *Memoria, Simposio Latino Americano sobre sensores remotos*: Sociedad de Especialistas Latin Americano en Percepción Remota y Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México, p. 91-98.
- Pope, K. O., Ocampo, A. C., y Duller, C. E., 1991, Mexican site for K/T impact crater?: *Nature*, v. 351, p. 105.
- Pope, K. O., Ocampo, A. C., y Duller, C. E., 1993, Surficial geology of the Chicxulub Impact crater, Yucatan, Mexico, *Earth, Moon and Planets*, v. 63, p. 93-104.
- Schlager W., and Buttler R., 1984, Deep Sea Drilling Project, leg 77, southeastern Gulf of Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v 95, p 226-236.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1988, *Sinopsis Geohidrológica del Estado de Yucatán*, México, D. F., 48 p.
- Sharpton, V. L., Burke K., Camargo-Zanoguera, A., Hall, S. A., Lee, D. S., Marín, L. E., Suárez-Reynoso, G., Quezada-Muñeton, J. M., Spudis, P. D., Urrutia-

- Fucugauchi, J., 1993, Chicxulub Multiring Impact Basin: Size and Other Characteristics Derived from Gravity Analysis: *Science*, v. 261, p. 1564-1567.
- Sharpton, V. L., G. B. Dalrymple, L. E. Marín, G. Ryder, B. J. Schuraytz, J. Urrutia-Fucugauchi, 1992, New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary, *Nature* 359, 819-821.
- Socket, R., Gaona-Vizcayno, S., Perry, E., and Villasuso-Pino, M., 1984, A Chemical drill: Sulfur isotope evidence for the mechanism of formation of deep sinkholes in tropical karst, Yucatan, Mexico: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 16, no. 6, p. 662.
- Steinich, B., and Marín L. E., Determination of flow characteristics in the Aquifer of the Northwestern Peninsula of Yucatan, Mexico, en arbitraje: *Journal of Hydrology*.
- Steinich, B., and Marín L. E., 1995, Hydrogeological investigations in northwestern Yucatan, Mexico, using resistivity surveys, en prensa: *Groundwater*.
- Stumm W. and Morgan J. J., 1981, *Aquatic Chemistry: An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters*, 2nd Ed., Wiley Interscience, New York, U. S. A. 780 p.
- Swisher, C. C., et al., 1992, *Science* 257, 954
- Weidie, A. E., 1985, Part 1-Geology of the Yucatán Platform, in Ward, W. C., et al., eds., *Geology and Hydrogeology of the Yucatán and Quaternary Geology of Northeastern Yucatán Peninsula: New Orleans, Louisiana, New Orleans Geological Society*, p. 1-12.

TABLA 1
Lista de accesorios para campo

- libreta de campo
- lista y mapas de ubicación de los pozos a muestrear
- Cartas de la dependencia con quien se trabaja, para tener acceso a los pozos.
- GPS, equipado con:
 - aditamentos para cargar la batería
 - manual de operación.
- Titulador digital Hach equipado con:
 - tubos de ácido sulfídrico 1.6 N
 - matraz aforado de 50 ml
 - vaso de precipitado de 250 ml
 - puntas
 - contador
 - manual de operación.
- pH-metro, equipado con:
 - electrodos
 - soluciones almacenadoras
 - manual de operación
- botellas, lavadas con solución al 10 % de HNO₃
- Agua destilada
- Ac. nítrico puro (para acidificar las muestras)
- micropipetas.
- guantes
- Bomba para filtrar, con adaptaciones para conectar al cenicero o a la batería del carro.
- porta filtro (s) (en línea y de depósito)
- mangueras para el filtro en línea
- filtros
 - diametro: 47 mm
 - tamaño del poro: 0.22 µm
 - marca:
 - 1) millipore
 - no. de catálogo: GSWP 047 00
 - 2) MSI (Micron separations inc.)
 - no. de catálogo: A04SP04700
- filtros
 - MSI (micron separations inc.)
 - CAMEO IIS
 - 0.22 µm filter unit
- jeringa 20 ml (plastico)
- agujas
- vacutaines: tapón rojo (sin aditivos)
- Data sonde, equipado con:
 - interfase
 - cable
 - rejilla protectora
 - manguera
 - manual de operación
- sonda eléctrica para nivel.
- Buffers de pH 4 y pH 7
- Quinidrona para calibrar Redox
- papel tornasol para pH (rango de 2 a 7)
- masking tape
- marcadores permanentes
- llave stillison.
- lampara
- cinta métrica
- bailers

TABLA 1 (continuación)
Lista de accesorios para campo

- **cordel**
- **navaja**
- **equipo para medir conductividad (si no se cuenta con el datasonde)**
- **barómetro**

Tabla 2
Parámetros de campo

Nombre	Fecha de muestreo	Temperatura (°C)	Conductividad (mS/cm)	pH	REDOX (mV)	Profundidad total (ms)	Observaciones
1 Abala *	06/23/93	27.74	1.49	7.11	319	13.15	**
2 Abala *	08/25/94	27.45	1.9	6.76	449		
3 Bucizotz	04/24/94	27.03	1.07	6.85	320	21.40	
4 Campo experimental	12/18/93	27.77	3.39	6.46	483	0.00	
5 Celestún	12/19/93	26.45	3.26	6.65	406	0.00	
6 Celestún	04/26/94	26.37	3.12	6.75	498	0.00	
7 Celestún	08/22/94	27.28	3.31	6.77	944		x
8 Cenotillo	04/23/94	26.44	1.51	6.73	357	20.80	
9 Chochola	06/23/93	28.00	2.12	6.93	341	40.00	
10 Chochola	09/10/93	27.56	2.13	6.90	304	0.00	
11 Chochola	08/22/94	28.05	2.19	6.84	507		
12 Diaz Ordaz	12/20/93	28.10	1.97	6.82	326	0.00	
13 Dzilam González.	04/24/94	27.27	1.25	6.80	311	0.00	
14 Dzilas	04/23/94	29.30	1.22	7.12	390	60.00	**
15 Dzitzantun	04/24/94	27.00	1.05	6.83	320	4.47	
16 Estero Celestún *	12/19/93	24.04	20.00	7.81	459	0.00	
17 Estero Celestún *	12/20/93	24.20	19.00	7.87	327	0.00	
18 Holca	04/25/94	27.55	1.28	6.81	308	55.00	
19 Homun	06/22/93	28.85	1.10	7.56	397	0.00	**
20 Huhi	06/22/93	27.31	1.33	7.07	404	60.00	
21 Izamal	04/23/94	27.37	0.92	6.95	433	36.00	
22 Kantunil	04/25/94	27.46	1.32	6.62	392	40.00	
23 Kinchil	12/20/93	27.17	1.76	6.87	333	0.00	
24 Kochol	12/19/93	27.90	2.46	6.81	590	30.00	
25 Kochol	08/22/94	28.23	2.41	6.83	435		
26 Kopoma	06/23/93	27.73	2.98	6.77	358	53.00	
27 Kopoma	09/10/93	27.66	3.10	6.88	331	0.00	
28 Kopoma	08/22/94	31.9	1.026	7.38	785		x
29 Libre Unión	04/25/94	26.13	0.96	7.17	322	18.60	**
30 Mama	06/22/93	26.98	1.53	7.05	412	0.00	**
31 Mani	06/24/93	27.38	1.67	7.01	448	42.00	
32 Mar Celestún *	12/19/93	23.86	55.50	8.04	382	0.00	
33 Maxcanu	12/17/93	27.96	1.38	6.59	415	40.00	
34 Maxcanu	08/25/94	28.6	1.63	6.81	395		x
35 Merida I pozo 2	08/24/94	27.38	1.325	6.67	416		x
36 Muna	12/18/93	29.30	2.42	6.91	459	40.00	
37 Opichen	06/24/93	27.96	2.73	6.92	402	0.00	
38 Opichen	12/18/93	27.81	2.38	6.85	453	0.00	
39 Opichen	08/25/94	28.49	2.82	6.71	392		x
40 Oxtutzcab	09/10/93	28.19	1.56	6.99	405	40.00	
41 Peto	09/10/93	27.55	2.13	6.83	364	55.00	
42 Piste	04/25/94	26.73	1.03	6.92	330	48.00	
43 Pozo Celestún (de observación) *	12/20/93	27.68	1.20	6.89	78	0.00	
44 Quintana Roo	04/23/94	26.87	1.38	6.81	359	0.00	
45 Sacalum	06/23/93	27.60	2.43	6.95	363	24.00	
46 Sacalum	08/25/94	27.64	2.51	6.79	400		x
47 San Antonio Tedzidz	12/22/93	27.63	2.35	6.53	393	0.00	
48 San José Tipceh	12/18/93	27.28	2.95	7.08	441	0.00	**
49 San José Tipceh	08/25/94	28.9	2.79	6.71	419		x
50 Santa Clara	04/24/94	27.67	2.10	7.04	174	0.00	
51 Santa Elena	12/18/93	28.05	2.16	6.85	416	59.37	
52 Santo Domingo	12/19/93	27.80	0.89	6.80	472	19.00	
53 Santo Domingo	08/22/94	28.05	0.916	7.03	478		
54 Sayil	12/18/93	28.01	1.09	6.57	453	0.00	

Tabla 2 (continuación)
Parámetros de campo

Nombre	Fecha de muestreo	Temperatura (°C)	Conductividad (mS/cm)	pH	REDOX (mV)	Profundidad total (mts)	Observaciones
55 Sierra Papacal	08/24/94	28.21	2.06	6.85	360		x
56 Sotuta	06/22/93	27.28	1.15	7.18	413	0.00	
57 Tecoh	06/22/93	27.92	1.26	7.11	400	45.00	
58 Tecoh	08/23/94	28.13	1.3	6.75	395		
59 Tekax	09/10/93	28.58	1.66	6.92	386	60.00	
60 Tekit	06/22/93	27.80	1.17	7.08	415	30.00	
61 Tekit	09/09/93	27.65	0.51	6.97	437	0.00	
62 Telchaquillo	06/24/93	27.44	1.05	7.01	456	0.00	
63 Telchaquillo	09/09/93	27.65	1.67	6.81	398	0.00	
64 Temax	04/24/94	27.73	0.79	6.85	298	35.00	
65 Ticul	06/24/93	28.61	1.74	7.01	452	50.00	
66 Ticul	12/17/93	28.45	1.67	6.76	430	50.00	
67 Tunkas	04/23/94	26.73	1.32	6.78	354	0.00	
68 Tzucacab	09/09/93	27.75	2.63	6.74	357	0.00	
69 UNAM-2 350 m *	08/23/94						
70 UNAM-2 bombeo *	08/18/94	28.6	61.9	6.52	220		
71 UNAM-5 400 m *	08/19/94						
72 UNAM-5 bombeo *	08/19/94	31.47	56.9	6.54	220		
73 Uxmal *	12/18/93	28.96	2.59	6.76	418	0.00	**
74 Xochtel	04/22/94	27.17	1.41	6.77	330	0.00	
75 Yaxha *	06/23/93	27.79	1.74	7.07	242	0.00	**

x En estas muestras el redox no se estabilizó, iba incrementándose, a causa de que se habían implementado sistemas de cloración.

** Muestras que se midieron de manera indirecta

* Pozos particulares o sistemas naturales

Nombre	Fecha de muestreo	pH	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Sr (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	Alcalinidad como (HCO ₃)			Balance iónico % de error
										(meq/l)	suma cationes	suma aniones	
1 Abala	06/23/93	7.11	5.81	3.71	0.029	0.43	4.67	5.11	2.55	6.31	14.65	13.98	2.34
2 Chochola	06/23/93	6.93	6.56	5.03	0.036	0.19	9.63	9.62	2.58	6.93	21.45	19.13	5.72 *
3 Homun	06/22/93	7.56	5.46	3.42	0.013	0.07	2.57	3.11	0.35	7.44	11.54	10.89	2.88
4 Huhi	06/22/93	7.07	5.28	3.73	0.018	0.07	2.99	3.36	0.38	7.36	12.09	11.10	4.25
5 Kopoma	06/23/93	6.77	7.75	6.09	0.052	0.36	14.37	14.60	6.72	6.42	28.63	27.74	1.57
6 Mama	06/22/93	7.05	6.90	3.89	0.053	0.12	4.85	5.23	3.20	6.54	15.80	14.97	2.71
7 Mani	06/24/93	7.01	6.66	4.27	0.047	0.14	5.64	5.76	4.82	6.60	16.75	17.18	-1.24
8 Opichen	06/24/93	6.92	8.03	5.91	0.060	0.28	12.08	12.08	7.85	6.51	26.36	26.44	-0.16
9 Sacalum	06/23/93	6.95	7.15	5.28	0.047	0.20	11.04	10.95	6.06	6.36	23.73	23.37	0.76
10 Sotuta	06/22/93	7.18	5.77	2.75	0.015	0.32	3.04	3.52	0.52	6.82	11.90	10.85	4.58
11 Tecoh	06/22/93	7.11	5.13	3.48	0.014	0.09	3.91	4.63	0.48	7.10	12.63	12.21	1.69
12 Tekit	06/22/93	7.08	5.55	3.24	0.039	0.08	3.20	3.64	0.83	6.31	12.10	10.78	5.76 *
13 Telchaquillo	06/24/93	7.01	4.60	3.25	0.009	0.33	2.90	3.42	0.55	6.95	11.10	10.92	0.80
14 Ticul	06/24/93	7.01	5.41	3.92	0.034	0.13	7.32	7.05	3.62	5.97	16.81	16.64	0.53
15 Yaxha	06/23/93	7.07	5.68	3.74	0.026	0.00	4.84	4.91	2.71	7.62	14.28	15.24	-3.24 *

* muestras con error en el balance de cargas > 5%

Tabla 3
Resultados químicos en (meq/l), de las muestras tomadas en Junio de 1993

Nombre	Fecha de muestreo	pH	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Sr (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	Alcalinidad	suma cationes	suma aniones	Balance iónico % de error
										como (HCO3) (meq/l)			
1 Celestún	12/19/93	6.65	9.03	6.34	0.060	0.31	15.55	18.65	6.41	6.41	31.29	31.47	-0.30
2 Chochola	09/10/93	6.90	0.99	0.77	0.005	0.02	1.29	10.84	3.22	6.95	3.08	21.01	-74.46 *
3 Diaz Ordaz	12/20/93	6.82	5.80	3.42	0.023	0.14	7.72	3.01	2.17	6.29	17.10	11.47	19.70 *
4 Kinchil	12/20/93	6.87	6.14	3.36	0.019	0.15	6.87	9.42	1.30	6.49	16.54	17.22	-1.99
5 Kochol	12/19/93	6.81	7.32	4.40	0.046	0.23	11.15	11.95	5.26	6.13	23.15	23.34	-0.41
6 Kopoma	09/10/93	6.88	8.42	6.46	0.059	0.34	15.45	17.25	7.31	6.29	30.73	30.85	-0.21
7 Maxcanu	12/17/93	6.59	5.16	3.07	0.021	0.11	4.44	4.46	1.98	7.31	12.79	13.75	-3.59
8 Muna	12/18/93	6.91	6.76	1.76	0.042	0.06	3.35	10.57	6.88	6.41	11.97	23.85	-33.17 *
9 Opichen	12/18/93	6.85	9.20	5.35	0.058	0.22	9.15	10.19	6.16	6.93	23.98	23.28	1.48
10 Oxkutzcab	09/10/93	6.99	4.61	2.89	0.022	0.11	6.70	5.30	2.45	6.10	14.34	13.84	1.77
11 Peto	09/10/93	6.83	6.31	4.30	0.122	0.62	8.87	7.37	5.02	7.13	20.23	19.52	1.78
12 Pozo Celestún (de observación)	12/20/93	6.89	4.36	1.97	0.027	0.13	4.37	5.53	1.72	4.72	10.85	11.97	-4.90
13 San Antonio Tedzidz	12/22/93	6.53	6.46	5.01	0.032	0.23	10.85	12.44	3.08	6.90	22.57	22.42	0.33
14 San José Tipceh	12/18/93	7.08	9.28	6.18	0.063	0.23	12.56	14.56	8.30	6.11	28.31	28.98	-1.16
15 Santa Elena	12/18/93	6.85	8.28	5.15	0.068	0.18	7.75	8.68	7.99	6.43	21.43	23.10	-3.76
16 Santo Domingo	12/19/93	6.80	4.70	1.36	0.015	0.12	2.27	2.45	1.09	4.80	8.47	8.34	0.74
17 Sayil	12/18/93	6.57	5.97	2.83	0.010	0.14	2.04	2.17	0.59	8.03	11.00	10.79	0.97
18 Tekax	09/10/93	6.92	5.08	3.28	0.022	0.14	6.82	6.99	2.45	6.36	15.34	15.80	-1.46
19 Tekit	09/09/93	6.97	4.95	3.03	0.038	0.06	3.14	3.57	0.90	6.49	11.22	10.97	1.14
20 Telchaquillo	09/09/93	6.81	5.09	3.41	0.009	0.32	2.90	3.16	0.54	6.52	11.73	10.22	6.85 *
21 Ticul	12/17/93	6.76	6.71	3.28	0.035	0.08	5.42	6.99	3.91	5.52	15.53	16.43	-2.82
22 Tzucacab	09/09/93	6.74	11.27	5.75	0.088	0.23	9.91	10.37	11.36	5.54	27.25	27.27	-0.04
23 Uxmal	12/18/93	6.76	9.05	5.78	0.074	0.24	10.77	10.12	9.10	7.39	25.91	26.61	-1.33

* muestras con error en el balance de cargas > 5%

Tabla 4
Resultados químicos en (meq/l), de las muestras tomadas en septiembre-diciembre de 1993

Nombre	Fecha de muestreo	pH	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Sr (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	Alcalinidad	suma cationes	suma aniones	Balance ionico % de error
										como (HCO3) (meq/l)			
1 Abalá	08/25/94	6.76	6.94	4.65	0.049	0.12	6.65	7.62	3.75	7.16	18.41	18.53	-0.32
2 Bucizotz	04/24/94	6.85	3.90	2.87	0.010	0.14	2.82	2.31	0.39	6.56	9.74	9.25	2.58
3 Celestún	04/26/94	6.75	9.00	7.03	0.060	0.36	15.92	17.44	6.24	6.56	32.38	30.23	3.43
4 Celestún	08/22/94	6.77	9.00	6.86	0.059	0.35	16.34	0.00	0.00	6.62	32.61	6.62	66.24 *
5 Cenotillo	04/23/94	6.73	6.51	2.68	0.019	0.15	5.77	5.27	0.53	5.74	15.12	11.54	13.43 *
6 Chochola	08/22/94	6.84	7.27	5.06	0.038	0.17	9.17	10.91	2.76	6.83	21.71	20.50	2.85
7 Dziliam González	04/24/94	6.80	5.89	2.11	0.018	0.09	4.62	5.19	0.44	6.23	12.73	11.85	3.57
8 Dzitas	04/23/94	7.12	5.28	1.70	0.013	0.98	3.21	2.71	0.87	4.47	11.19	8.06	16.27 *
9 Dzitzantun	04/24/94	6.83	5.78	1.77	0.020	0.06	3.44	3.37	0.28	5.70	11.07	9.35	8.41 *
10 Estero Celestún	12/19/93	7.81	11.40	32.44		2.79	137.65	138.20	15.69	6.00	184.28	159.90	7.08 *
11 Estero Celestún	12/20/93	7.87	10.54	34.41		3.22	154.02	150.09	16.74	5.79	202.20	172.61	7.89 *
12 Holca	04/25/94	6.81	6.06	3.40	0.021	0.10	4.31	5.02	0.37	6.59	13.88	11.98	7.33 *
13 Izamal	04/23/94	6.95	5.17	2.29	0.013	0.06	2.31	2.00	0.24	6.00	9.84	8.24	8.84 *
14 Kantunil	04/25/94	6.62	4.72	3.63	0.018	0.11	4.11	4.63	0.46	7.87	12.59	12.95	-1.40
15 Kochol	08/22/94	6.83	7.76	4.58	0.049	0.25	11.30	11.66	4.93	6.10	23.94	22.68	2.70
16 Libre Unión	04/25/94	7.17	7.08	1.38	0.013	0.14	2.54	2.26	0.29	6.18	11.15	8.72	12.21 *
17 Mar Celestún	12/19/93	8.04	22.76	114.39		11.35	518.51	546.60	52.89	2.70	667.00	602.20	5.11 *
18 Maxcanú	08/25/94	6.81	5.76	3.58	0.025	0.14	5.87	5.70	2.46	7.23	15.37	15.38	-0.03
19 Merida 1, pozo 2	08/24/94	6.67	5.67	2.87	0.017	0.10	4.71	4.91	0.54	6.60	13.37	12.05	5.16 *
20 Opichen	08/25/94	6.71	7.82	6.32	0.063	0.29	13.05	13.11	7.74	6.47	27.54	27.32	0.40
21 Piste	04/25/94	6.92	5.49	1.51	0.016	0.23	3.19	3.13	0.40	5.20	10.44	8.72	8.96 *
22 Quintana Roo	04/23/94	6.81	6.37	2.63	0.021	0.10	4.92	5.70	0.52	6.42	14.04	12.64	5.23 *
23 Sacalum	08/25/94	6.79	8.23	5.40	0.054	0.19	10.10	11.80	5.85	6.54	23.96	24.19	-0.48
24 San José Tipceh	08/25/94	6.71	8.68	6.22	0.058	0.24	12.64	8.83	7.60	6.28	27.84	22.71	10.15 *
25 Santa Clara	04/24/94	7.04	7.89	3.13	0.039	0.26	10.80	11.48	1.23	7.10	22.11	19.80	5.50 *
26 Santo Domingo	08/22/94	7.03	4.74	1.37	0.017	0.14	2.46	1.79	0.94	4.03	8.73	6.76	12.72 *
27 Sierra Papacal	08/24/94	6.85	5.31	3.36	0.022	0.20	9.44	10.98	1.25	6.59	18.33	18.82	-1.32
28 Tecoh	08/23/94	6.75	4.37	3.31	0.014	0.09	4.01	4.46	0.47	7.06	11.79	11.99	-0.87
29 Temax	04/24/94	6.85	4.41	1.58	0.011	0.02	1.61	1.24	0.17	5.67	7.63	7.08	3.70
30 Tunkas	04/23/94	6.78	6.34	2.67	0.022	0.10	4.56	5.25	0.43	7.00	13.69	12.67	3.85
31 UNAM-2 350 m	02/23/94		48.62	107.70	0.543	10.93	559.32	606.73	69.05	4.36	727.11	680.14	3.34
32 UNAM-2 bombeo	08/18/94	6.52	46.80	97.17	0.515	10.00	526.29	612.46	69.19	4.62	680.78	686.27	-0.40
33 UNAM-5 400 m	08/19/94		86.27	101.64	0.732	7.97	473.36	577.49	86.30	2.90	669.97	666.70	0.25
34 UNAM-5 bombeo	08/19/94	6.54	75.63	98.17	0.678	8.00	475.54	569.47	86.91	3.11	658.01	659.50	-0.11
35 Xocchel	04/22/94	6.77	6.78	3.19	0.019	0.08	4.97	5.58	0.54	7.36	15.04	13.48	5.44 *

* muestras con error en el balance de cargas > 5%

Tabla 5
Resultados químicos en (meq/l), de los muestreos de abril y agosto de 1994, y mtras. salinas de diciembre de 1993

Tabla 6
Resultados químicos en meq/l, de las muestras que tuvieron un balance iónico con un porcentaje de error menor al 5 %

Nombre	Fecha de muestreo	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Sr (meq/l)	K (meq/l)	Na (meq/l)	Cl (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	Alcalinidad como (HCO ₃) (meq/l)
1 Abalá	06/23/93	5.81	3.71	0.029	0.43	4.67	5.11	2.55	6.31
2 Abalá	08/25/94	6.94	4.85	0.049	0.12	6.65	7.62	3.75	7.16
3 Buctzotz	04/24/94	3.90	2.87	0.010	0.14	2.82	2.31	0.39	6.56
4 Celestún	12/19/93	9.03	6.34	0.060	0.31	15.55	18.65	6.41	6.41
5 Celestún	04/26/94	9.00	7.03	0.060	0.36	15.92	17.44	6.24	6.56
6 Chochola	08/22/94	7.27	5.06	0.038	0.17	9.17	10.91	2.76	6.83
7 Dzilam González	04/24/94	5.89	2.11	0.018	0.09	4.82	5.19	0.44	6.23
8 Homun	06/22/93	5.46	3.42	0.013	0.07	2.57	3.11	0.35	7.44
9 Huhi	06/22/93	5.28	3.73	0.018	0.07	2.99	3.36	0.38	7.36
10 Kantunil	04/25/94	4.72	3.63	0.018	0.11	4.11	4.63	0.46	7.87
11 Kinchil	12/20/93	6.14	3.36	0.019	0.15	6.87	9.42	1.30	6.49
12 Kochol	12/19/93	7.32	4.40	0.046	0.23	11.15	11.95	5.26	6.13
13 Kochol	08/22/94	7.76	4.58	0.049	0.25	11.30	11.66	4.93	6.10
14 Kopoma	06/23/93	7.75	6.09	0.052	0.36	14.37	14.60	6.72	6.42
15 Kopoma	09/10/93	8.42	6.46	0.059	0.34	15.45	17.25	7.31	6.29
16 Mama	06/22/93	6.90	3.89	0.053	0.12	4.85	5.23	3.20	6.54
17 Mani	06/24/93	6.66	4.27	0.047	0.14	5.64	5.76	4.82	6.60
18 Maxcanu	12/17/93	5.16	3.07	0.021	0.11	4.44	4.46	1.98	7.31
19 Maxcanú	08/25/94	5.76	3.58	0.025	0.14	5.87	5.70	2.46	7.23
20 Opichen	06/24/93	8.03	5.91	0.060	0.28	12.08	12.08	7.85	6.51
21 Opichen	12/18/93	9.20	5.35	0.058	0.22	9.15	10.19	6.16	6.93
22 Opichen	08/25/94	7.82	6.32	0.063	0.29	13.05	13.11	7.74	6.47
23 Oxkutzcab	09/10/93	4.61	2.89	0.022	0.11	6.70	5.30	2.45	6.10
24 Peto	09/10/93	6.31	4.30	0.122	0.62	8.87	7.37	5.02	7.13
25 Pozo Celestún (de obs.)	12/20/93	4.36	1.97	0.027	0.13	4.37	5.53	1.72	4.72
26 Sacalum	06/23/93	7.15	5.28	0.047	0.20	11.04	10.95	6.06	6.36
27 Sacalum	08/25/94	8.23	5.40	0.054	0.19	10.10	11.80	5.85	6.54
28 San Antonio Tedzidz	12/22/93	6.46	5.01	0.032	0.23	10.85	12.44	3.08	6.90
29 San José Tipceh	12/18/93	9.28	6.18	0.063	0.23	12.56	14.56	8.30	6.11
30 Santa Elena	12/18/93	8.28	5.15	0.068	0.18	7.75	8.68	7.99	6.43
31 Santo Domingo	12/19/93	4.70	1.36	0.015	0.12	2.27	2.45	1.09	4.80
32 Sayil	12/18/93	5.97	2.83	0.010	0.14	2.04	2.17	0.59	8.03
33 Sierra Papacal	08/24/94	5.31	3.36	0.022	0.20	9.44	10.98	1.25	6.59
34 Soluta	06/22/93	5.77	2.75	0.015	0.32	3.04	3.52	0.52	6.82
35 Tecoh	06/22/93	5.13	3.48	0.014	0.09	3.91	4.63	0.48	7.10
36 Tecoh	08/23/94	4.37	3.31	0.014	0.09	4.01	4.46	0.47	7.06
37 Tekax	09/10/93	5.08	3.28	0.022	0.14	6.82	6.99	2.45	6.36
38 Tekit	09/09/93	4.95	3.03	0.038	0.06	3.14	3.57	0.90	6.49
39 Telchaquillo	06/24/93	4.60	3.25	0.009	0.33	2.90	3.42	0.55	6.95
40 Temax	04/24/94	4.41	1.58	0.011	0.02	1.61	1.24	0.17	5.67
41 Ticul	06/24/93	5.41	3.92	0.034	0.13	7.32	7.05	3.62	5.97
42 Ticul	12/17/93	6.71	3.28	0.035	0.08	5.42	6.99	3.91	5.52
43 Tunkas	04/23/94	6.34	2.67	0.022	0.10	4.56	5.25	0.43	7.00
44 Tzucacab	09/09/93	11.27	5.75	0.088	0.23	9.91	10.37	11.36	5.54
45 UNAM-2 350 m	08/23/94	48.62	107.70	0.543	10.93	559.32	606.73	69.05	4.36
46 UNAM-2 bombeo	08/18/94	46.80	97.17	0.515	10.00	526.29	612.46	69.19	4.62
47 UNAM-5 400 m	08/19/94	86.27	101.64	0.732	7.97	473.36	577.49	86.30	2.90
48 UNAM-5 bombeo	08/19/94	75.63	98.17	0.678	8.00	475.54	569.47	86.91	3.11
49 Uxmal	12/18/93	9.05	5.78	0.074	0.24	10.77	10.12	9.10	7.39
50 Agua del mar *		20.51	106.13	0.183	10.20	468.03	545.84	56.42	2.33

* Los datos de agua del mar fueron tomados de Drever, 1988

Tabla 7
Relaciones entre iones principales

Nombre	Fecha de muestreo	SO ₄ /Cl x 1000	Na/Cl x 1000	Ca/SO ₄	K/Cl x 100	Sr/SO ₄ x 1000	Sr/Cl x 1000
1 Abala	06/23/93	499.5	913.7	2.28	8.35	11.4	5.71
2 Abalá	08/25/94	492.3	873.2	1.85	1.64	13.0	6.41
3 Bucotzotz	04/24/94	166.5	1220.5	10.12	6.18	25.5	4.24
4 Celestún	12/19/93	343.8	833.8	1.41	1.64	9.3	3.21
5 Celestún	04/26/94	357.7	913.2	1.44	2.06	9.7	3.47
6 Chochola	08/22/94	253.5	841.2	2.63	1.53	13.9	3.52
7 Dzilam González	04/24/94	84.2	890.1	13.47	1.77	40.2	3.39
8 Homun	06/22/93	111.5	827.5	15.78	2.34	38.2	4.26
9 Huhi	06/22/93	114.4	891.5	13.74	2.11	48.1	5.51
10 Kantunil	04/25/94	99.0	889.5	10.31	2.36	38.4	3.80
11 Kinchil	12/20/93	138.1	728.9	4.72	1.59	14.9	2.06
12 Kochol	12/19/93	439.9	933.3	1.39	1.96	8.7	3.84
13 Kochol	08/22/94	422.5	968.8	1.58	2.16	10.0	4.23
14 Kopoma	06/23/93	480.1	984.4	1.15	2.50	7.7	3.55
15 Kopoma	09/10/93	423.4	895.4	1.15	1.95	8.0	3.41
16 Mama	06/22/93	612.2	927.1	2.16	2.20	16.5	10.13
17 Maní	06/24/93	836.7	979.4	1.38	2.43	9.7	8.09
18 Maxcanu	12/17/93	444.4	995.7	2.60	2.52	10.6	4.71
19 Maxcanú	08/25/94	431.3	1029.8	2.34	2.39	10.0	4.33
20 Opichen	06/24/93	649.7	999.9	1.02	2.33	7.7	4.99
21 Opichen	12/18/93	605.2	898.5	1.49	2.16	9.5	5.74
22 Opichen	08/25/94	589.9	995.4	1.01	2.20	8.1	4.77
23 Oxkutzcab	09/10/93	461.6	1265.0	1.89	2.15	8.9	4.09
24 Peto	09/10/93	680.1	1203.3	1.26	8.44	24.3	16.53
25 Pozo Celestún (de observación)	12/20/93	311.7	789.8	2.53	2.32	15.9	4.95
26 Sacalum	06/23/93	553.8	1008.9	1.18	1.83	7.7	4.27
27 Sacalum	08/25/94	495.6	855.3	1.41	1.60	9.3	4.60
28 San Antonio Tedzidz	12/22/93	247.8	872.1	2.10	1.82	10.3	2.55
29 San José Tipceh	12/18/93	570.3	862.6	1.12	1.56	7.6	4.34
30 Santa Elena	12/18/93	920.2	892.6	1.04	2.04	8.5	7.78
31 Santo Domingo	12/19/93	446.4	926.4	4.30	5.06	13.6	6.06
32 Sayil	12/18/93	272.0	942.1	10.12	6.48	16.2	4.42
33 Sierra Papacal	08/24/94	114.3	859.9	4.23	1.84	17.6	2.02
34 Sotuta	06/22/93	146.7	865.0	11.17	9.02	29.2	4.28
35 Tecoh	06/22/93	104.1	845.0	10.62	2.01	28.4	2.96
36 Tecoh	08/23/94	106.1	899.8	9.25	1.93	30.4	3.23
37 Tekax	09/10/93	350.4	976.5	2.07	1.96	8.9	3.10
38 Tekit	09/09/93	252.3	877.8	5.49	1.82	42.3	10.67
39 Telchaquillo	06/24/93	162.0	848.0	8.31	9.72	16.5	2.67
40 Temax	04/24/94	137.6	1293.3	25.81	1.94	65.5	9.01
41 Ticul	06/24/93	514.2	1038.8	1.49	1.78	9.4	4.83
42 Ticul	12/17/93	559.8	774.9	1.71	1.18	8.9	4.96
43 Tunkas	04/23/94	81.4	869.7	14.85	1.82	51.9	4.22
44 Tzucacab	09/09/93	1096.4	956.4	0.99	2.21	7.7	8.46
45 UNAM-2 350 m	08/23/94	113.8	921.9	0.70	1.80	7.9	0.89
46 UNAM-2 bombeo	08/18/94	113.0	859.3	0.68	1.63	7.4	0.84
47 UNAM-5 400 m	08/19/94	149.4	819.7	1.00	1.38	8.5	1.27
48 UNAM-5 bombeo	08/19/94	152.6	835.1	0.87	1.41	7.8	1.19
49 Uxmal	12/18/93	898.4	1063.9	0.99	2.33	8.2	7.33
50 Agua del mar*		103.4	857.4	0.36	1.87	3.2	0.33

*Los datos de agua del mar fueron tomados de Drever, 1988

INDICES DE SATURACION $\log(AP/KT)$ de los siguientes minerales:

Nombre	Fecha de muestreo	Anhidrita	Aragonita	Calcita	Celestina	Dolomita	Yeso	Halita
1 Abala	05/23/93	-1.738	0.082	0.220	-1.935	1.377	-1.471	-5.343
2 Abala	08/25/94	-1.561	-0.175	-0.038	-1.613	0.881	-1.292	-6.029
3 Bucutzotz	04/24/94	-2.627	-0.280	-0.142	-3.126	0.712	-2.354	-6.883
4 Celestín	12/19/93	-1.352	-0.301	-0.162	-1.430	0.646	-1.075	-5.300
5 Celestín	04/26/94	-1.371	-0.194	-0.055	-1.448	0.907	-1.093	-5.318
6 Chochola	08/22/94	-1.692	-0.091	0.046	-1.868	1.074	-1.428	-5.740
7 Dziam González	04/24/94	-2.440	-0.194	-0.056	-2.820	0.575	-2.170	-6.329
8 Homun	06/22/93	-2.565	0.624	0.761	-3.226	2.468	-2.307	-6.807
9 Huhí	05/22/93	-2.563	0.098	0.236	-2.895	1.455	-2.293	-5.706
10 Kantunil	04/25/94	-2.532	-0.374	-0.236	-2.818	0.548	-2.262	-6.431
11 Kinchil	12/20/93	-2.024	-0.130	0.008	-2.421	0.887	-1.753	-5.913
12 Kochol	12/19/93	-1.432	-0.192	-0.054	-1.509	0.804	-1.167	-5.623
13 Kochol	08/22/94	-1.436	-0.143	-0.006	-1.543	0.897	-1.174	-5.628
14 Kopoma	06/23/93	-1.361	-0.219	-0.082	-1.462	0.865	-1.094	-5.437
15 Kopoma	09/10/93	-1.313	-0.096	0.041	-1.370	1.100	-1.046	-5.339
16 Mama	06/22/93	-1.599	0.086	0.225	-1.642	1.325	-1.326	-6.319
17 Maní	06/24/93	-1.458	0.019	0.157	-1.487	1.246	-1.188	-6.219
18 Maxcanu	12/17/93	-1.867	-0.407	-0.270	-2.194	0.369	-1.602	-6.419
19 Maxcanú	08/25/94	-1.758	-0.155	-0.018	-2.138	0.898	-1.488	-6.200
20 Opichen	06/24/93	-1.270	-0.048	0.089	-1.306	1.177	-1.005	-5.594
21 Opichen	12/18/93	-1.294	-0.015	0.122	-1.390	1.141	-1.028	-5.781
22 Opichen	08/25/94	-1.291	-0.266	-0.129	-1.321	0.786	-1.030	-5.527
23 Okutzcab	09/10/93	-1.826	-0.137	0.000	-2.104	0.933	-1.563	-6.168
24 Peio	09/10/93	-1.487	-0.162	-0.024	-1.116	0.914	-1.219	-5.923
25 Pozo Celestín (de observación)	12/20/93	-1.951	-0.348	-0.211	-2.022	0.364	-1.683	-6.324
26 Sacalum	06/23/93	-1.397	-0.059	0.078	-1.487	1.154	-1.129	-5.666
27 Sacalum	08/25/94	-1.361	-0.148	-0.010	-1.487	0.928	-1.093	-5.674
28 San Antonio Tedzidz	12/22/93	-1.704	-0.459	-0.321	-1.950	0.382	-1.436	-5.612
29 San José Tipcoch	12/18/93	-1.212	0.126	0.264	-1.306	1.477	-0.942	-5.499
30 Santa Elena	12/18/93	-1.215	-0.096	0.041	-1.196	1.005	-0.951	-5.922
31 Santo Domingo	12/19/93	-2.065	-0.366	-0.229	-2.648	0.135	-1.799	-6.950
32 Sayil	12/18/93	-2.300	-0.297	-0.160	-2.994	0.494	-2.035	-7.061
33 Sierra Papacal	06/24/94	-2.103	-0.196	-0.059	-2.447	0.825	-1.840	-5.714
34 Sotuta	06/22/93	-2.377	0.215	0.353	-2.747	1.517	-2.106	-6.677
35 Tecoh	06/22/93	-2.472	0.115	0.252	-3.098	1.474	-2.206	-6.453
36 Tecoh	08/23/94	-2.530	-0.305	-0.168	-3.089	0.684	-2.266	-6.456
37 Tekax	09/10/93	-1.804	-0.152	-0.015	-2.128	0.921	-1.544	-6.046
38 Tekit	09/09/93	-2.195	-0.075	0.063	-2.200	1.046	-1.927	-6.657
39 Telchaquillo	06/24/93	-2.438	-0.036	0.101	-3.012	1.185	-2.169	-6.708
40 Temax	04/24/94	-3.528	-0.251	-0.113	-4.186	0.462	-3.361	-7.391
41 Ticul	06/24/93	-1.637	-0.080	0.057	-1.811	1.112	-1.378	-6.017
42 Ticul	12/17/93	-1.508	-0.272	-0.135	-1.773	0.555	-1.247	-6.150
43 Tunkas	04/23/94	-2.448	-0.150	-0.012	-2.855	0.730	-2.173	-6.332
44 Tzucacab	09/09/93	-1.000	-0.181	-0.043	-1.001	0.744	-0.733	-5.752
45 UNAM-2 350 m	08/23/94	-0.639	-0.327	-0.191	-0.569	1.192	-0.399	-2.455
46 UNAM-2 bombeo	08/18/94	-0.633	-0.309	-0.172	-0.567	1.199	-0.392	-2.477
47 UNAM-5 400 m	03/19/94	-0.255	-0.211	-0.077	-0.326	1.166	-0.037	-2.557
48 UNAM-5 bombeo	08/19/94	-0.301	-0.230	-0.096	-0.347	1.168	-0.083	-2.561
49 Uxmal	12/18/93	-1.155	-0.098	0.039	-1.185	1.021	-0.899	-5.724

Tabla 8
Índices de saturación

Nombre	Fecha de muestreo	Amuestra	"exceso" Ca(muestra)	"exceso" Mg(muestra)	"exceso" Sr(muestra)	"exceso" K(muestra)	"exceso" Na(muestra)	"exceso" Cl(muestra)	"exceso" SO4(muestra)	"exceso" Ca/SO4
1 Abala	06/23/93	0.005	1.826	0.304	0.018	0.235	-0.547	0.000	1.875	0.974
2 Abalá	08/25/94	0.010	2.873	0.773	0.037	-0.114	-0.711	-0.000	2.812	1.022
3 Buctzotz	04/24/94	0.000	-0.003	-0.000	-0.000	0.003	0.000	0.000	-0.005	0.660
4 Celestún	12/19/93	0.030	4.634	0.363	0.045	-0.137	-1.255	0.000	4.338	1.068
5 Celestún	04/26/94	0.028	4.637	1.289	0.046	-0.061	0.157	0.000	4.289	1.081
6 Chochola	08/22/94	0.016	3.107	0.555	0.026	-0.132	-1.003	0.000	1.488	2.088
7 Dzilam González	04/24/94	0.005	1.902	-1.304	0.007	-0.101	-0.666	0.000	-0.250	-7.617
8 Homun	06/22/93	0.001	1.538	0.399	0.003	-0.082	-0.931	0.000	-0.126	-12.220
9 Huhí	06/22/93	0.002	1.346	0.657	0.008	-0.089	-0.723	0.000	-0.114	-11.823
10 Kantunil	04/25/94	0.004	0.754	0.317	0.007	-0.074	-0.687	0.000	-0.171	-4.416
11 Kinchil	12/20/93	0.013	2.024	-0.857	0.007	-0.122	-2.040	0.000	0.178	11.387
12 Kochol	12/19/93	0.018	3.121	-0.304	0.033	-0.084	0.082	-0.000	3.873	0.806
13 Kochol	08/22/94	0.017	3.575	-0.063	0.036	-0.061	0.474	-0.000	3.572	1.001
14 Kopoma	06/23/93	0.023	3.476	0.881	0.038	-0.003	1.033	0.000	5.060	0.687
15 Kopoma	09/10/93	0.027	4.062	0.751	0.044	-0.079	-0.161	-0.000	5.375	0.756
16 Mama	06/22/93	0.005	2.907	0.466	0.042	-0.079	-0.471	-0.000	2.509	1.159
17 Maní	06/24/93	0.006	2.655	0.746	0.035	-0.064	-0.132	-0.000	4.071	0.652
18 Maxcanu	12/17/93	0.004	1.191	-0.211	0.010	-0.067	-0.220	0.000	1.369	0.870
19 Maxcanú	08/25/94	0.006	1.759	0.067	0.014	-0.066	0.148	-0.000	1.719	1.024
20 Opichen	06/24/93	0.018	3.828	1.179	0.047	-0.040	0.898	0.000	6.454	0.593
21 Opichen	12/18/93	0.014	5.063	0.982	0.046	-0.066	-0.409	-0.000	4.963	1.020
22 Opichen	08/25/94	0.020	3.587	1.399	0.049	-0.051	0.987	0.000	6.232	0.976
23 Oxkutzcab	09/10/93	0.005	0.620	-0.548	0.011	-0.081	1.325	0.000	1.748	0.355
24 Peto	09/10/93	0.009	2.251	0.472	0.110	0.388	1.719	0.000	4.103	0.549
25 Pozo Celestún (de observación)	12/20/93	0.006	0.363	-1.511	0.016	-0.071	-1.208	-0.000	1.002	0.362
26 Sacalum	06/23/93	0.016	2.991	0.769	0.034	-0.099	0.832	-0.000	4.781	0.625
27 Sacalum	08/25/94	0.017	4.035	0.724	0.041	-0.127	-0.850	-0.000	4.482	0.900
28 San Antonio Tedzidz	12/22/93	0.019	2.250	0.213	0.019	-0.101	-0.641	-0.000	1.649	1.364
29 San José Tipceh	12/18/93	0.023	5.007	0.984	0.049	-0.139	-0.746	-0.000	6.651	0.753
30 Santa Elena	12/18/93	0.012	4.190	1.066	0.056	-0.081	-0.524	0.000	6.944	0.603
31 Santo Domingo	12/19/93	0.000	0.792	-1.532	0.005	-0.019	-0.670	-0.000	0.688	1.152
32 Sayil	12/18/93	-0.000	2.079	-0.010	-0.000	0.003	-0.656	-0.000	0.215	9.683
33 Siema Papacal	08/24/94	0.016	1.145	-1.158	0.009	-0.098	-0.799	-0.000	-0.029	-40.025
34 Sotuta	06/22/93	0.002	1.834	-0.352	0.005	0.155	-0.811	-0.000	0.002	1029.842
35 Tecoh	06/22/93	0.004	1.154	0.173	0.003	-0.090	-0.894	-0.000	-0.147	-7.850
36 Tecoh	08/23/94	0.004	0.406	0.027	0.004	-0.094	-0.647	0.000	-0.139	-2.929
37 Tekax	09/10/93	0.009	1.035	-0.476	0.010	-0.090	0.000	-0.000	1.576	0.656
38 Tekit	09/09/93	0.002	1.010	-0.079	0.028	-0.098	-0.765	-0.000	0.381	2.649
39 Telchaquillo	06/24/93	0.002	0.670	0.172	-0.001	0.172	-0.870	0.000	0.050	13.464
40 Temax	04/24/94	-0.002	0.538	-1.086	0.002	-0.096	-0.300	0.000	-0.109	-4.935
41 Ticul	06/24/93	0.009	1.368	0.151	0.023	-0.102	0.446	0.000	2.746	0.498
42 Ticul	12/17/93	0.009	2.566	-0.475	0.023	-0.144	-1.409	0.000	3.042	0.876
43 Tunkas	04/23/94	0.005	2.349	-0.762	0.011	-0.099	-0.770	-0.000	-0.266	-8.835
44 Tzucacab	09/09/93	0.015	7.125	1.346	0.075	-0.060	0.199	-0.000	10.145	3.702
49 Uxmal	12/18/93	0.014	4.908	1.430	0.062	-0.048	1.282	-0.000	7.900	0.621
50 Agua del mar (Drever, 1988)		1.000	-0.001	-0.001	0.003	0.005	0.000	0.000	0.003	-0.315

Los "excesos" para los sitios 45, 46, 47, 48 (muestras profundas), aparecen en la tabla 10

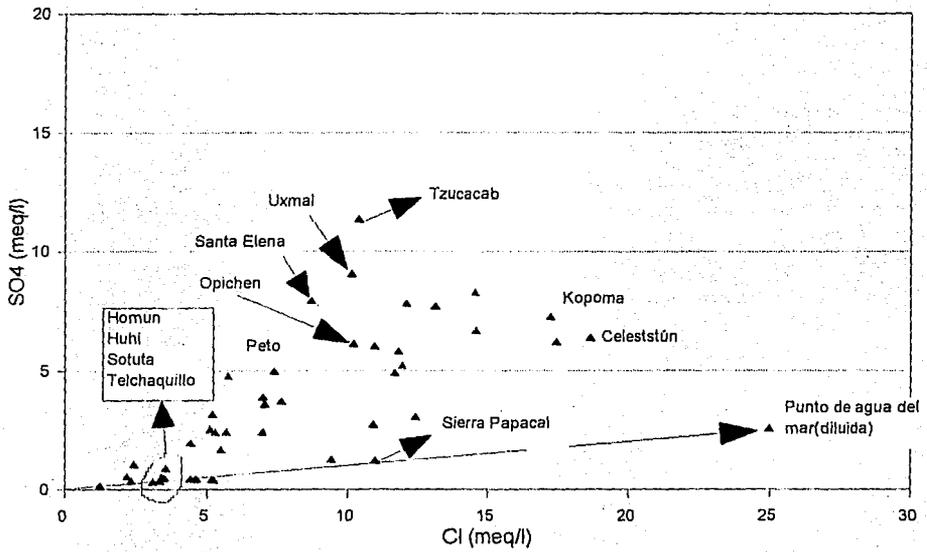
TABLA 9
Excesos de los iones principales de las muestras del lente de agua dulce

	Fecha de muestreo	Ca	Mg	Sr	K	Na	Cl	SO4	Alcalinidad como (HCO3)
Agua del mar *		20.51	106.13	0.183	10.20	468.03	545.84	56.42	2.33
45 UNAM-2 350 m	08/23/94	2.37	1.01	2.97	1.07	1.20	1.11	1.22	1.87
46 UNAM-2 bombeo	08/18/94	2.28	0.92	2.82	0.98	1.12	1.12	1.23	1.99
47 UNAM-5 400 m	08/19/94	4.21	0.96	4.01	0.78	1.01	1.06	1.53	1.25
48 UNAM-5 bombeo	08/19/94	3.69	0.92	3.71	0.78	1.02	1.04	1.54	1.34

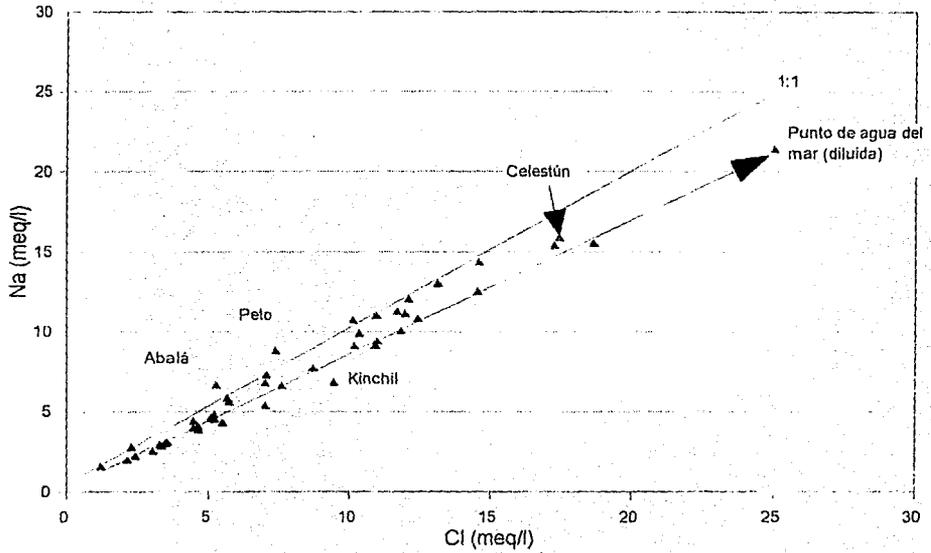
* Datos de Drever, 1988. En meq/l

Tabla 10
Factores de exceso de los iones principales de las muestras profundas con respecto al mar

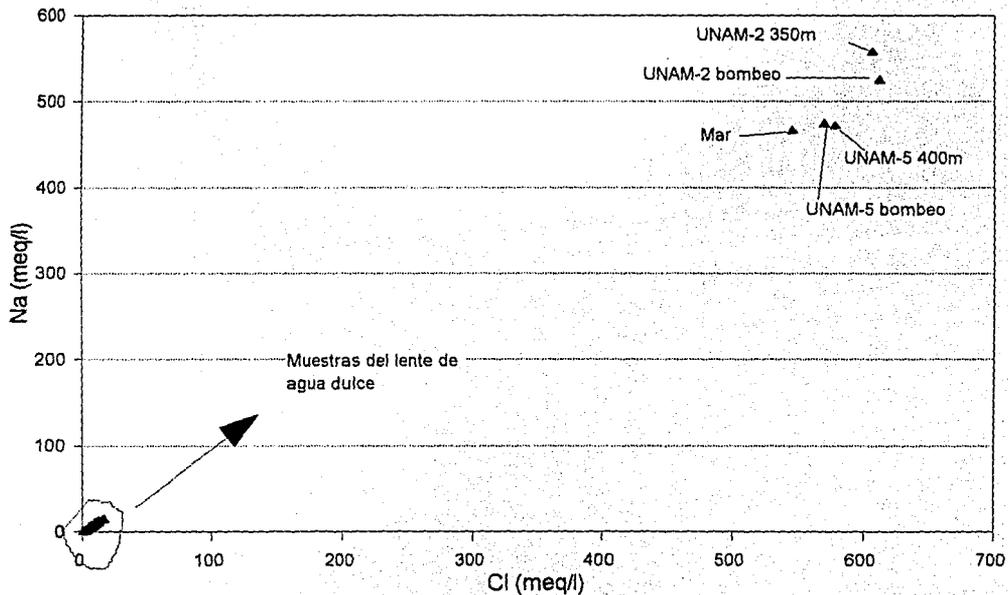
Gráfica 1
muestras del lente de agua dulce



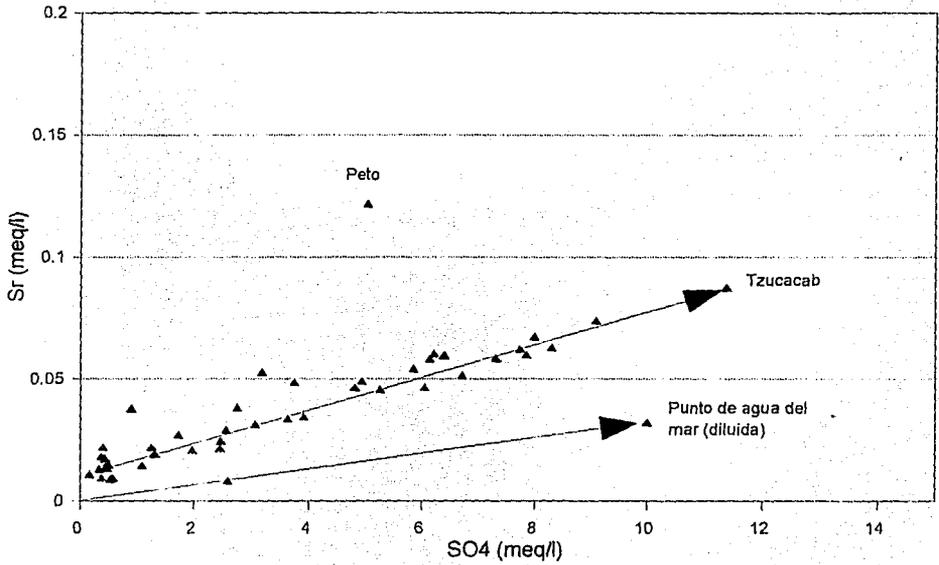
Gráfica 2
muestras del lente de agua dulce



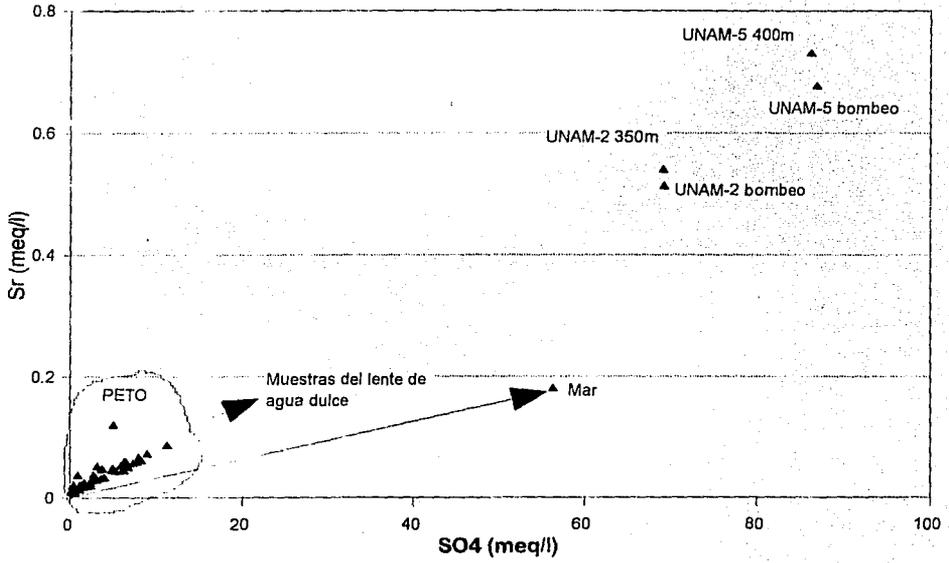
Gráfica 3
muestras profundas y del mar



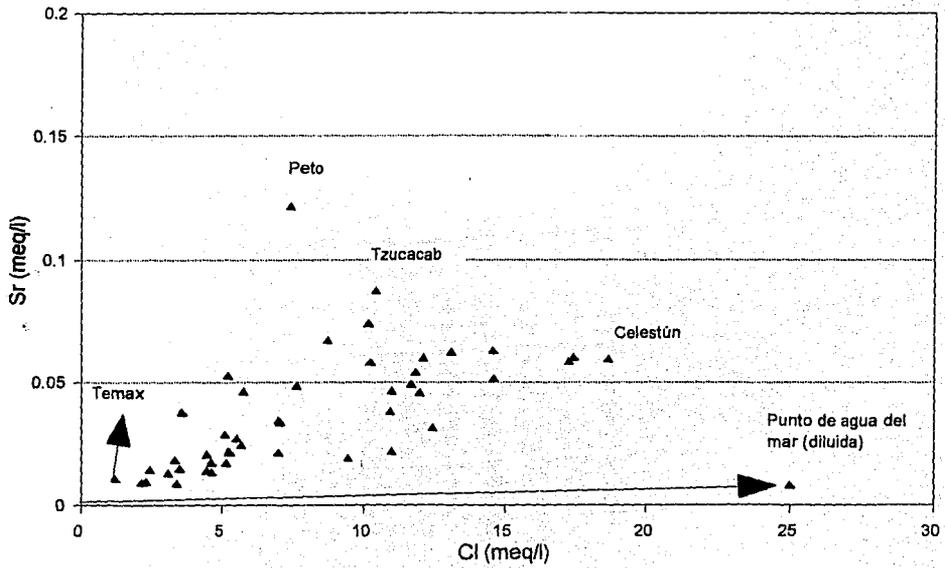
Gráfica 4
muestras del lente de agua dulce



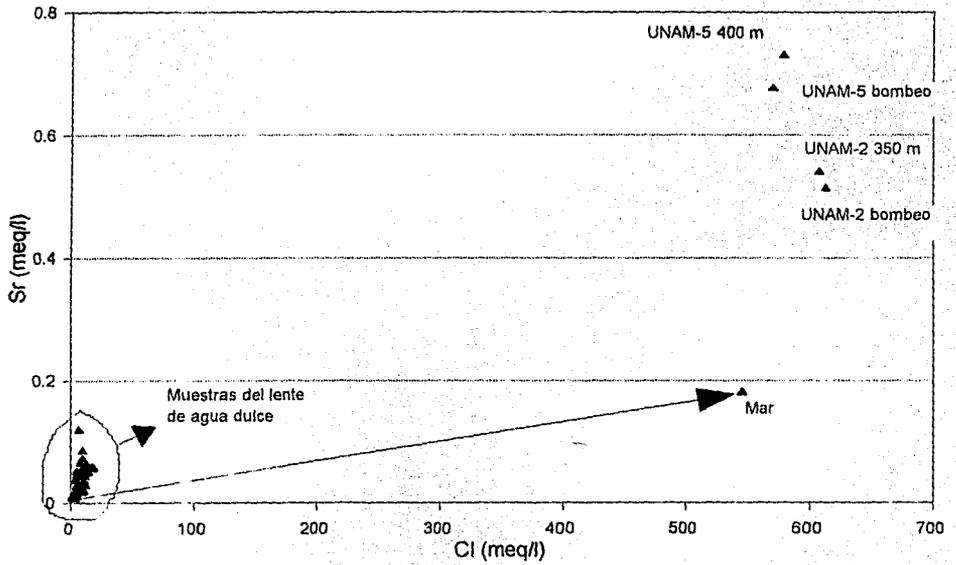
Gráfica 5
muestras profundas y del mar



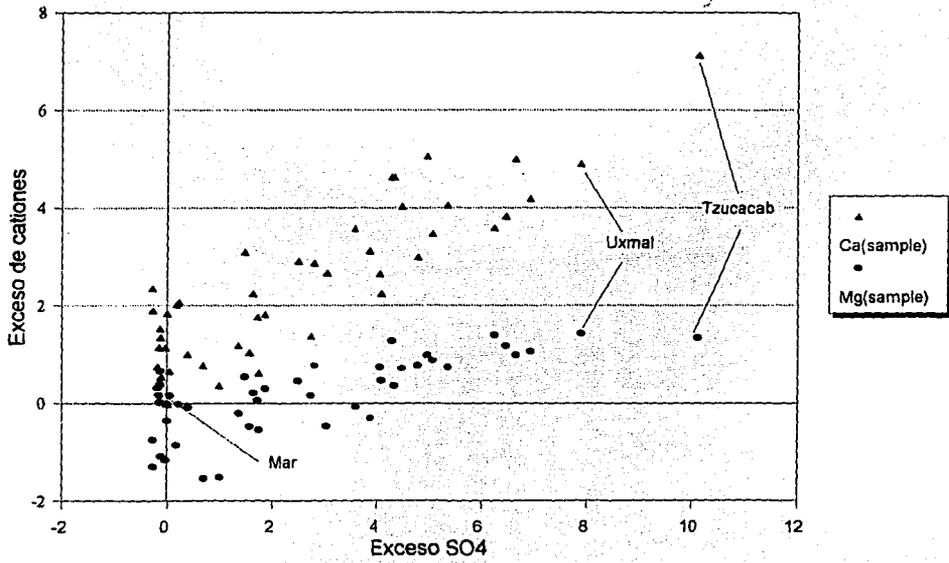
Gráfica 6
muestras del lente de agua dulce



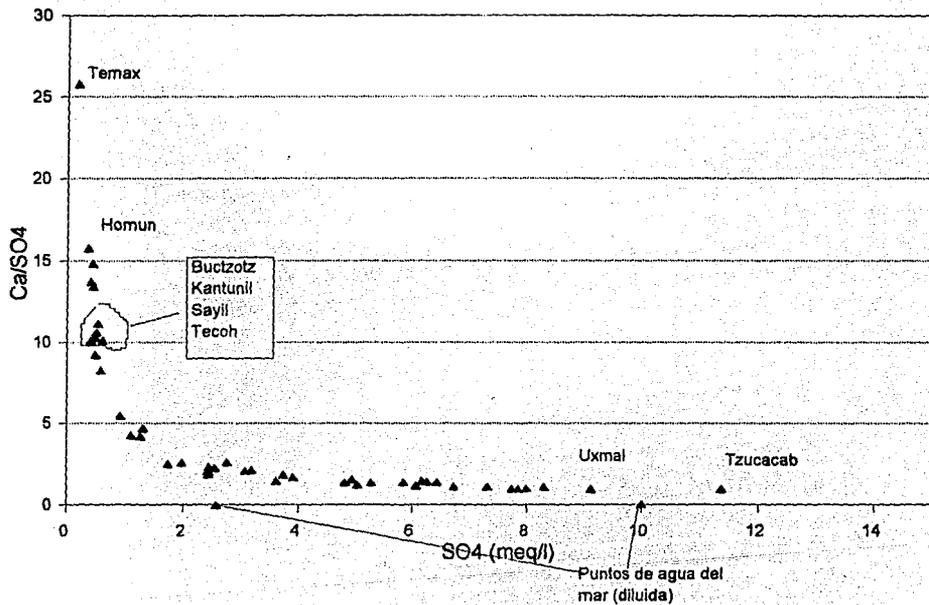
Gráfica 7
muestras profundas y del mar



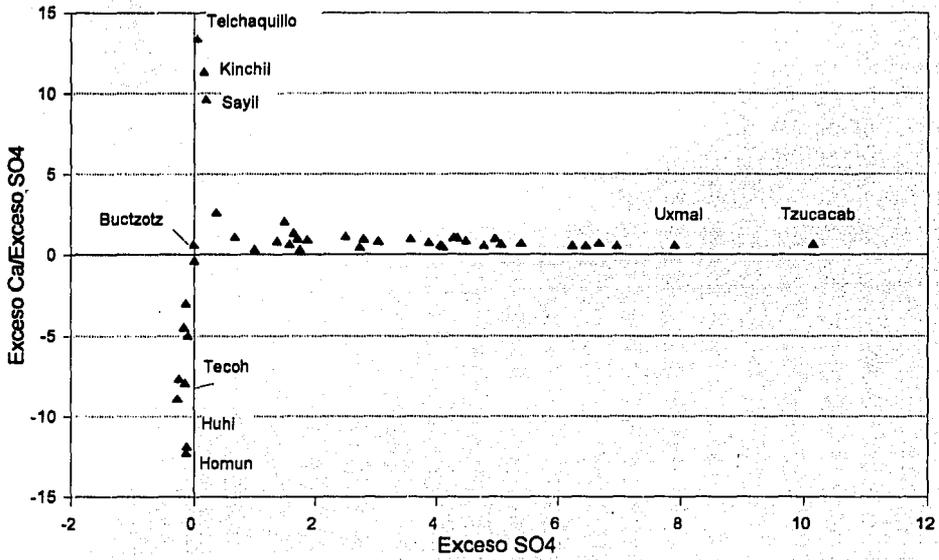
Gráfica 8
muestras del lente de agua dulce



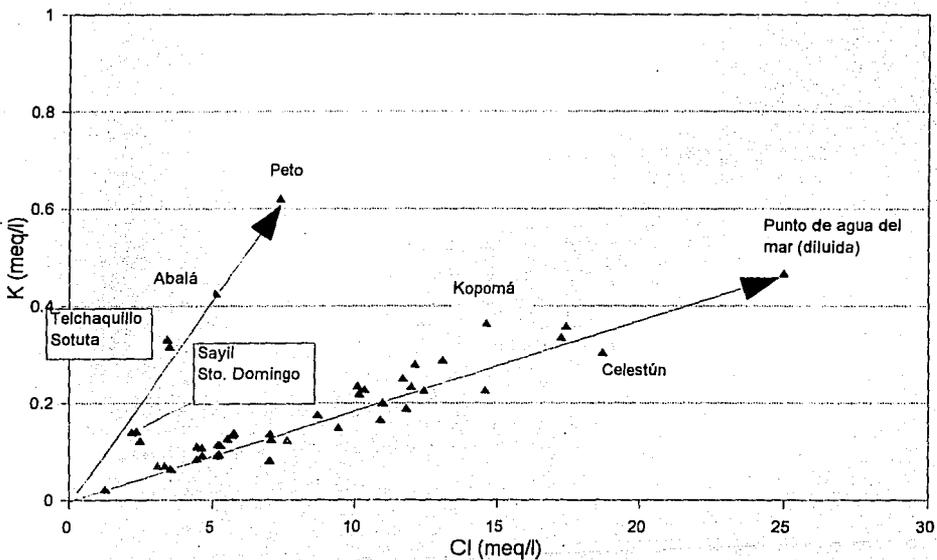
Gráfica 9
muestras del lente de agua dulce



Gráfica 10
muestras del lente de agua dulce



Gráfica 11
muestras del lente de agua dulce



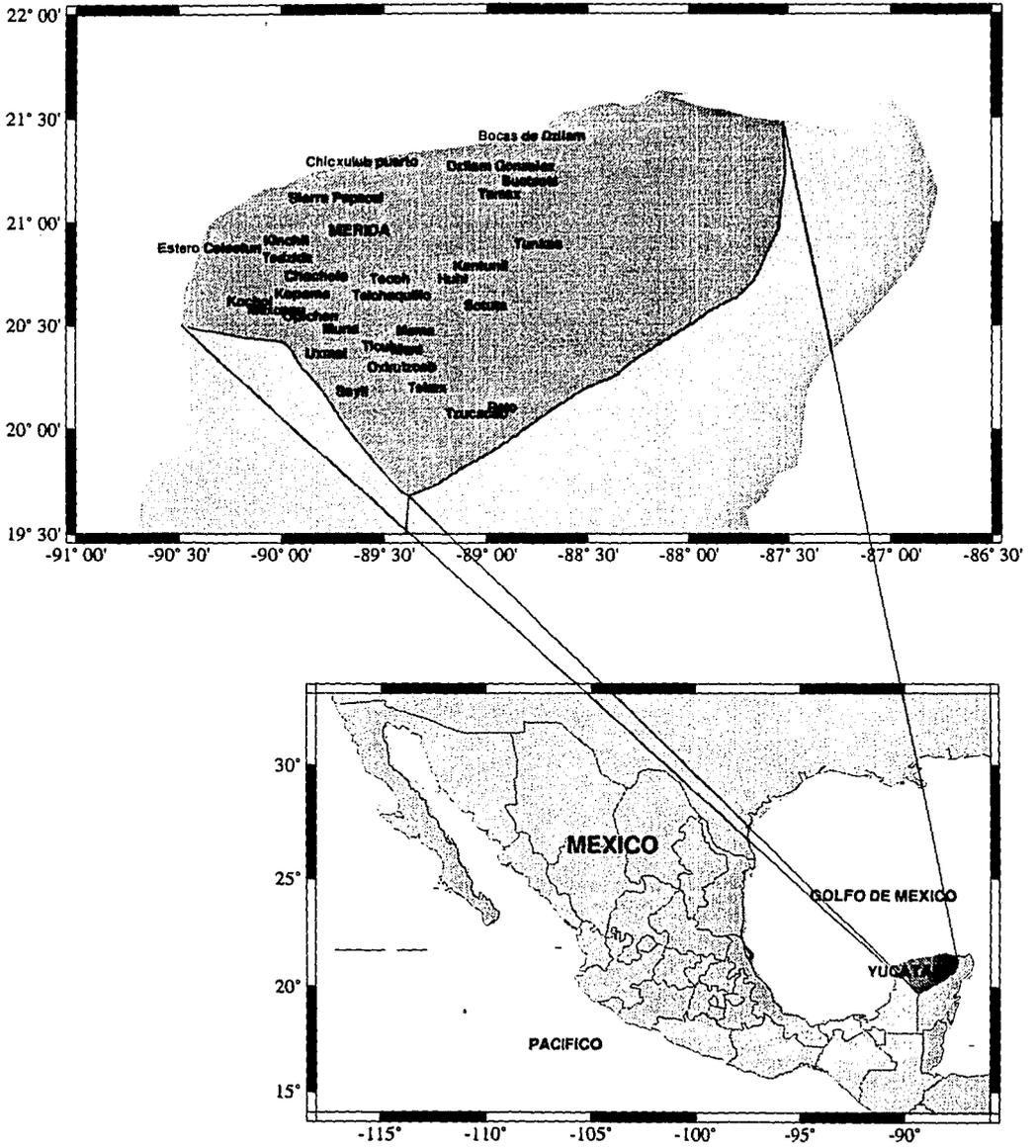


Figura 1.- Ubicación de la zona de estudio

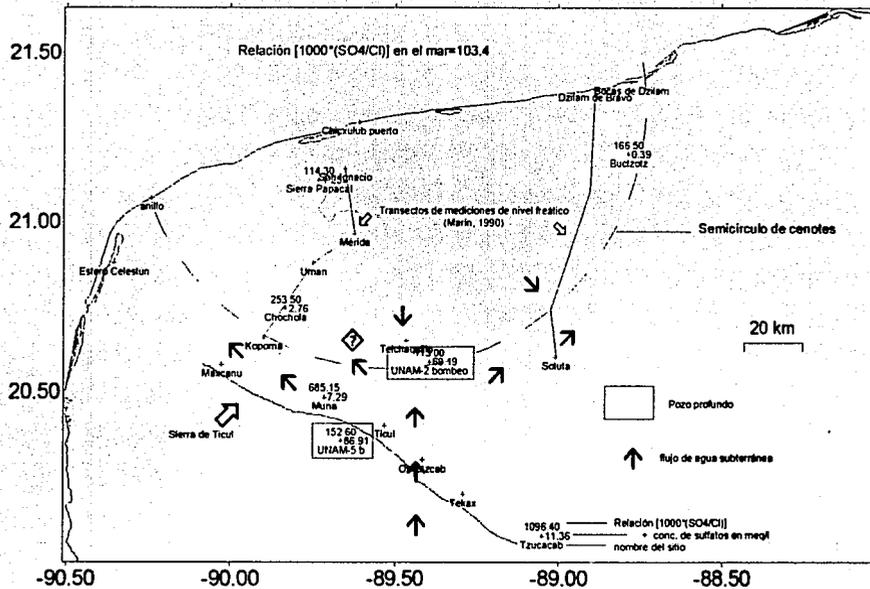


Figura 2.- Pozos profundos UNAM-2 y UNAM-5.
Dirección de flujo del agua subterránea

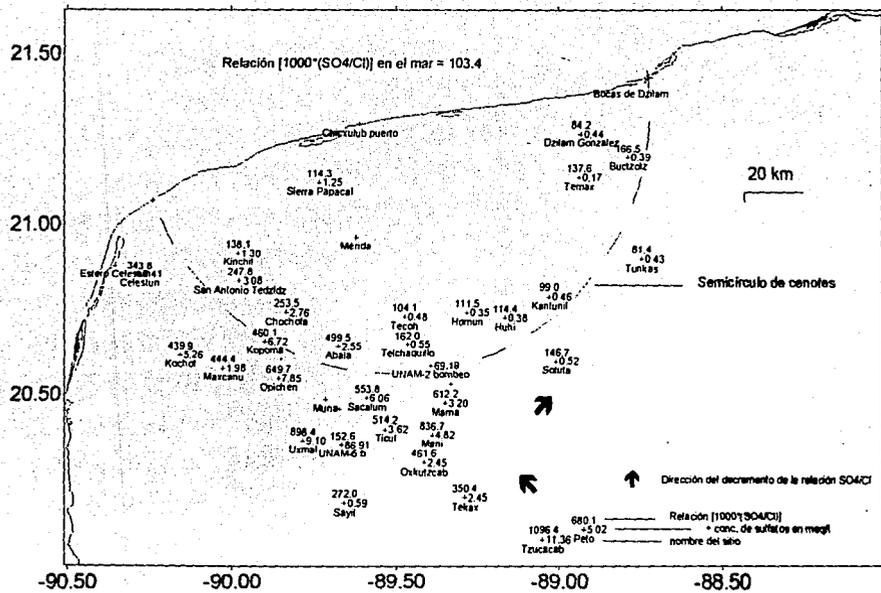


Figura 3.-Relación (SO4/Cl) x 1000
 Concentración de sulfatos

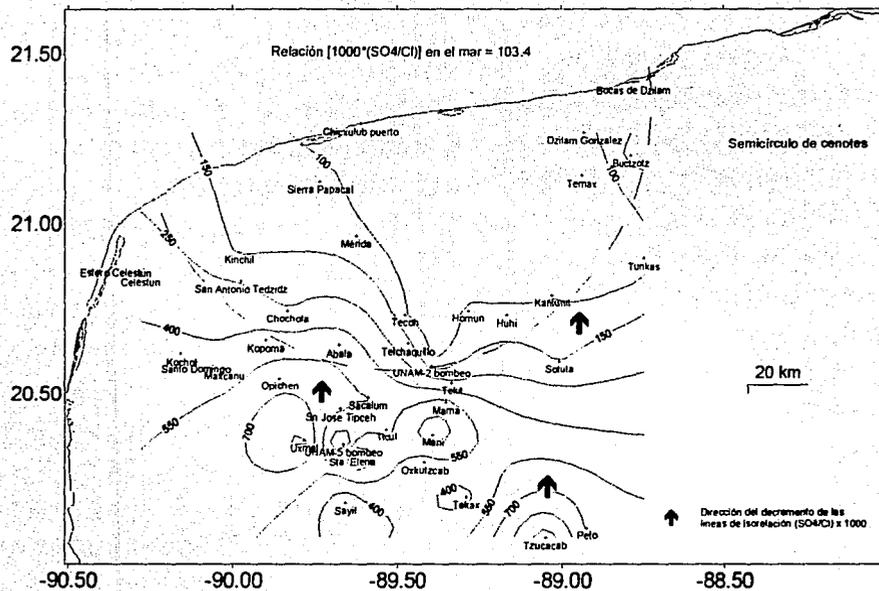
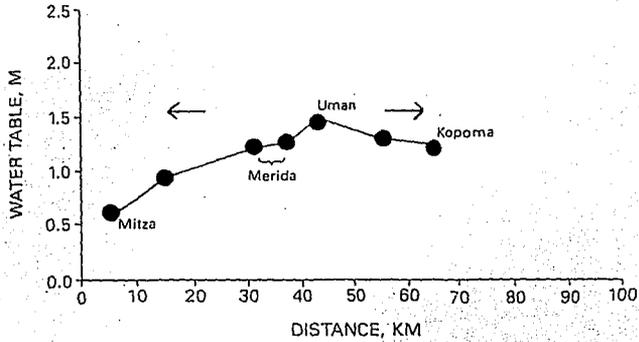
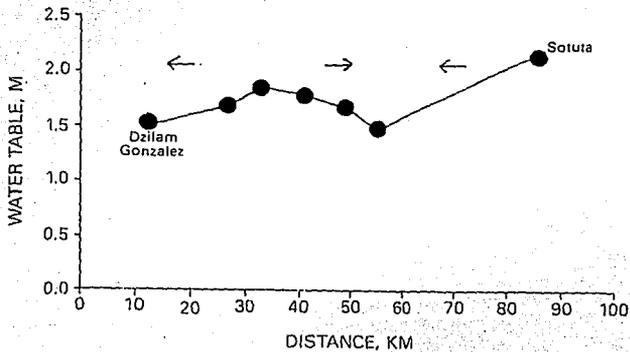


Figura 4.- líneas de isorelación $(SO_4/Cl) \times 1000$



San Ignacio-Kopoma transects. Data for upper figure are from July, 1987. The semi-circle of cenotes is located approximately at Kopoma. Arrows indicate ground-water flow directions.



Dzilam de Bravo-Sotuta transects. Data for upper figure is from July, 1987. Ring of cenotes is located 50-60 km from the sea. Arrows indicate ground-water flow directions.

Figura 5.- Niveles freáticos. Figura tomada de Marín, 1990.

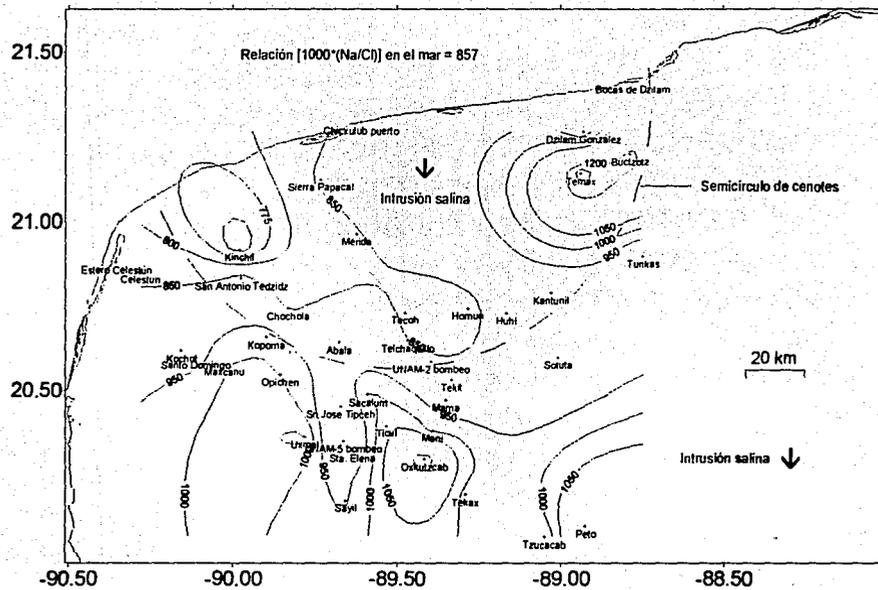


Figura 6.- líneas de isorelación (Na/Cl) x 1000

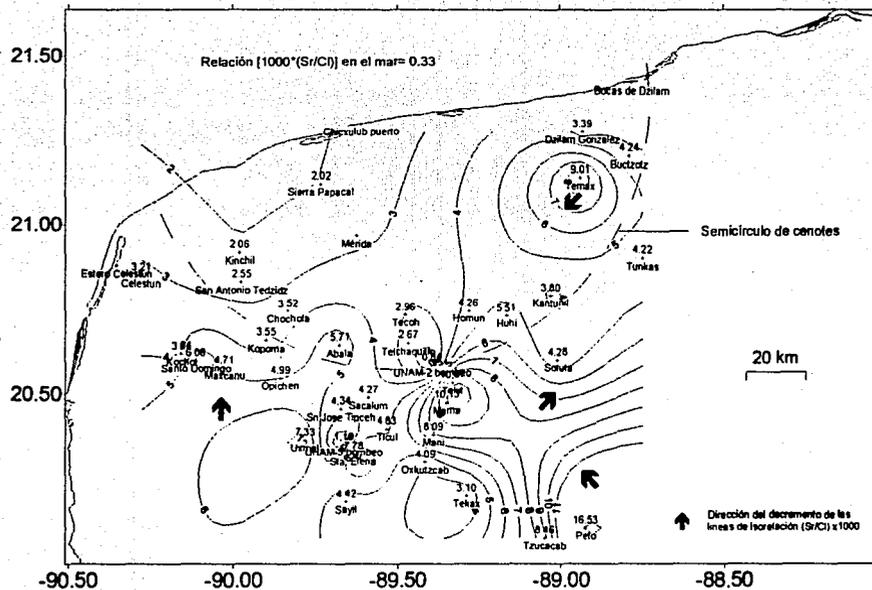


Figura 7.- líneas de isorelación (Sr/Cr) x 1000

APENDICE 1

Procedimiento para el lavado de botellas

Procedimiento para el lavado de botellas

Las botellas utilizadas son de polietileno (LDPE), con una capacidad de 125 ml.

- 1) Se lavaron con jabón (sin fosfatos) y agua corriente.
- 2) Se enjuagan hasta eliminar el agua rica en sales.
- 3) Se dejan en solución de ácido nítrico al 10%, durante 24 horas. Esta solución disuelve los iones que se encuentran absorbidos en el material de las botellas.
- 4) Se vacían y enjuagan 3 o 4 veces con agua desionizada, para eliminar el ácido remanente en la botella.
- 5) Por último se llenan con agua desionizada, con la finalidad de tener agua para enjuagar el equipo de campo.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

APENDICE 2

Procedimiento para determinar alcalinidad por el método de Gran, con el ejemplo de Peto.

Procedimiento para determinar alcalinidad por el método de Gran

1. Se toma un volumen de muestra. El sistema de alcalinidad de Hach está calibrado para indicar la alcalinidad como 1 ppm de CaCO_3 para cada giro registrado en el disco de la pistola, bajo las siguientes condiciones: a) el cartucho debe tener ácido sulfúrico a una concentración de 1.6 N, y b) Se deben tener 100 ml de solución (muestra) para titular.

- Para otra concentración del ácido, el factor de corrección es: $(X/1.6)$, donde X es la normalidad del ácido utilizado.
- Para otro volumen de muestra, el factor de corrección es: $(100/Y)$, donde Y es el volumen de muestra utilizado.

2. Se hace una tabla, que contenga:

- ⇒ Volumen de la muestra
- ⇒ temperatura
- ⇒ pH
- ⇒ unidades de ácido agregadas
- ⇒ concentración del ácido
- ⇒ función de $\text{pH} = (1000 \cdot 10^{-(\text{pH})})$

En las primeras unidades de ácido agregadas, el pH varía muy poco, porque el sistema está amortiguando el ácido agregado.

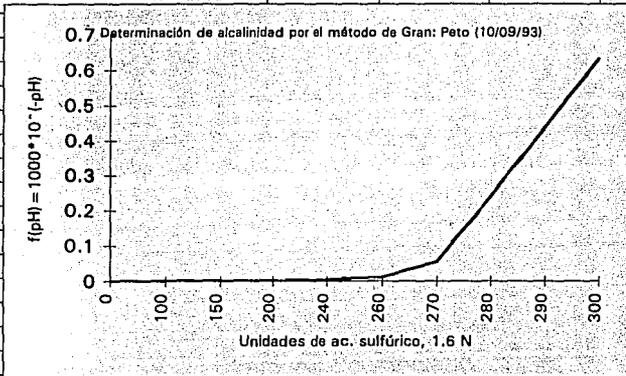
En las muestras de Yucatán, se tenía idea de la alcalinidad del agua, entonces se agregó libremente entre 50 y 150 unidades de ácido para las primeras lecturas de pH. Se debe ir observando la variación de pH con respecto a las unidades de ácido agregadas. Cuando se lee un pH en el rango de 5, se debe disminuir la cantidad de ácido que se venía agregando, ver la tabla en el cálculo de alcalinidad para Peto (10/09/93). Cuando la solución deja de amortiguar el ácido, el pH varía en proporción directa con la unidad

agregada. Después del cambio (270 unidades agregadas, en el ejemplo de Peto), se deben tener 3 ó 4 puntos.

3. Se grafican las unidades de ácido contra la función de pH, (ver ejemplo).
4. Por medio de una regresión lineal, se evalúa la intersección de la recta (ver ejemplo).
5. Si el volumen de muestra fue de 100 ml y la concentración del ácido 1.6 N, el valor intersectado corresponde a la alcalinidad como CaCO_3 expresada en ppm. Si alguna de las condiciones anteriores cambió, entonces se debe multiplicar el factor de corrección requerido por el valor de intersección de la recta. Para expresar la alcalinidad de carbonato (AC) como alcalinidad de bicarbonato (AB) en ppm, se aplica el siguiente factor de conversión: $(AB)=1.22*(AC)$.

Cálculo de alcalinidad (método de Gran) para Peto (10/09/93)

Volumen de muestra:	75	ml		
Temperatura de la muestra		22.7	°C	
Unidades de ácido agregado	f(pH)	pH		
0	0.000145	6.84		
100	0.000661	6.18		
150	0.000891	6.05		
200	0.001549	5.81		
240	0.003467	5.46		
260	0.012023	4.92		
270	0.054954	4.26		
280	0.239883	3.62		
290	0.436516	3.36		
300	0.630957	3.2		



REGRESION LINEAL:

Slope	51.14
Y-intercept	267.71
coef. de determinación (r^2)	0.99999
Error standar para Y estimada	0.045745

Volumen de la muestra:	75	ml
Alcalinidad como CaCO ₃	357	ppm
Alcalinidad como bicarbonato	435	ppm

APENDICE 3

Resultados químicos en ppm para las muestras tomadas en:

junio de 1993

septiembre-diciembre de 1993

abril y agosto de 1994

Nombre	Fecha de muestreo	pH	Cl (ppm)	SO4 (ppm)	Alcalinidad como (HCO ₃) (ppm)					
					Ca (ppm)	Mg (ppm)	Sr (ppm)	K (ppm)	Na (ppm)	
1 Abala	06/23/93	7.11	181.3	122.7	385.0	116.5	45.1	1.3	16.7	107.4
2 Chochola	06/23/93	6.93	340.9	124.0	423.0	131.4	61.3	1.6	7.3	221.5
3 Homun	06/22/93	7.56	110.1	16.6	454.0	109.5	41.6	0.6	2.8	59.1
4 Huhi	06/22/93	7.07	119.0	18.4	449.0	105.8	45.4	0.8	2.8	68.8
5 Kopoma	06/23/93	6.77	517.5	322.6	392.0	155.4	74.1	2.3	14.3	330.4
6 Mama	06/22/93	7.05	185.3	153.7	399.0	138.2	47.4	2.3	4.5	111.4
7 Mani	06/24/93	7.01	204.0	231.3	403.0	133.5	52.0	2.0	5.5	129.6
8 Opichen	06/24/93	6.92	428.4	377.1	397.0	160.9	71.9	2.6	11.0	277.8
9 Sacalum	06/23/93	6.95	388.1	291.1	388.0	143.4	64.3	2.1	7.9	253.9
10 Sotuta	06/22/93	7.18	124.8	24.8	416.0	115.7	33.5	0.7	12.4	70.0
11 Tecoh	06/22/93	7.11	164.2	23.2	433.0	102.7	42.4	0.6	3.6	90.0
12 Tekit	06/22/93	7.08	129.1	40.0	385.0	111.2	39.4	1.7	3.0	73.5
13 Telchaquillo	06/24/93	7.01	121.3	26.6	424.0	92.3	39.6	0.4	13.0	66.7
14 Ticul	06/24/93	7.01	249.8	174.1	364.0	108.5	47.7	1.5	4.9	168.3
15 Yaxha	06/23/93	7.07	174.1	129.9	465.0	113.8	45.5	1.1 x		111.3

Nombre	Fecha de muestreo	pH	Cl (ppm)	SO4 (ppm)	Alcalinidad	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Sr (ppm)	K (ppm)	Na (ppm)
					como (HCO3) (ppm)					
1 Celestún	12/19/93	6.65	661.2	308.0	391.0	181.0	77.0	2.6	11.9	357.5
2 Chochola	09/10/93	6.90	384.3	154.5	424.0	19.9	9.3	0.2	0.9	29.6
3 Diaz Ordaz	12/20/93	6.82	106.8	104.2	384.0	116.2	41.6	1.0	5.5	177.4
4 Kinchil	12/20/93	6.87	334.1	62.5	396.0	123.1	40.9	0.9	5.9	157.9
5 Kochol	12/19/93	6.81	423.7	252.5	374.0	146.6	53.5	2.0	9.2	256.4
6 Kopoma	09/10/93	6.88	611.7	350.9	384.0	168.7	78.5	2.6	13.2	355.2
7 Maxcanu	12/17/93	6.59	158.0	95.1	446.0	103.3	37.3	0.9	4.4	102.0
8 Muna	12/18/93	6.91	374.7	330.2	391.0	135.4	21.3	1.8	2.4	77.1
9 Opichen	12/18/93	6.85	361.1	296.1	423.0	184.5	65.0	2.6	8.6	210.4
10 Oxkutzcab	09/10/93	6.99	187.9	117.5	372.0	92.4	35.1	1.0	4.5	154.1
11 Peto	09/10/93	6.83	261.4	240.9	435.0	126.4	52.3	5.3	24.3	204.0
12 Pozo Celestún (de observación)	12/20/93	6.89	196.0	82.8	288.0	87.4	24.0	1.2	5.0	100.4
13 San Antonio Tedzidz	12/22/93	6.53	441.0	148.1	421.0	129.4	60.9	1.4	8.9	249.4
14 San José Tipceh	12/18/93	7.08	516.1	398.8	373.0	186.0	75.1	2.8	8.9	288.7
15 Santa Elena	12/18/93	6.85	307.9	383.8	392.0	166.0	62.6	3.0	6.9	178.2
16 Santo Domingo	12/19/93	6.80	86.7	52.5	293.0	94.1	16.6	0.7	4.8	52.1
17 Sayil	12/18/93	6.57	76.9	28.4	490.0	119.7	34.4	0.4	5.5	47.0
18 Tekax	09/10/93	6.92	247.8	117.6	388.0	101.8	39.9	1.0	5.4	156.9
19 Tekit	09/09/93	6.97	126.7	43.3	396.0	99.2	36.9	1.7	2.5	72.1
20 Telchaquillo	09/09/93	6.81	111.9	26.1	398.0	102.0	41.4	0.4	12.5	66.6
21 Ticul	12/17/93	6.76	248.0	188.0	337.0	134.5	39.9	1.5	3.2	124.6
22 Tzucacab	09/09/93	6.74	367.5	545.9	338.0	225.9	69.9	3.8	9.0	227.9
23 Uxmal	12/18/93	6.76	358.9	436.8	451.0	181.3	70.3	3.3	9.2	247.6

Nombre	Fecha de muestreo	pH	Cl (ppm)	SO4 (ppm)	Alcalinidad	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Sr (ppm)	K (ppm)	Na (ppm)
					como (HCO3) (ppm)					
1 Abalá	08/25/94	6.76	270.0	180.0	437.0	139.0	56.6	2.1	4.9	152.9
2 Bucizotz	04/24/94	6.85	82.0	18.5	400.0	78.1	34.9	0.4	5.6	64.9
3 Celestún	04/26/94	6.75	618.2	299.6	400.0	180.3	85.5	2.7	14.0	366.1
4 Celestún	08/22/94	6.77			404.0	180.3	83.5	2.6	13.8	375.6
5 Cenotillo	04/23/94	6.73	187.0	25.5	350.0	130.4	32.5	0.8	5.9	132.6
6 Chochola	08/22/94	6.84	386.6	132.8	417.0	145.7	61.6	1.7	6.5	210.9
7 Dziliam González	04/24/94	6.80	184.0	21.0	380.0	118.0	25.7	0.8	3.6	106.2
8 Dzitás	04/23/94	7.12	96.0	42.0	273.0	105.8	20.7	0.6	38.3	73.8
9 Dzitzantun	04/24/94	6.83	119.5	13.5	348.0	115.9	21.5	0.9	2.3	79.2
10 Estero Celestún	12/19/93	7.81	4899.3	753.7	366.0	228.5	394.3		109.1	3164.5
11 Estero Celestún	12/20/93	7.87	5320.6	803.8	353.0	211.3	418.3		125.7	3541.0
12 Holca	04/25/94	6.81	178.0	18.0	402.0	121.5	41.3	0.9	3.8	99.0
13 Izamal	04/23/94	6.95	71.0	11.5	366.0	103.6	27.8	0.6	2.2	53.1
14 Kantunil	04/25/94	6.62	164.0	22.0	480.0	94.7	44.1	0.8	4.3	94.6
15 Kochol	08/22/94	6.83	413.4	236.6	372.0	155.5	55.8	2.2	9.8	259.7
16 Libre Unión	04/25/94	7.17	80.0	13.8	377.0	141.9	16.8	0.6	5.3	58.3
17 Mar Celestún	12/19/93	8.04	19377.0	2540.3	165.0	456.0	1390.4		443.8	11920.5
18 Maxcanú	08/25/94	6.81	202.0	118.0	441.0	115.5	43.6	1.1	5.3	134.9
19 Merida 1, pozo 2	08/24/94	6.67	174.0	26.0	403.0	113.6	34.9	0.7	4.1	108.3
20 Opichen	08/25/94	6.71	464.9	371.6	395.0	156.7	77.0	2.7	11.3	300.1
21 Piste	04/25/94	6.92	111.0	19.0	317.0	110.0	18.4	0.7	8.9	73.4
22 Quintana Roo	04/23/94	6.81	202.0	25.0	392.0	127.6	31.9	0.9	3.9	113.1
23 Sacalum	08/25/94	6.79	418.5	281.0	399.0	164.8	65.7	2.4	7.4	232.1
24 San José Tipceh	08/25/94	6.71	313.0	365.0	383.0	174.0	75.7	2.6	9.3	290.7
25 Santa Clara	04/24/94	7.04	407.0	59.0	433.0	158.0	38.1	1.7	10.1	248.2
26 Santo Domingo	08/22/94	7.03	63.5	45.0	246.0	95.1	16.7	0.7	5.4	56.5
27 Sierra Papacal	08/24/94	6.85	389.2	60.3	402.0	106.4	40.9	1.0	7.9	217.0
28 Tecoh	08/23/94	6.75	158.0	22.7	431.0	87.6	40.2	0.6	3.4	92.2
29 Temax	04/24/94	6.85	44.0	8.2	346.0	88.3	19.2	0.5	0.9	36.9
30 Tunkas	04/23/94	6.78	186.0	20.5	427.0	127.0	32.4	1.0	3.7	104.9
31 UNAM-2 350 m	08/23/94		21510.3	3316.5	266.0	974.3	1308.8	23.8	427.3	12858.8
32 UNAM-2 bombeo	08/18/94	6.52	21713.4	3323.1	282.0	937.8	1180.9	22.6	391.1	12099.3
33 UNAM-5 400 m	08/19/94		20473.9	4145.1	177.0	1729.0	1235.1	32.1	311.6	10882.5
34 UNAM-5 bombeo	08/19/94	6.54	20189.4	4174.5	190.0	1515.5	1193.0	29.7	312.8	10932.6
35 Xocchel	04/22/94	6.77	198.0	26.0	449.0	135.8	38.7	0.8	3.3	114.2