



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C

Posgrado en Ciencias del Agua

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA
DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ESTE
DE QUINTANA ROO, MÉXICO**

Tesis que presenta

Alejandro Daniel Carmona Esquivel

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

Director: Dr. Gilberto Acosta González
Co-directora: Dra. Rosa María Leal Bautista

Cancún, Quintana Roo, México

Julio, 2019

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



Cancún, Quintana Roo a 12 de julio de 2019
Alejandro Daniel Garmona Esquivel

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.

POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Alejandro Daniel Carmona Esquivel** titulado "**Caracterización geoquímica del agua subterránea en el este de Quintana Roo, México**" fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de Hidrogeología con énfasis en sistemas kársticos, en el Laboratorio de Hidrogeología, del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Gilberto Acosta González, y la co-dirección de la Dra. Rosa María Leal Bautista, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente.

Dra. Clelia De la Peña Seaman
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 13 de Junio de 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la inmensa bendición de haber llegado hasta este momento.

Al Posgrado en Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán por haberme abierto sus puertas y brindarme la oportunidad de continuar mi desarrollo profesional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la valiosa beca otorgada para la realización de esta investigación (No. Becario 620677).

A mis padres, Beatriz y Héctor, a mis hermanos Risky, Héctor y Jorge por su apoyo incondicional en cada momento de mi vida, por el empujón a seguir mis sueños y llenar mi vida de mucho amor.

A los investigadores, colaboradores, administrativos, seguridad y limpieza de la Unidad de Ciencias del agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán por todo lo aprendido y por facilitar todo lo necesario en material científico y humano durante mi estancia en la UCIA.

Al Dr. Gilberto Acosta González por sus comentarios y consejos en la investigación, por todo lo aprendido durante este lapso, por su ayuda en el análisis de datos y brindarme su apoyo incondicional.

A la Dra. Rosa María Leal Bautista por su continuo apoyo e interés en esta investigación, por la confianza, su vital ayuda en el trabajo de campo y sus atinados comentarios para sacar lo mejor de este trabajo.

A la Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas por todas las atenciones brindadas en mi estancia en el IPICYT, su apoyo desde el inicio de este proyecto, por las valiosas sugerencias y apoyo para la elaboración de mi investigación.

Al Dr. German Carnevali Fernández-Concha por sus comentarios durante este proceso y formar parte importante de este proyecto siempre estando en buena disposición para ayudarme.

Al personal técnico del laboratorio de la UCIA por apoyarme a realizar el trabajo de laboratorio, a la Quim. Daniela Ortega Camacho por ayudarme con mis resultados y M.C. Cinthia Grimaldo por su apoyo con el equipo de laboratorio.

A todo el equipo del laboratorio de Hidrogeoquímica del Instituto Potosino de Investigación Científica en especial a Jazmín Mendoza y Rodrigo Rodríguez por el tiempo dedicado, el apoyo brindado y por su amistad.

A la Dra. María Elena Acosta y al Dr. Héctor de León por inspirarme y enseñarme desde temprana edad lo bonito que puede ser el camino de la investigación científica.

A mi amigo el Ing. José Navarro Benavides por su apoyo geológico en cada etapa en la que he estado, siempre con comentarios atinados durante todos estos años de amistad.

A mis amigos en Cancún: Juan Carlos, Javier, René, Juan Pedro, Daniel y Josman por su amistad y grandes experiencias desde los primeros días de la maestría.

A todos mis compañeros de la maestría por brindarme su amistad en especial a “Los chidos del CICY”, ustedes saben quiénes son.

Finalmente al Dr. Mario Rebolledo por haberme recibido en el CICY, por los consejos y apoyo desde el inicio de la Maestría, por su calidad humana, su valiosa amistad y por las grandes enseñanzas de vida.

*Me gusta andar, pero no sigo el camino
pues lo seguro ya no tiene misterio...*

Facundo Cabral

A Beatriz y Héctor

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Planteamiento del problema	5
2. ANTECEDENTES	6
2.1 Área de Estudio	6
2.2 Clima	6
2.3 Sistema kárstico	7
2.4 Geología Regional	9
2.4.1 Estratigrafía	10
2.5 El sistema hidrológico de la península de Yucatán	15
2.5.1 Agua superficial	16
2.5.2 Agua subterránea	16
2.5.3 Intrusión salina	18
2.6 Geoquímica del agua subterránea	18
3. JUSTIFICACIÓN	23
4. HIPÓTESIS	24
5. OBJETIVOS	24
5.1 Objetivo general	24
5.2 Objetivos específicos	24
6. METODOLOGÍA	25
6.1 Área de estudio	25
6.2 Selección de sitios y colecta de muestras	26
6.3 Caracterización de las muestras de agua	28
6.3.1 Cromatografía iónica	28
6.3.2 Alcalinidad – Método de Gran	29
6.4 Análisis de datos	29
6.4.1 Iones dominantes	29
6.4.2 Diagramas de Stiff	29
6.4.3 Diagrama de Piper	30
6.4.4 Índices de Saturación	30
6.4.5 Análisis de similitud en porcentaje (SIMPER)	31
6.4.6 Análisis de conglomerados	31
6.4.7 Escalonamiento multidimensional	31

7. RESULTADOS	32
7.1 Parámetros físico-químicos del agua	32
7.2 Caracterización geoquímica del agua subterránea	34
7.3 Iones dominantes	35
7.4 Diagramas de Stiff	36
7.4 Diagramas de Piper	39
7.6 Índices de saturación	41
7.7 Análisis estadísticos	43
8. DISCUSIÓN	47
9. CONCLUSIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	51

TABLAS

Tabla 1. Información general de los puntos de muestreo.....	27
Tabla 2. Variables fisicoquímicas de las muestras de agua.....	33
Tabla 3. Valores promedio, máximos y mínimos por zona de las variables fisicoquímicas.....	35
Tabla 4. Resultados de la clasificación por iones dominantes.....	36

FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica y geología de la Península de Yucatán, área promedio de 165,000 km ² (Modificado de Bauer et al., 2011).....	10
Figura 2. Correlación estratigráfica generalizada de la Península de Yucatán y Belice. (Modificada de López-Ramos 1972).....	12
Figura 3. Columna estratigráfica de la Península de Yucatán y Cuenca Macuspana (SGM, 2007).....	14
Figura 4. Modelo conceptual del acuífero de la Península de Yucatán. (Tomado de López-Tamayo, 2015).....	17
Figura 5. Áreas hidrogeoquímicas de la Plataforma de Yucatán, tomando en cuenta la tectónica, patrones de sedimentación, erosión y lluvia y tipo de roca. (Tomado de Perry et. al., 2002).	21
Figura 6. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea del trabajo de Sanchez-Sanchez et al 2015. La nomenclatura que acompaña a los puntos en azul dentro del rombo central indica los sitios de muestreo. Las flechas indican la evolución y tendencia de la química del agua.....	23
Figura 7. Ubicación geográfica del área de estudio, este del estado de Quintana Roo se observa tipo de roca, geología estructural y puntos de muestreo.....	25
Figura 8. Gráfica de temperatura de las tres zonas del área de estudio.....	32
Figura 9. Gráfica de conductividad eléctrica de las tres zonas del área de estudio.....	33
Figura 10. Gráfica de pH de las tres zonas del área de estudio.....	33

Figura 11. Clasificación por medio de diagramas de Stiff para la zona sur de Quintana Roo (Chetumal - Bacalar).....	37
Figura 12. Clasificación por medio de diagramas de Stiff para la zona centro de Quintana Roo (Cobá – Tulum).....	38
Figura 13. Clasificación por medio de diagramas de Stiff para la zona norte de Quintana Roo (Puerto Morelos - Cancún).....	38
Figura 14. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea de la zona centro...	39
Figura 15. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea de la zona centro...	40
Figura 16. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea de la zona centro...	40
Figura 17. Índice de Saturación (SI) calculados para la zona sur.....	41
Figura 18. Índice de Saturación (SI) calculados para la zona centro.....	42
Figura 19. Índice de Saturación (SI) calculados para la zona norte.....	43
Figura 20. Dendograma de las 35 muestras en los tres transectos del área de estudio. La línea punteada superior es la línea fenotípica utilizada para la selección del número de grupos.....	44
Figura 21. Mapa de escalonamiento multidimensional para los grupos obtenidos a partir del análisis de conglomerados.....	46
Figura 22. Ubicación geográfica para los grupos obtenidos a partir del análisis de conglomerados de las 35 muestras.....	46

RESUMEN

Este trabajo presenta un panorama geoquímico del agua subterránea en el estado de Quintana Roo. Se realizaron análisis y se clasificó geoquímicamente muestras de agua subterránea de tres diferentes zonas de la porción este de Quintana Roo (norte, centro y sur) con el objetivo de identificar su configuración química y la relación con el medio geológico e intrusión salina. Un total de 35 muestras de agua subterránea fueron colectadas de pozos de abastecimiento, pozos de aprovechamiento rural y cenotes durante los meses de Marzo a Junio 2018 para determinar la concentración de parámetros físicos (pH, conductividad eléctrica y temperatura) aniones y cationes mayoritarios. De acuerdo a los iones dominantes, se determinó el tipo de agua para cada muestra. Posteriormente, los datos se visualizaron en diagramas de Stiff y Piper. Adicionalmente, se realizaron modelaciones hidrogeoquímicas para estimar los valores de los índices de saturación utilizando el software libre PHREEQC, a partir de los resultados de los parámetros físico-químicos. De manera general, los resultados muestran que los tipos de agua predominantes son: en la zona sur, la de tipo cálcica bicarbonatada (Cl^- - Ca^{2+}), en la zona centro tipo clorurada cálcica (HCO_3^- - Ca^{2+}) y en la zona norte tipo cálcica clorurada (Ca^{2+} - Cl^-). Los índices de saturación obtenidos en este trabajo mostraron que los probables minerales que controlan la química del agua del área de estudio son: aragonita, calcita y dolomita precipitando y por su parte en disolución el yeso, anhidrita, halita y silvita. Se determinaron cinco grupos relativamente homogéneos basados en la examinación de las relaciones independientes entre un conjunto de variables por medio de un dendograma donde se observó el comportamiento en cuanto a las similitudes y diferencias entre las zonas del área de estudio, además, se realizó un análisis SIMPER donde se obtuvieron los porcentajes de similitud de las variables que mayor contribuyen a la formación de estos grupos siendo: pH, HCO_3 , Ca^2 , Cl^- y Na^+ al grupo 1 y 2. Al grupo 3 y 4: Cl^- , pH, Ca^2 , Na^+ y HCO_3 y del grupo 5: Ca^2 , SO_4 , pH, HCO_3 y Na^+ . Las técnicas utilizadas brindaron un panorama de la hidrogeoquímica en el estado de Quintana Roo y los factores relacionados en la configuración química obtenida, entre

ellos la interacción química agua-roca, procesos de intercambio iónico y mezclas de agua dulce y marina debido al efecto de intrusión salina.

Palabras clave: Quintana Roo, Karst, geoquímica del agua subterránea, rocas carbonatadas.

ABSTRACT

This work is a study of the groundwater geochemistry of the State of Quintana Roo. Geochemical analyzes were made in three different zones of the state (north, Centre and south). Although the state of Quintana Roo is lithologically similar, the geochemistry of groundwater presents variations due to the different chemical processes and variations in the local geology of the three zones. A total of 35 groundwater samples were collected from supply wells, rural wells and cenotes during the months of March to June of 2018, to determine the concentration of physical parameters as well as, pH, electrical conductivity and temperature and major cations and anions chemistry. According to the dominant ions was determined the type of water for each sample. Subsequently, the data was visualized in Stiff and Piper diagrams. Additionally, hydrogeochemical modeling were performed to estimate the values of the saturation index using the specialized software PHREEQC of USGS, based on the results of the physical and chemical parameters. In general, the results show that the predominant types of water: in the southern zone the calcium bicarbonate type ($\text{Cl}^- - \text{Ca}_2^+$), in the central zone the calcium chloride ($\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$) type and in the northern zone the calcium chloride ($\text{Ca}_2^+ - \text{Cl}^-$) type. Saturation index obtained in this study showed that the probable minerals that control the chemistry of the water of the area of study are: aragonite, calcite and dolomite are saturated and gypsum, anhydrite, halite and sylvite are undersaturated. Five relatively homogeneous groups were identified based on the examination of the independent relationships and differences between a set of variables by means of a dendrogram, subsequently a SIMPER analysis was made to identify the percentages of similarity of the variables that contribute most to the formation of these groups. The variables that greater they contribute generally to group

1 and 2 are: pH, HCO_3 , Ca^{2+} , Cl^- y Na^+ . The Group 3 and 4: Cl^- , pH, Ca^{2+} , Na^+ y HCO_3 and group 5: Ca^{2+} , SO_4 , pH, HCO_3 y Na^+ . The techniques used provided an overview of the hydrogeochemical composition of eastern Quintana Roo and the factors related with the geochemistry configuration obtained, such as water-rock chemical interaction, ion exchange process and mixture of fresh and marine water due to saltwater intrusion.

Key words: Quintana Roo, Karst, groundwater geochemistry, carbonate rocks.

1. INTRODUCCIÓN

En la Península de Yucatán (PY) la única fuente de agua es la que se encuentra subterránea (Bauer *et al.*, 2011). En el acuífero de la PY se encuentra la reserva hidrológica más grande de México (CONAGUA, 2015) y asimismo un suministro potencial de agua para la zona. El acuífero de la PY se define como un acuífero de tipo libre, kárstico por su geología y costero por su ubicación y es uno de los más extensos y espectaculares del planeta (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

El acuífero de la PY es la principal fuente de abastecimiento de agua para todas las actividades humanas en la PY, no obstante, es altamente vulnerable a la contaminación (Sanchez *et al.*, 2016). Se caracteriza por encontrarse sobre una superficie sensiblemente plana, con algunos lomeríos suaves y estructuras de disolución compuesta por rocas carbonatadas de edad reciente donde ocurren procesos de conexión entre la superficie y el agua subterránea debido a las numerosas fracturas y abundancia de estructuras de disolución en las rocas que lo constituyen, no presenta corrientes superficiales excepto por unas cuantas en el sur de la península. El acuífero de la PY se caracteriza por su rápida infiltración, fracturas, cavernas, su alta conductividad hidráulica, el escaso espesor de los suelos y de la zona no saturada, propiciando así la casi inmediata respuesta del medio hidrogeológico a agentes externos.

En el estado de Quintana Roo particularmente en su parte este, el acuífero es susceptible a degradación por el movimiento de la interfase salina que se origina como resultado en la mezcla de agua dulce y agua marina así como a variaciones en las condiciones de flujo (entradas y salidas) del agua a su interior (INEGI, 2002). Quintana Roo constituye la parte este de la PY y en sentido geológico comprende además los estados de Yucatán, Campeche, este de Tabasco, Belice y el norte de Guatemala.

Debido a las características tan heterogéneas del medio geológico y la falta de información en la química del agua en la zona es esencial entender los factores

involucrados en la composición química del agua subterránea, entre ellos factores naturales como son: clima, la cantidad e intensidad de precipitación, intrusión salina, interacción con el medio geológico, tiempo de residencia, topografía y mineralogía (Güler *et al.*, 2002) y factores antropogénicos como las descargas de residuos por la industria, la agricultura, la deforestación, la urbanización y los cambios en el uso de suelo (Baker, 2003).

El analizar y clasificar geoquímicamente el agua subterránea a través de técnicas de caracterización geoquímica y análisis estadísticos servirá para obtener una comprensión de la química y diversidad del agua subterránea en el estado de Quintana Roo. Esta información permitirá demostrar un panorama geoquímico, facilitando el buen entendimiento y aportando información relevante en las características del recurso hídrico y así contribuir al conocimiento de la relación entre el agua y el medio geológico.

1.1 Planteamiento del problema

La incorporación de los constituyentes al agua subterránea varía en concentraciones diferentes, esto es posible debido al alto poder disolvente y las propiedades de combinación del agua con otros elementos. La incorporación de sustancias al agua comienza incluso antes de incorporarse al flujo subterráneo. Gases, aerosoles, polvo, nutrientes presentes en la atmósfera y suelo, pueden integrarse a través de infiltración (Jenkins & Snoeyink, 1999).

El agua subterránea con características químicas definidas, originadas en la atmósfera o en la superficie del terreno, una vez infiltrada puede sufrir modificaciones drásticas en su composición como consecuencia de un conjunto de interacciones físicas, químicas y biológicas complejas con el medio en que se encuentra (Porrás *et al.*, 1985).

Aunque la composición media del agua subterránea suele considerarse invariable en un acuífero o porción del mismo, las interacciones agua-medio determinan dicha composición. Esta composición es el resultado de procesos dinámicos que se desarrollan

a ritmo diverso tanto en el espacio como en el tiempo; en consecuencia, la composición del agua subterránea natural debe contemplarse con la perspectiva de su posible variación espacio-temporal (Porrás Martín *et al.*, 1985).

El desmantelamiento de la evolución geoquímica de agua subterránea con diferente composición en un ambiente dado tiene que ver con sus reacciones y/o mezclas en este. Las reacciones geoquímicas explican la ganancia o pérdida de constituyentes, los cambios, asociaciones o mezclas en un ambiente (Frape and Fritz, 1984).

2. ANTECEDENTES

2.1 Área de Estudio

El estado mexicano de Quintana Roo, está ubicado en el extremo este de México, ocupa la porción oriental de la península de Yucatán. Sus límites naturales y geoestadísticos están entre los paralelos 17° 54' y 21° 36' de latitud norte y entre los meridianos 86° 45' y 89° 10' de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

El presente trabajo se desarrolla en la porción este del estado de Quintana Roo en los municipios de Benito Juárez al norte, Tulum al centro y Othón P. Blanco al sur del estado en las subregiones hidrológicas No. 32-A y 33-A conocidas como “Yucatán norte” y “Bahía de Chetumal y otras”, respectivamente. El estado de Quintana Roo tiene una topografía casi invariable y tiene en su punto más alto de 230 m.s.n.m y una ligera inclinación en dirección W-E hacia la costa (INEGI, 2002).

2.2 Clima

CONAGUA (2015), indica que el estado de Quintana Roo tiene un clima cálido subhúmedo con una temperatura media de 27.3 °C y una precipitación media anual

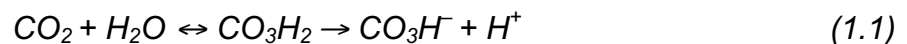
promedio de 1362.5 mm. De acuerdo con Hernández *et al.*, (2011) el estado se caracteriza por tener tres periodos meteorológicos: 1) una temporada de “secas” de Marzo a Mayo, con precipitaciones menores de 124.0 mm; 2) una temporada de lluvia de Junio a Octubre, donde hay presencia de ondas tropicales y donde ocurre la mayoría de la precipitación anual de 656 mm; y 3) la temporada de frentes fríos de Noviembre a Febrero, también llamados “nortes”, con vientos que alcanzan hasta 90.0 km/hr; y precipitación media de 321 mm.

2.3 Sistema kárstico

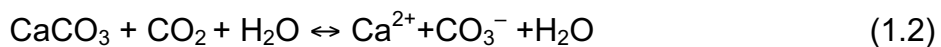
El término karst, es utilizado para describir especialmente al paisaje que contiene cavernas y sistemas hidrogeológicos que se desarrollan en rocas sedimentarias del tipo calizas, dolomitas y evaporitas (Ford and Williams, 2007). El origen de la palabra “karst” se deriva del alemán referente a la plataforma de “Krašt” en Eslovenia (Cvijic, 1918). El 20% a 25% de las rocas sedimentarias del planeta son de tipo kárstico, está cubierta por terreno kárstico (Milanovic, **1981**).

El agua es un factor imprescindible dentro del paisaje kárstico ya que funciona como agente de erosión y disolución en la roca.

La erosión química es el proceso de la disolución de la roca y se efectúa en un sistema $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}-\text{XCO}_2$ con X: Ca o Mg, en el cual ocurre primero la disolución del CO_2 atmosférico en agua y el CO_2 , físicamente disuelto, reacciona con el agua para formar ácido carbónico completamente disociado:



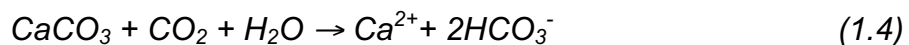
Cuando el agua entra en contacto con la roca carbonatada, los iones son liberados de su estructura cristalina:



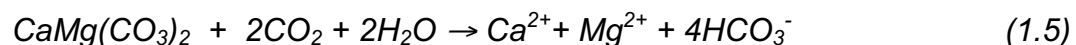
El ion creado se asocia con el H^+ :



De esta forma queda la reacción de la disolución de la calcita de la siguiente manera:



Y la disolución de las dolomías de la siguiente forma:



Las reacciones anteriores pueden ser modificadas dependiendo principalmente de la presión parcial de CO_2 en el aire.

Los sistemas de cavernas, los cuales sirven como conductos de agua a presión, tienen su origen como se mencionó anteriormente en la disolución de la roca (Williams, 2008). La petrología, características litológicas y estructurales juegan un papel determinante e influyen de manera importante los sistemas kársticos (Ford and Williams, 2007).

Los sistemas kársticos proveen información importante para los procesos hidrológicos y la estructura de acuíferos, sus características geológicas y espaciales lo hacen vulnerable a las actividades antropogénicas y contaminantes (Musgrove, Stern and Banner, 2010).

2.4 Geología Regional

La Península de Yucatán (PY) corresponde a una región fisiográfica de México denominada Planicie Costera del Golfo de México, ubicada en el sureste del país y en la parte norte de Guatemala y Belice (Fig. 1), es una extensa plataforma carbonatada con un área de superficie aproximada de 165,000 km² (Weidie, 1985). La plataforma de la PY está localizada en los bordes de las placas de Norte América y Caribe y ha sido deformada por una serie de eventos tectónicos a lo largo de su geología histórica (Bauer *et al.*, 2011), alcanzando su posición actual durante el Cretácico tardío-Terciario temprano (Aguayo-Camargo y Cordova, 1987).

De acuerdo con Marton & Buffler (1994) la geología y la posición actual de la PY están estrechamente relacionadas con la apertura del Golfo de México, iniciada a partir de un complejo sistema de rift en su parte central, donde nueva corteza fue generada al separarse la península y la subsecuente formación del Golfo de México, iniciando en el Triásico Superior, con la ruptura del supercontinente Pangea, en la margen sur de la placa de Norteamérica, evento que continuó durante el Jurásico Temprano y Medio ocupando la posición que actualmente tiene (Padilla y Sanchez, **2007**). Durante el Kimmeridgiano, el Bloque Yucatán se desplaza hacia el SE a través de un sistema de fallas dextrales que separaban las plataformas de Yucatán y Florida, propiciando condiciones para la acumulación de carbonatos. En el Tithoniano se depositan las facies de carbonatos arcillosos y en el Cretácico Inferior en aguas más o menos profundas se depositan calizas. Entre el Cretácico Medio y Superior acontece una gran transgresión marina por casi todo México, mientras que en el Bloque Yucateco se depositaba un paquete potente de rocas evaporíticas.

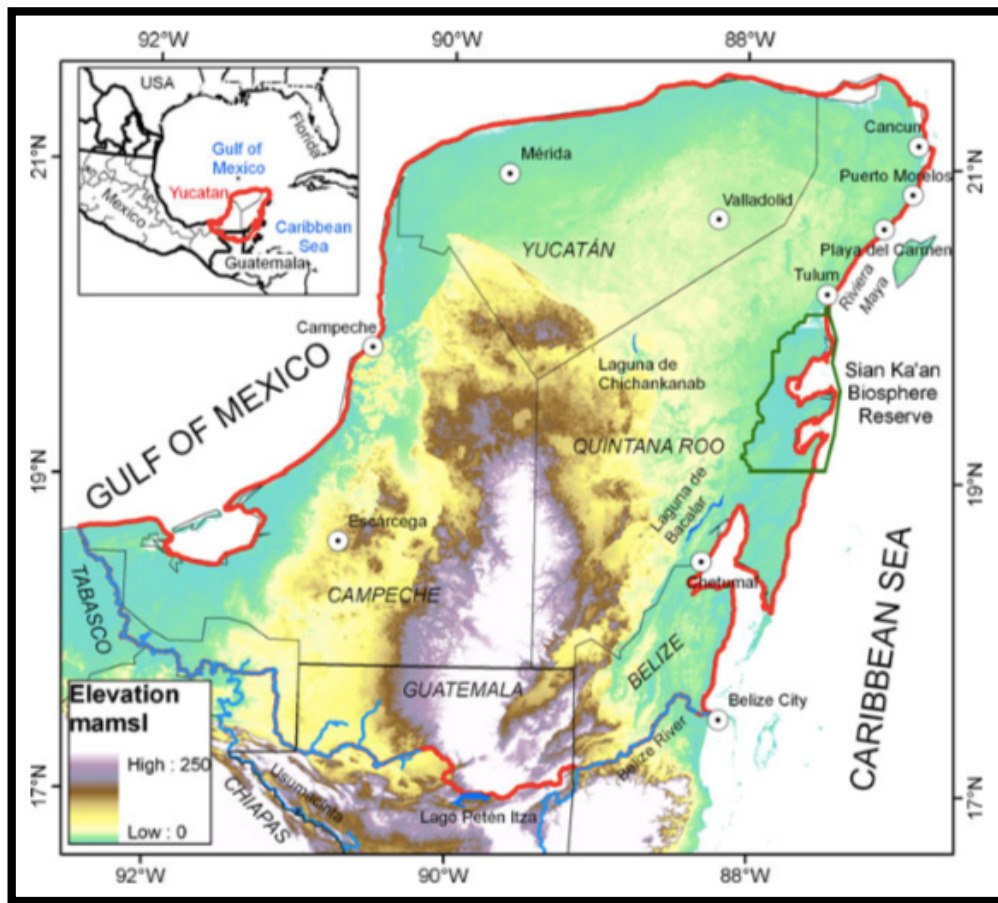


Figura 1. Ubicación geográfica y topografía de la Península de Yucatán, área promedio de 165,000 km² (Modificado de Bauer *et al.*, 2011)

Isphording (1975) dividió la plataforma de la PY en 5 regiones fisiográficas: La zona costera, la planicie costera del noroeste, planicie costera del noreste, la parte central y el bloque de fallas del este. Las distintas regiones se caracterizan por un variado grado de fracturación. Las características regionales estructurales principales son el anillo de cenotes, línea de falla de la Sierrita de Ticul, la zona de fractura de Holbox, bloque de falla Rio Hondo y el Arco de la Libertad.

2.4.1 Estratigrafía

La parte continental de la PY está compuesta mayoritariamente por rocas carbonatadas, las cuales son un tipo de rocas sedimentarias compuestas principalmente

por minerales carbonatados, que constituyen el 25-30% de las rocas sedimentarias de la Tierra (Tarbuck and Lutgens, 2005). En general en la Península, se pueden encontrar rocas aflorando de edades del Cretácico tardío en la parte central de la Península hasta al Holoceno en las costas. La geología en el estado de Quintana Roo está constituida en su mayoría de secuencias carbonatadas de edad terciaria y cuaternaria con bajo grado de deformación tectónica (Morán, 1984) formadas por capas que conservan una actitud horizontal. Las principales rocas carbonatadas o calcáreas en la PY son:

- Caliza (CaCO_3): Formadas principalmente por el mineral calcita.
- Dolomía [$(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$]: Constituidas principalmente por el mineral dolomita, es un carbonato cálcico-magnésico.
- Evaporitas: Rocas formadas por procesos de precipitación química, principalmente por minerales como la halita y el yeso.

Estas rocas carbonatadas y sulfatadas son altamente permeables y solubles por lo que al ser disueltas dejan escaso residuo, razón por la cual se presentan espesores de suelo muy reducidos donde la roca se encuentra prácticamente expuesta y que a su vez resultan en la presencia de un sistema acuífero kárstico maduro con amplias fisuras, fracturas y cuevas (Hausman, 2009). Estos depósitos se encuentran sobre un basamento con distinta variabilidad metamórfica a una profundidad de entre 2,400 y 3,200 metros (Weidie, 1985).

Alvarez, (1954) realizó un estudio de reconocimiento exploratorio en la zona desde Campeche a Rio Hondo, Quintana Roo, con el fin de apreciar posibilidades petroleras por parte de Petróleos Mexicanos (PEMEX), argumentando que las rocas del área eran calizas agrupadas en principalmente cuatro formaciones geológicas (Fm Chichen Itzá,

Fm Bacalar, Fm Estero Franco y Fm Carrillo Puerto).

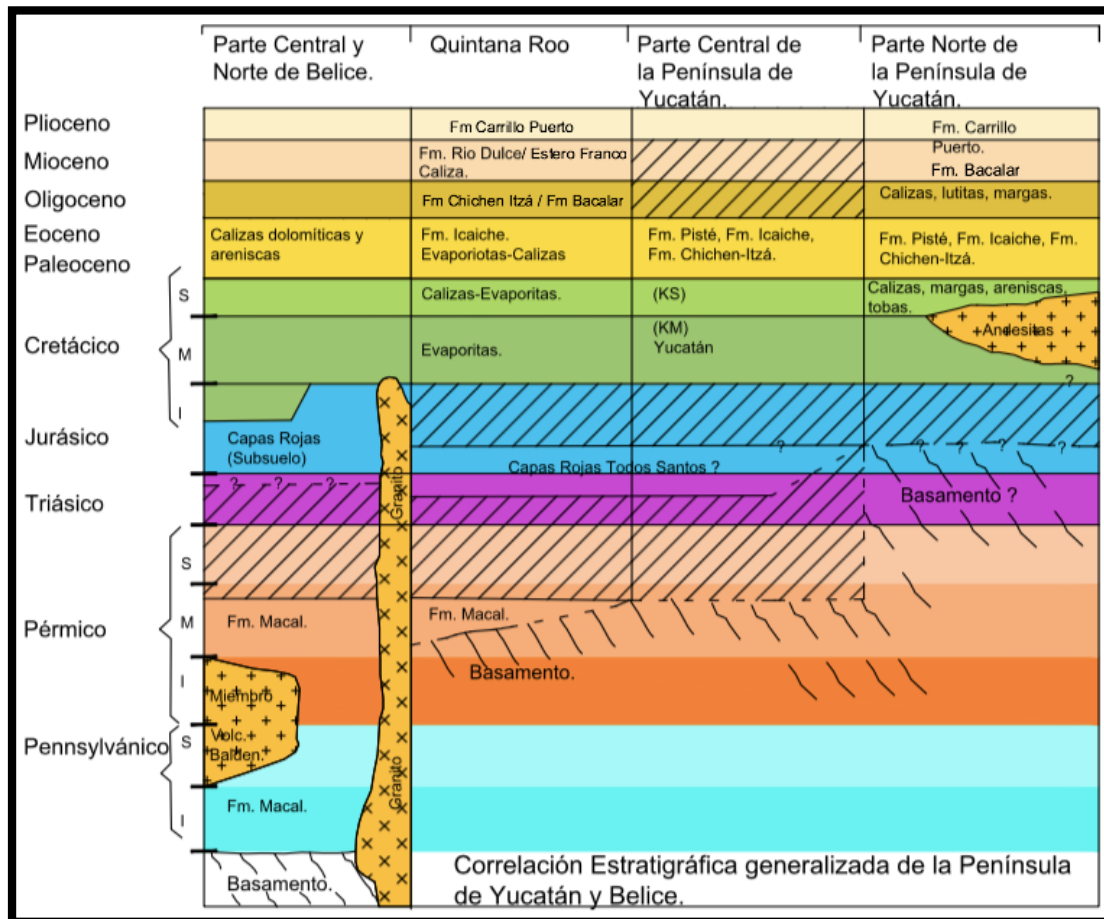


Figura 2. Correlación estratigráfica generalizada de la Península de Yucatán y Belice. (Modificada de López-Ramos 1972)

Alvarez (1954), Butterlin (1958) y López Ramos (1972) coinciden en que las rocas en el estado de Quintana Roo, se constituyen mayoritariamente por rocas del Mioceno, el Servicio Geológico Mexicano (2007), indica que las rocas más jóvenes son de la formación Carrillo Puerto del plioceno y las más antiguas de la formación Icaiché del Paleoceno.

A pesar de que la cubierta de suelo en el estado de Quintana Roo es delgada o ausente y la roca se encuentra prácticamente expuesta, la estratigrafía es pobremente

conocida. Esto se debe al desgaste que ha causado una intensa disolución mineral y recristalización, acompañada de la pérdida de la cubierta de la roca, necesaria para la identificación microfósil (Perry *et al.*, 2009).

La columna estratigráfica del estado de Quintana Roo de acuerdo al SGM se compone de la siguiente manera:

Formación Carrillo Puerto - Rocas más jóvenes de la PY con edad Plioceno – Pleistoceno compuesta principalmente por calizas, coquinas, abundantes gasterópodos y lamelibranquios.

Formación Estero Franco – Rocas del Mioceno – Plioceno compuestas por calizas amarillentas en capas delgadas de calcita recristalizadas y textura rugosa y presencia de cuarzo, se encuentran plegadas.

Formación Bacalar – Rocas del Mioceno, se presentan calizas con intercalaciones de yeso.

Formación Chichen Itzá – Rocas del Eoceno, consisten mayoritariamente de una gran capa de calizas recristalizadas y margas fosilíferas con ligeras variaciones.

Formación Icaiché – Esta formación también ha sido denominada como Xpujil por Alvarez (1954), se compone de rocas calizas del Paleoceno que presentan abundante yeso y fragmentos de sílice.

De acuerdo con datos obtenidos por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2007), estratigráficamente, en la zona sur de Quintana Roo la unidad sedimentaria más antigua corresponde a la Formación Icaiché, la cual es sobreyacida discordantemente por la Formación Estero Franco, la cual cambia de facies lateralmente a la Formación Bacalar, que a su vez es sobreyacida por la Formación Carrillo Puerto de edad Mioceno-Plioceno,

constituida por caliza, boudstone (coquina) y brecha calcárea, cubriendo a la unidad anterior se tienen depósitos lacustres (Qhola) constituidos por sedimentos y fragmentos no consolidados de limo, arena, arcilla, grava y material calcáreo suelto, lodos calcáreos y materia orgánica.

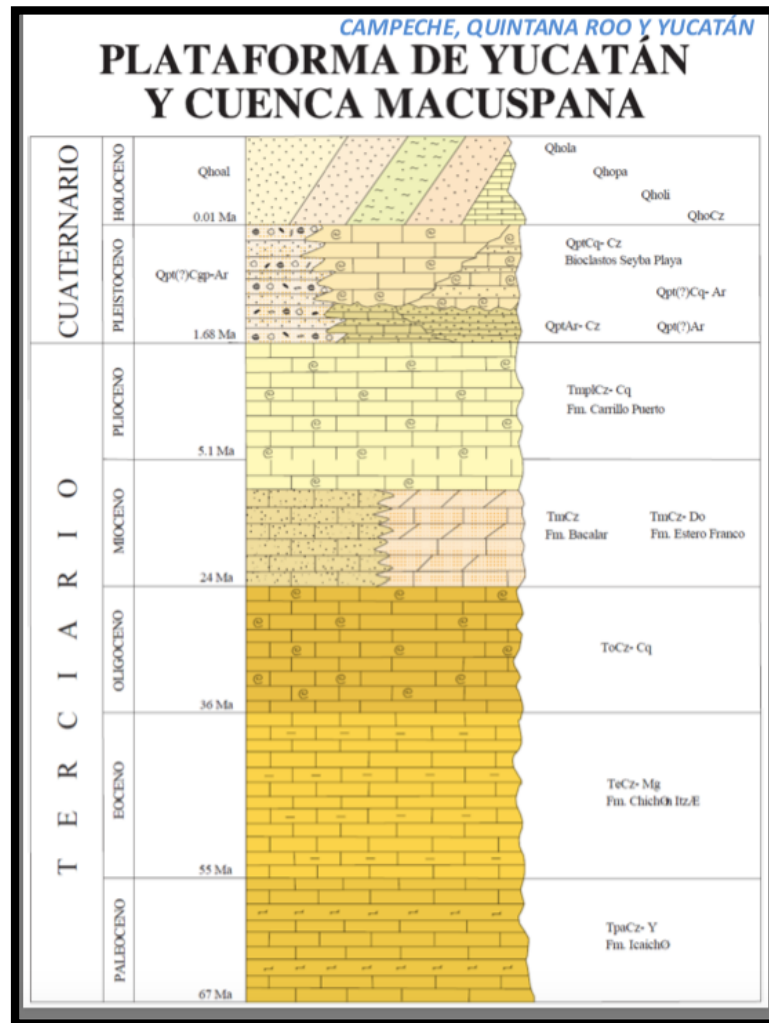


Figura 3. Columna estratigráfica de la Península de Yucatán y Cuenca Macuspana (SGM, 2007).

En la zona norte de Quintana Roo, encontramos las mismas formaciones a excepción de la Formación Bacalar de edad Plioceno – Mioceno intercalada entre las formaciones Estero Franco y la formación Chichen Itzá. Cabe mencionar que no hay evidencias de rocas del oligoceno en el estado de Quintana Roo.

Las unidades que conforman la provincia geológica de la Plataforma de Yucatán, se encuentran prácticamente sin deformación significativa, sin embargo, es posible observar a nivel afloramiento ligeras ondulaciones. Utilizando sensores remotos como la imagen de satélite, modelo digital de elevación e imagen radar, es posible detectar algunos lineamientos que fueron interpretados como posibles fallas normales con dirección NE-SW derivadas de una tectónica distensiva. Desde el Terciario hasta el Holoceno, el nivel del mar ha oscilado varias veces, como consecuencia de ello las facies sedimentarias depositadas varían entre plataforma somera hasta evaporitas restringidas, en ambiente de supramarea. Durante el Pleistoceno y el Holoceno los efectos de una transgresión han dado lugar a depósitos recientes caracterizados por zona de pantanos y de bioclastos derivados de las unidades más antiguas (SGM 2007).

2.5 El sistema hidrológico de la península de Yucatán

El acuífero de la PY es uno de los acuíferos más extensos y espectaculares en el planeta (Bauer *et al.*, 2011) se define como un sistema kárstico maduro (Steinich & Marin 1997). En los primeros cientos de metros consisten en secuencias carbonatadas del Paleogeno y cuaternario sin grandes deformaciones tectónicas (Morán-Zenteno, 1984), éstos suelen tener características complejas como cavernas y cenotes, depresiones cerradas y una porosidad bien desarrollada, como es el caso de las fracturas y el colapso del techo de algunos conductos de disolución los cuales forman dolinas (Ford and Williams, 2007) y son conocidas localmente como “cenotes”.

El fenómeno kárstico en la PY tiene un papel fundamental en los cambios hidrológicos. Smart *et al.*, (2006) sugieren que en la PY la mayor parte del flujo de agua subterránea pasa a través de cavernas antes de llegar a la costa, donde algunas contienen solo agua dulce, otras se componen de agua salada bajo esta y una visible haloclina, obteniendo como resultado agua salobre.

2.5.1 Agua superficial

En el estado de Quintana Roo en las porciones central y norte del mismo es casi nula la presencia de las corrientes hídricas superficiales, debido a la naturaleza calcárea del terreno que presenta una mejor permeabilidad y al relieve del terreno, que es sensiblemente plano (INEGI, 2002). Por otra parte en la porción sur del estado se puede observar un relieve topográfico plano con elevaciones de 0-20 m.s.n.m en la zona costera hasta los 230 m.s.n.m en la zona occidente (Gondwe *et al.*, 2010). En esta zona además se encuentra el Rio Hondo y algunos cuerpos de agua como lagunas cercanas a lo largo de la costa, siendo el principal ejemplo la laguna de Bacalar. Esto debido a sus características geológicas, la ausencia de relieve prominente y de la alta permeabilidad del sustrato geológico, que consiste principalmente de rocas carbonatadas, y del poco espesor del suelo (INEGI, 2002).

2.5.2 Agua subterránea

La ocurrencia de las aguas subterráneas está asociada a las formaciones geológicas más o menos permeables conocidas como acuífero, el cual se define como el medio rocoso en que se mueve el agua subterránea (Werner, 1996) y su movimiento depende de las propiedades físicas de las rocas que lo componen. Su estructura, características y funcionamiento hidrogeológico dependen de la litología de los sedimentos y sustratos de roca involucrados. Habitualmente se distingue en hidrogeología dos tipos de terrenos: a) los terrenos permeables en pequeño, que presentan intersticios y poros en el sustrato rocoso o sedimentos sin consolidar, que contienen el agua como una esponja y b) terrenos permeables en grande, que se presentan en rocas solubles, donde las aguas han disuelto la roca y son almacenadas y circulan a través de fisuras y conductos mayores, formando redes de galerías, cavernas y conductos de agua subterránea (Galán and Herrera, 2017).

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios, alrededor del 37% del volumen total concesionado

para usos consuntivos (30,374 millones de m³ por año al 2013), procede de agua subterránea (CNA, 2014).

La PY debido a las características geológicas mencionadas ha dado lugar a fracturas y estructuras de disolución, que lo hacen un sistema más complejo. Se han realizado diversos estudios a escala regional (Bauer *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2015) para estimar la dirección del flujo a partir de la medición en la carga hidráulica. De manera general, se estima que la dirección del flujo es del interior del continente hacia la costa.

En términos generales, el acuífero está caracterizado por su alta permeabilidad y un bajo gradiente hidráulico (Steinich and Marin, 1997). Los sistemas kársticos son extremadamente vulnerables a la contaminación debido a la rápida infiltración, el rápido flujo a través de los conductos de disolución y a la reducida capacidad de retención de contaminantes en la geología kárstica (Gondwe *et al.*, 2010) y consiste en un lente de agua dulce, el cual yace sobre otro lente de agua salada (Fig. 4).

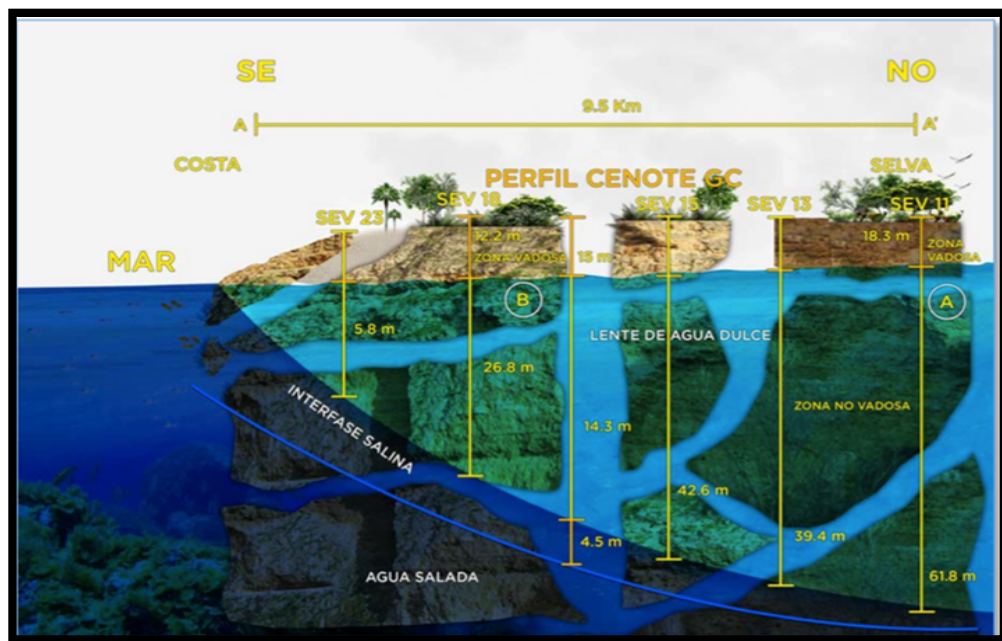


Figura 4. Modelo conceptual del acuífero de la Península de Yucatán (Tomado de López-Tamayo, 2015).

El flujo del agua subterránea de acuerdo con Steinich & Marin (1997) no tiene

correlación necesariamente con la orientación de las características geológicas, además de que el flujo local subterráneo difiere de las direcciones regionales del gradiente hidráulico.

2.5.3 Intrusión salina

En los acuíferos que se encuentran en las islas, penínsulas y otros terrenos continentales cercanos al mar, existen lentes de agua dulce que flotan sobre agua salada, esto es debido a una estratificación que se da por el diferencial en las densidades del agua conocida como intrusión salina (Marín *et al.*, 2005).

De acuerdo con Bauer-Gottwein *et al.*, (2011) en la PY hay muchas zonas del acuífero que están afectadas por la intrusión salina. La intrusión salina en el acuífero kárstico de la PY es extensiva y está presente en más de 100 km de la costa al continente con un espesor que va de los 10 a los 100 m (Perry *et al.*, 2002).

Beddows (2004) propuso la hipótesis de que la circulación de agua salina, donde mencionaba que ocurría en determinado nivel y en una lente continua de agua salina del mar Caribe hasta la costa de la PY en el Golfo de México, la profundidad de la interfase salina mejor conocida como haloclina, ha sido medida en cenotes, pozos y cavernas así como con técnicas no invasivas como sondeos geofísicos. La separación entre el agua dulce y el agua de mar es una separación abrupta, pero en realidad, en vista de que estas dos aguas son miscibles, se forma una zona de dispersión o zona de mezcla (Rivera Medina, 2013).

2.6 Geoquímica del agua subterránea

La composición del agua puede contemplarse desde diferentes puntos de vista: químico, bacteriológico, isotópico, entre otras. La composición química es el conjunto de sustancias, incorporadas al agua por procesos naturales (Porrás Martín *et al.*, 1985) y antropogénicos.

La composición química del agua subterránea se define a través de análisis y se cuantifica por medio de la concentración de los constituyentes analizados. Existen más de 60 constituyentes y propiedades que pueden ser cuantificados en análisis químicos; generalmente se determinan entre 5-10 parámetros fundamentales o según el tipo de estudio (Porras Martín *et al.*, 1985).

La incorporación de los constituyentes al agua varía en concentraciones diferentes, esto es posible debido al alto poder disolvente y las propiedades de combinación con otros elementos. La incorporación de sustancias al agua comienza incluso antes de incorporarse al flujo subterráneo. Gases, aerosoles, polvo, nutrientes presentes en la atmósfera y suelo y estos a su vez se pueden integrar a través de infiltración (Jenkins & Snoeyink, 1999).

Los procesos hidrogeoquímicos, ayudan a obtener una visión de la distribución y origen del agua subterránea, la interacción agua-roca, las mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos), los fenómenos de intrusión salina y las influencias antropogénicas sobre la calidad del agua subterránea (Pernía *et al.*, 1993).

El tipo de flujo tiene una notable trascendencia en la mineralización del agua subterránea. Aguas con largos recorridos suelen presentar, en igualdad de circunstancias, una mayor mineralización que aguas de corta circulación. Aguas recogidas en la zona de recarga de un acuífero suelen tener menos sólidos disueltos que un agua de circulación profunda y menos, también que el agua de descarga del mismo acuífero. Una vez incorporados los constituyentes al agua subterránea ésta adquiere una configuración composicional determinada que, sin embargo, no se mantiene invariable durante el recorrido del agua. El grado de modificación de la composición depende del tipo e intensidad de los procesos a que el agua esté sometida, de la posible simultaneidad de los mismos y más frecuentemente del orden de actuación de aquéllos en el espacio y en el tiempo (Porras Martín *et al.*, 1985).

El estudio en la variación en la evolución geoquímica de agua subterránea con diferente composición en un ambiente dado tiene que ver con sus reacciones y/o mezclas en este. Las reacciones geoquímicas explican la ganancia o pérdida de constituyentes, los cambios, asociaciones o mezclas en un ambiente (Frape and Fritz, 1984). Las características físicas y químicas del agua subterránea están determinadas por la composición química y mineral del acuífero, por los procesos geoquímicos dominantes, el tiempo de residencia, entre otros factores y al flujo subterráneo, como la conductividad, la superficie específica de la interface agua roca y el flujo regional (Moral, Cruz-Sanjulian and Olías, 2008).

En la PY, la geoquímica ha sido utilizada para inferir patrones de flujo y mecanismos de recarga (Bauer *et al.*, 2011). Back & Hanshaw (1970), realizaron una comparación hidrogeoquímica entre la PY y la Península de Florida, debido a las similitudes existentes, caracterizando el agua subterránea de la PY, dominada por una mezcla entre agua dulce y agua salada y con ausencia de gradientes de flujo y posteriormente analizaron el proceso de disolución en la porción norte de la PY, concluyendo que la mezcla de calcita en agua dulce y agua salada produce salmuera y este fenómeno puede causar altas tasas de disolución en la zona de mezcla de agua dulce y salada.

Por su parte Stoessell *et al.*, (1989) y Moore *et al.*, (1992) realizaron estudios químicos del agua en la parte salina de una zona de mezcla, estos trabajos evidenciaron una correlación de la profundidad de las cavernas y la profundidad de la haloclina e indicaron la importancia de la disolución de carbonatos en la geomorfología de la PY.

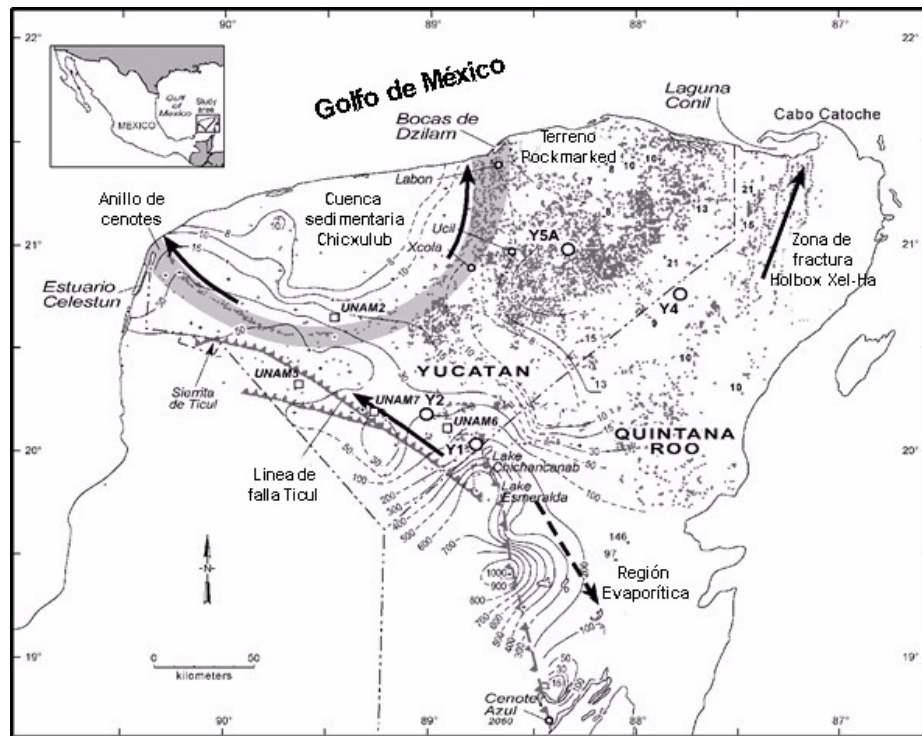


Figura 5. Áreas hidrogeoquímicas de la Plataforma de Yucatán, tomando en cuenta la tectónica, patrones de sedimentación, erosión y lluvia, así como el tipo de roca. (Tomado de Perry *et al.*, 2002).

Perry *et al.*, (2002) identificaron seis distintas regiones hidrogeoquímicas/fisiográficas (Fig. 5) desarrolladas en las rocas carbonatadas, tomando en cuenta la tectónica, tasas de erosión y sedimentación, los índices de lluvia y tipos de roca, las seis regiones son: Cuenca sedimentaria de Chixculub, Anillo de cenotes, Terreno Pockmarked, Falla Sierrita de Ticul, Sistema de fallas Holbox - Xel Ha y la Región Evaporítica. Perry *et al.*, (2009) argumentan que grandes áreas de Yucatán y Quintana Roo yacen sobre un complejo rocoso formado por evaporitas y ejecta del cráter de Chixchulub lo cual ha dado las condiciones para un flujo subterráneo además sobre la interacción de agua-roca relacionando el contacto con la capa de sedimento del impacto del cráter de Chixchulub, esta firma geoquímica puede ser usada para el rastreo de flujo de agua subterránea y composición del acuífero a una escala regional en la PY.

Gondwe *et al.*, (2010) reportaron que en base a sus observaciones a los niveles de agua y estudios geoquímicos existen cambios hidrogeológicos relacionados con la

topografía y la edad de los sedimentos expuestos en superficie. También se hace mención de las elevaciones del nivel estático del agua de cuatro hasta 260 m.s.n.m., con cambios abruptos en el nivel de agua en algunas localidades y donde se ha reportado el fenómeno de artesianismo. Asimismo, se alude la importancia de las estructuras de alta permeabilidad en la PY como la Zona de fracturas de Holbox, la cual influye en el flujo de agua subterránea a causa de transmitirla a grandes velocidades.

Recientemente, con el fin de identificar los procesos que controlan la evolución geoquímica de las aguas subterráneas en la zona sur del estado de Quintana Roo, Sánchez-Sánchez *et al.*, (2015) realizaron métodos estadísticos descriptivos y análisis geoquímicos a través del diagrama de Piper (Fig. 6) donde observaron seis tipos de aguas predominantes en el área de estudio, 1) Tipo cálcica bicarbonatada, 2) sódica clorurada, 3) mixta cálcica-sódica-bicarbonatada, 4) mixta cálcica-magnésica clorurada, 5) cálcica sulfatada y 6) sódica bicarbonatada además definieron que los parámetros indican que los procesos hidrogeoquímicos dominantes son (1) la disolución de calizas y dolomías y el intercambio iónico; (2) la mezcla con agua marina y (3) el aporte de nutrientes por actividades humanas.

Saint Loup *et al.*, (2018) indican que el área de Tulum pareciera ser menos permeable y probablemente menos karstificada que los alrededores debido a que la mezcla con agua marina es menor que en otros sitios cercanos a una distancia similar a la costa.

Dos tendencias se pueden observar: las muestras del mar Caribe, norias y cenotes contienen principalmente sodio y cloro mientras que las muestras de los pozos corresponden a calcio y bicarbonatos. Las posiciones de los pozos indican que son menos influenciados por agua salada que los cenotes, esto puede ser explicado por el hecho que los pozos fueron excavados en una matriz calcárea con una conductividad hidráulica menor que la de los conductos que proveen una mejor conexión con el mar.

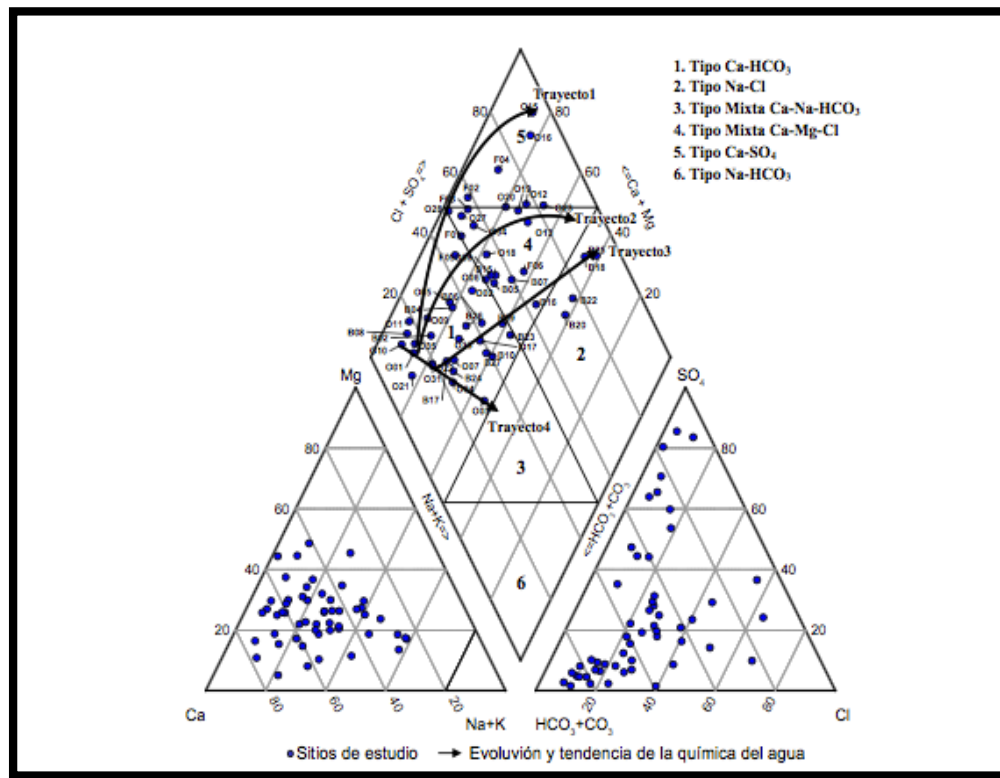


Figura 6. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea del trabajo de Sánchez-Sánchez *et al.*, 2015. La nomenclatura que acompaña a los puntos en azul dentro del rombo central indica los sitios de muestreo. Las flechas indican la evolución y tendencia de la química del agua.

3. JUSTIFICACIÓN

El análisis de la composición química del agua subterránea, permitirá identificar un panorama geoquímico de la parte este estado de Quintana Roo, lo cual aportará información relevante sobre las características del recurso hídrico y permitirá un mejor entendimiento de la relación entre el agua y el medio geológico en esta porción del estado.

4. HIPÓTESIS

Dadas las características de las rocas carbonatadas en el estado de Quintana Roo y a la extensiva intrusión salina en la costa este, se espera que el tipo de agua predominante sea de tipo “cálcica-corurada” debido a la mezcla entre agua dulce - agua de mar y a la interacción de esta con el medio geológico.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Clasificar geoquímicamente las muestras de agua subterránea del este de Quintana Roo e identificar los factores y condiciones que modifican la configuración química.

5.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la composición química del agua subterránea en tres zonas del este de Quintana Roo.
2. Clasificar los resultados geoquímicos obtenidos por iones dominantes.
3. Representar en un sistema de información geográfica (SIG) la disposición espacial de los elementos presentes en el agua subterránea mediante diagramas de Stiff.
4. Identificar tipos de agua mediante diagramas de Piper.
5. Establecer índices de saturación del agua y relacionarlos con la geología local.

6. METODOLOGÍA

6.1 Área de estudio

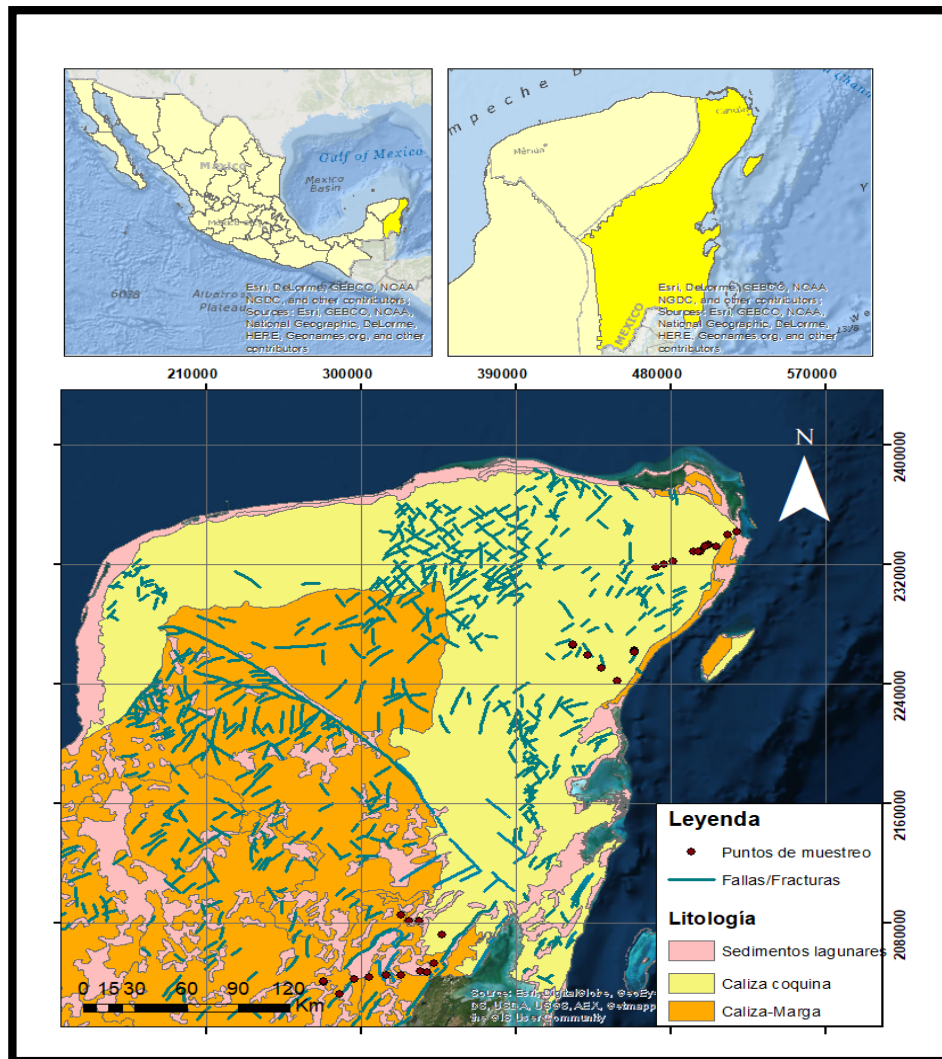


Figura 7. Ubicación geográfica del área de estudio, este del estado de Quintana Roo se observa tipo de roca, geología estructural y puntos de muestreo.

El área de estudio se encuentra en el estado de Quintana Roo, ubicado en el extremo este del país, territorialmente junto con Yucatán y Campeche forman la Península de Yucatán. El estado de Quintana Roo tiene sus límites naturales y

geoestadísticos entre longitud $17^{\circ} 54'$ y $21^{\circ} 36'$ de latitud norte y entre los meridianos latitud $86^{\circ} 45'$ y $89^{\circ} 10'$ de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

6.2 Selección de sitios y colecta de muestras

Se seleccionaron tres transectos que cubren la porción este del estado de Quintana Roo, a estos se les asignó el nombre de las localidades donde se ubican: Puerto Morelos-Cancún (transecto de 52 km), Cobá-Tulum (transecto de 36 km) y Bacalar-Chetumal (transecto de 66 km), donde se seleccionaron de 10 a 12 muestras por transecto. Los sitios de muestreo fueron principalmente pozos de abastecimiento, norias y cenotes. Todos los puntos fueron espacialmente ubicados mediante un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) Garmin ® 20, utilizando como datum el WGS84 y el sistema de coordenadas UTM (Tabla 1).

La colecta de muestras de agua subterránea se realizó durante los meses de marzo, abril, mayo y junio donde se colectaron las muestras de agua en pozos y cenotes obteniendo un volumen de 500 ml por cada sitio muestreado para los análisis de alcalinidad, cationes y aniones. Cada muestra de agua se almacenó en botellas de polietileno de alta densidad de 500 ml (Nalgene ®).

Las botellas de polietileno que contenían las muestras de agua colectadas fueron almacenadas frías en contenedores con hielo para su transporte al laboratorio. Ahí las muestras se preservaron a una temperatura inferior a los 4.0°C hasta su posterior análisis en laboratorio. Las muestras fueron filtradas utilizando filtros de $0.45\ \mu\text{m}$ de abertura de poro, donde el volumen de agua paso a través de una bomba peristáltica y finalmente colocando el contenido en botellas de polietileno de alta densidad (Nalgene ®) de 250.0 ml para el análisis de alcalinidad, 125.0 ml para análisis de cationes y 125.0 ml para análisis de aniones.

Tabla 1. Información general de los puntos de muestreo

Clave	Sitio	Zona	Tipo	Latitud	Longitud	m.s.n.m
B01	Sevilla	Sur	Pozo	323258.80 E	2085222.45 N	63
B02	Reforma	Sur	Pozo	334296.23 E	2081292.08 N	26
B03	El Mezcal	Sur	Pozo	328099.72 E	2081250.81 N	30
B04	Bacalar 1	Sur	Pozo	347352.23 E	2072336.10 N	30
B05	Xul-Ha	Sur	Pozo	342884.93 E	2053156.18 N	32
O01	Caobas	Sur	Pozo	278306.73 E	2040200.67 N	148
O03	San José de la Montaña	Sur	Pozo	287580.04 E	2032367.28 N	142
O04	Nicolás Bravo	Sur	Pozo	296141.25 E	2042508.45 N	102
O05	Francisco Villa	Sur	Pozo	305020.45 E	2043900.95 N	74
O06	Ñachi Ocom	Sur	Pozo	314951.81 E	2045059.66 N	67
O07	Jesús Gzz Ortega	Sur	Pozo	323193.26 E	2044803.14 N	35
O08	Sergio Butrón Casas	Sur	Pozo	334490.43 E	2047373.85 N	35
O09	Ucum	Sur	Pozo	338940.88 E	2046889.59 N	36
T01	Uxuxubi norte	Centro	Noria	459013.50 E	2262420.00 N	8
T02	Uxuxubi cocina	Centro	Noria	458989.21 E	2261958.94 N	3
T03	Turquesa	Centro	Cenote	458891.40 E	2262248.14 N	7
T05	Sarahí	Centro	Noria	459185.41 E	2261614.17 N	12
T06	Balam	Centro	Cenote	459256.69 E	2261128.29 N	19
T08	Cobá	Centro	Pozo	423417.61 E	2266437.55 N	21
T09	Macario Gómez	Centro	Pozo	439777.01 E	2250456.87 N	25
T10	Manuel Antonio Ay	Centro	Pozo	431867.13 E	2259115.75 N	22
T11	Car wash	Centro	Cenote	449208.91 E	2241914.12 N	10
P01	Leona	Norte	Cenote	471543.19 E	2317958.91 N	10
P03	Pozo 1	Norte	Pozo	476345.23 E	2320041.18 N	12
P04	Vivero Ixora	Norte	Pozo	481775.34 E	2322180.76 N	10
C01	Pozo 8	Norte	Pozo	493331.34 E	2328336.67 N	17
C02	Pozo 16	Norte	Pozo	500577.45 E	2332260.28 N	14
C03	Tres Reyes	Norte	Noria	506432.39 E	2331816.43 N	13
C04	Iglesia	Norte	Cenote	513427.46 E	2339663.12 N	9
C05	UCIA	Norte	Pozo	518566.35 E	2341517.34 N	5
C06	ZC1R2P4	Norte	Pozo	497362.40 E	2328692.93 N	18
C07	ZC1R2P6	Norte	Pozo	495864.69 E	2328693.24 N	15
C08	ZC5P7	Norte	Pozo	501984.79 E	2332958.79 N	14
C09	ZC5P9	Norte	Pozo	501118.04 E	2332490.88 N	13
C10	ZC5P11	Norte	Pozo	500147.08 E	2331974.99 N	12

Los parámetros físico-químicos del agua (temperatura, pH, conductividad, sólidos totales disueltos), fueron medidos *in situ* utilizando una sonda multiparamétrica de campo marca Conductronic ®. Estos parámetros fueron tomados inmediatamente después de haber realizado la colecta de la muestra de agua subterránea en el caso de pozos después de haber bombeado el agua para evitar residuos, mientras que para el caso de cenotes de tipo cerrado las muestras fueron tomadas en la parte central del cuerpo de agua.

6.3 Caracterización de las muestras de agua

6.3.1 Cromatografía Iónica

Es un método que permite la separación de moléculas basada en sus propiedades de carga eléctrica. El principio básico de la cromatografía de intercambio iónico es que las moléculas cargadas se adhieren a los intercambiadores de forma reversible de modo que dichas moléculas pueden ser asociadas o disociadas cambiando el ambiente iónico.

La determinación de cationes (Ca^{2+} , Na^{+} , Mg^{2+} , K^{+}) y aniones (NO_3 , Cl^{-} , SO_4^{2-}) se realizó con un cromatógrafo de iones 882 Compact IC Plus de Metrohm® en la Unidad de Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

La técnica de cromatografía iónica consistió en utilizar una fase estacionaria y una fase móvil, para el análisis de aniones, como medio móvil se utilizó una solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) con bicarbonato de sodio (NaHCO_3) a una concentración de 1.8 mM y 1.7 mM, respectivamente, mientras que para el análisis de cationes se utilizó una solución de ácido nítrico (HNO_3) con una concentración de 2.7 mM la cual fue preparada a partir de ácido nítrico concentrado ultrapuro. Para este método se utilizaron 10.0 ml de cada muestra.

6.3.2 Alcalinidad – Método de Gran

La alcalinidad es una propiedad muy importante y de los valores que mayor sufren alteraciones. La determinación de la alcalinidad se realizó en laboratorio, por medio de la titulación de la muestra por el método de Gran, cuyo principio consiste en que pasado el punto en que se ha convertido el total de HCO_3 a H_2CO_3 la concentración de protones incrementa linealmente por la cantidad de protones añadidos. Para esto se utilizó un titulador marca Hach modelo AL-DT con un rango de medición de alcalinidad de 10 a 4000 mg/L. El equipo consiste en una pistola graduada y ampolletas ácido sulfúrico 0.16 N a un volumen determinado de agua, realizar mediciones de pH conforme se agrega el ácido hasta la neutralización y posteriormente realizar una regresión lineal para determinar los parámetros que definen el comportamiento de los datos y así obtener las medidas de alcalinidad como bicarbonato $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ expresada en meq/L equivalente a la alcalinidad determinada.

6.4 Análisis de datos

6.4.1 Iones dominantes

La clasificación por iones dominantes está basada de acuerdo con la clasificación de Custodio & Llamas (1976) la cual consiste en nombrar por el anión o catión que sobrepasa el 50% al realizar la suma de cada grupo, esta nos permite reconocer el carácter geoquímico por sitio muestreado.

6.4.2 Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff consisten en semirrectas convergentes o paralelas a cada ion con sus extremos unidos resultando así un polígono; sobre cada semirrecta se toma un solo ion o bien un catión y un anión simultáneamente, permitiendo apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas y las variaciones de las relaciones entre cationes o entre aniones. La forma de la figura resultante da idea del tipo de agua, pueden compararse y ser utilizados en mapas hidroquímicos (Custodio and Llamas, 1976). Los

diagramas se obtendrán utilizando el software libre Diagrammes: Logiciel d'hydrochimie Versión 6.57. Estos diagramas fueron visualizados de manera espacial en las diferentes zonas del este de Quintana Roo utilizando el software ArcGIS Versión 10.4.1.

6.4.3 Diagrama de Piper

Con el objetivo de identificar los procesos que determinan la composición química del agua, se utilizó el diagrama de Piper. Este diagrama consiste en dos triángulos equiláteros en los cuales se representan los cationes y, por otra parte, los aniones, los cuales se complementan con una figura romboidal ubicada entre la porción superior de los de los triángulos (Appelo and Postma, 2005).

Los tres campos tienen escalas de lectura en porcentaje. En el campo triangular izquierdo se grafica el porcentaje de los valores de los tres grupos de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) como un punto singular acorde a sus coordenadas trilineares. De forma similar, en el campo triangular derecho, se grafican como un punto singular el grupo de los aniones (HCO_3^{-} , SO_4^{2-} y Cl^{-}). El diamante central es usado para mostrar todo el carácter químico del agua subterránea como un tercer punto, el cual representa la intersección de los puntos graficados en los campos triangular derecho e izquierdo (Güler *et al.*, 2012).

Este diagrama permite representar a un mismo tiempo varias muestras y por consiguiente facilita la comparación de sus calidades químicas basadas en los iones predominantes, por lo tanto, aguas del mismo tipo aparecerán en el diagrama formando agrupamientos de puntos.

El diagrama de Piper se obtuvo a partir de la utilización del software libre Diagrammes: Logiciel d'hydrochimie Versión 6.57, con esta herramienta se realizó la identificación de los procesos que determinan la composición química del agua.

6.4.4 Índices de Saturación

Para estimar los índices de saturación se utilizó el software libre PHREEQC del

USGS. A partir de los resultados de cationes y aniones. En este estudio se observaron los índices de saturación para los minerales: calcita (CaCO_3), aragonita (CaCO_3), anhidrita (CaSO_4), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), halita (NaCl) y silvita (KCl), para las tres zonas del área de estudio. A través de este análisis se puede conocer si los minerales están en equilibrio con el medio ($\text{SI}=0$), sobresaturados ($\text{SI}>0$) lo que podría generar la precipitación del mineral, y por último, permite saber si el mineral está en disolución ($\text{SI}<0$) (Appelo and Postma, 2005)

6.4.5 *Análisis de similitud en porcentaje (SIMPER)*

El análisis de similitud en porcentaje es utilizado para obtener los valores promedio de similitud entre grupos. Es decir, en este estudio se obtendrán los valores por los cuales las variables aportan a la formación de distintos grupos y sirven como confrontación con otras técnicas de agrupación. Este análisis se obtendrá a través del software PRIMER v6.

6.4.6 *Análisis de conglomerados*

El análisis clúster tiene por objetivo la búsqueda de grupos similares de casos o variables, los que se van agrupando en conglomerados. Se utilizaron los resultados de los transectos para encontrar similitudes y diferencias entre las diferentes zonas del área de estudio. Los distintos grupos de variables o casos creados se representan en gráficos llamados dendogramas, que permiten analizar, describir e interpretar las observaciones multidimensionales entre grupos que están más relacionados entre sí y cuales tienen muy poca o ninguna relación. Para medir la distancia entre las observaciones en el estudio de conglomerados se utilizó el cuadrado de la distancia euclidiana.

6.4.7 *Escalonamiento multidimensional*

La técnica de escalonamiento multidimensional (MDS) se utilizó para observar representaciones geométricas de agrupamientos con las distintas variables en las tres zonas del estudio de modo que sus posiciones casi ajusten a las similitudes originales. La representación de las dimensiones a las similitudes originales se denomina stress. Se

buscan representaciones geométricas en las cuales el “stress” sea mínimo. Empíricamente, se considera que si el stress es alrededor de 0.2, la bondad del ajuste es pobre; si es del 0.05, la bondad del ajuste es buena y a partir de 0.025 es excelente.

7. RESULTADOS

7.1 Parámetros físico-químicos del agua

Un total de 35 muestras de agua subterránea fueron colectadas de pozos de abastecimiento, pozos de aprovechamiento rural y cenotes, distribuidos en tres zonas en el este de Quintana Roo, México.

Desde la perspectiva geoquímica la temperatura entre zonas presenta una variación ligera entre 1 y 2 °C, la zona sur se mantiene entre un máximo de 28.8 °C y mínimo de 26.1, mientras que en la zona centro entre 28.3 °C y 26.9 °C, por último la zona norte tiene un máximo de 28.4 °C y un mínimo de 25.4 °C, siendo esta zona la que tiene una mayor variación respecto a las otras (Fig. 8).

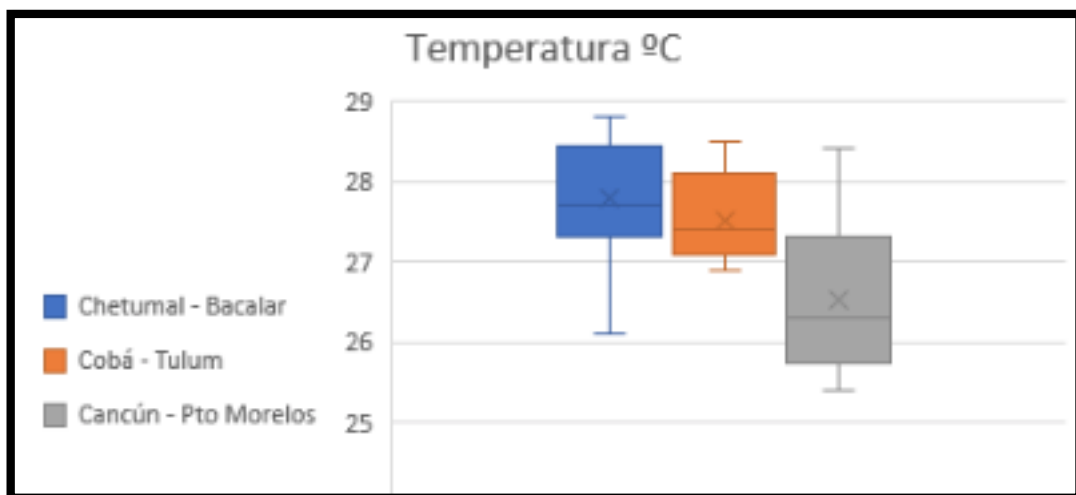


Figura 8. Gráfica de temperatura de las tres zonas del área de estudio.

Los valores de conductividad para la zona sur tienen como mínimo 0.91 y máximo 1.87 (ms/cm), la zona centro 0.83 y 2.1 (ms/cm) mientras que la zona norte presenta un mínimo de 0.47 y máximo de 1.40 (ms/cm) (Fig. 9).

El pH en la zona sur y centro se comporta de manera similar teniendo máximos de 8.01 y 8.0 y mínimos de 7.09 y 7.18 respectivamente, sin embargo, en la zona norte presenta un máximo de 7.34 y mínimo de 6.24 (Fig. 10)

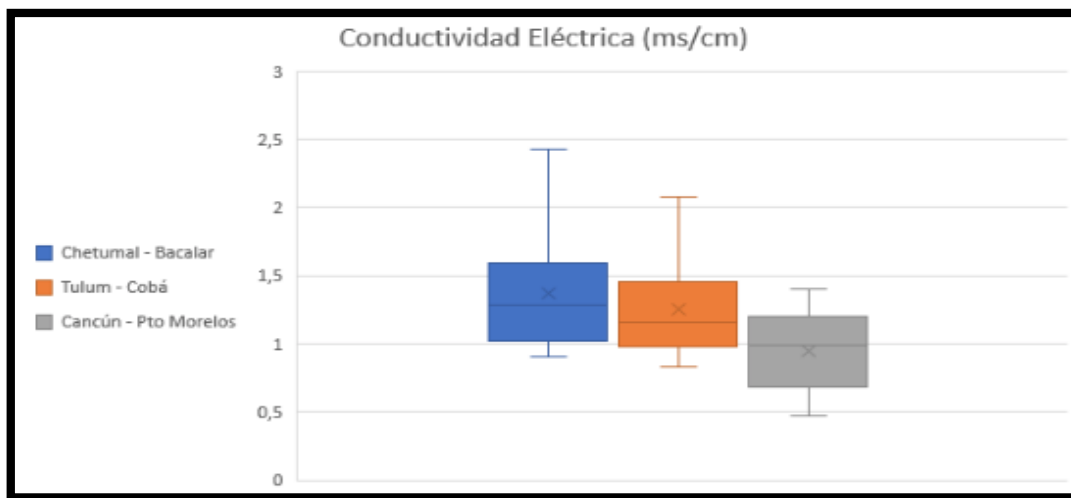


Figura 9. Gráfica de conductividad eléctrica de las tres zonas del área de estudio.

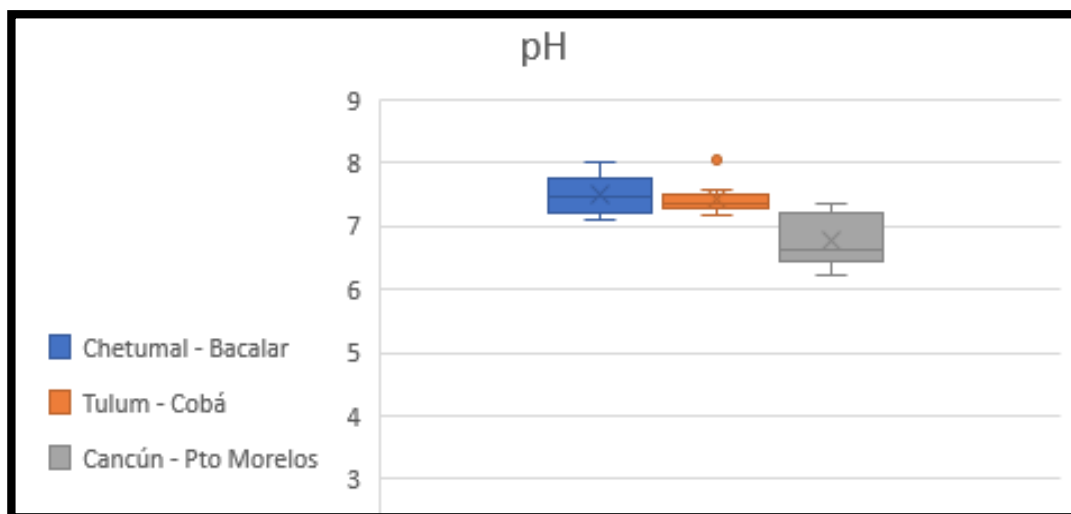


Figura 10. Gráfica de pH de las tres zonas del área de estudio.

7.2 Caracterización geoquímica del agua subterránea

Tabla 2. Aniones y cationes (meq/L) de las muestras de agua.

Clave	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	BI
B01	3.47	2.66	3.89	0.09	0.64	2.27	0.18	7.25	-0.98
B02	1.10	0.23	0.47	0.09	0.10	0.20	0.00	1.75	-3.55
B03	7.00	2.21	2.45	0.05	1.61	4.57	0.22	7.09	-7.06
B04	20.80	4.77	3.55	0.08	20.83	4.71	0.10	6.34	-4.56
B05	20.00	3.44	4	0.06	15.46	2.89	0.06	7.63	2.74
O01	7.05	3.47	1.88	0.04	7.00	2.13	0.10	4.92	-6.62
O03	4.85	1.50	2.09	0.08	1.57	2.49	0.04	5.69	-7.00
O04	4.98	1.11	2.22	0.09	1.46	2.00	0.42	6.14	-8.79
O05	6.20	2.29	1.16	0.02	1.08	2.10	0.20	7.28	-4.71
O06	9.35	3.85	1.93	0.03	10.00	1.51	0.09	6.04	-7.37
O07	9.15	6.00	1.48	0.04	10.8	1.35	0.00	5.94	-4.16
O08	9.65	6.14	4.04	0.12	4.96	3.03	0.71	8.56	7.13
O09	9.55	4.03	1.83	0.04	9.50	1.11	0.16	6.84	-6.34
T01	8.35	2.50	6.60	0.11	1.91	12.00	0.10	6.79	-8.52
T02	8.10	2.80	7.20	0.12	1.96	12.46	0.11	6.56	-7.35
T03	8.35	3.10	8.10	0.15	1.88	12.86	0.12	3.55	3.41
T05	4.80	1.20	3.40	0.05	0.92	5.40	0.14	4.81	-8.52
T06	7.90	3.00	7.30	0.12	1.77	12.54	0.13	6.55	-6.55
T08	8.65	2.20	3.50	0.04	0.92	6.51	0.17	7.71	-3.09
T09	8.50	2.60	4.70	0.06	1.29	9.00	0.18	7.35	-5.66
T10	8.15	2.10	3.50	0.03	0.94	7.54	0.16	7.48	-7.72
T11	6.05	4.10	11.90	0.20	3.63	15.00	0.16	7.13	-7.50
P01	3.57	1.58	0.84	0.03	0.23	1.70	0.00	3.70	3.24
P03	5.00	2.52	1.48	0.02	0.37	2.86	0.00	4.67	7.02
P04	6.85	3.43	4.00	0.07	1.05	7.77	0.03	4.69	2.91
C01	6.60	2.46	3.76	0.08	1.17	7.31	0.06	4.39	-0.12
C02	5.65	2.40	4.21	0.11	1.43	7.71	0.08	5.15	-7.43
C03	5.20	0.60	1.20	0.03	0.98	1.45	0.15	4.56	-0.73
C04	6.80	2.78	5.70	0.49	0.89	9.97	0.00	7.11	-6.50
C05	4.37	0.80	0.57	0.09	1.24	0.29	0.21	3.04	9.92
C06	7.75	2.83	2.62	0.08	1.06	9.11	0.07	5.72	-5.58
C07	9.15	3.15	1.81	0.06	1.14	4.86	0.05	6.36	6.62
C08	3.81	1.79	6.17	0.09	1.04	7.74	0.05	6.33	-12.1
C09	3.17	1.52	8.57	0.06	1.85	8.40	0.14	5.90	-10.0
C10	5.15	1.95	4.02	0.08	1.15	6.54	0.07	5.75	-10.1

Zona sur (B01-O09), zona centro (T01-T11) y zona norte (P01-C10). Composición química en meq/L; BI: Balance iónico.

7.3 Iones dominantes

En base a la clasificación por iones dominantes se identificaron grupos en las distintas zonas de trabajo, en la zona sur se encontraron cinco muestras cálcica bicarbonatada, cinco cálcica sulfatada y tres mezclas. En la zona centro el 90% de las muestras presentan cloruro como ion dominante y diferentes combinaciones: clorurada cálcica, clorurada sódica, clorurada – cálcica sódica y cálcica clorurada, además de una muestra que se identificó como cálcica bicarbonatada. Por su parte en la zona norte se identificaron cinco muestras clasificadas como clorurada cálcica, tres cálcica bicarbonatada, dos bicarbonatada cálcica y dos sódica clorurada. Los resultados de la clasificación de iones dominantes para cada sitio se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3. Valores promedio, máximos y mínimos por zona de las variables fisicoquímicas.

Zona		T	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
Zona Norte	PROM	26.5	6.77	0.95	5.62	2.14	3.53	0.10	1.05	5.82	0.07	5.18
	MAX	28.4	7.34	1.40	9.15	3.43	8.57	0.49	1.85	9.97	0.21	7.11
	MIN	25.4	6.24	0.47	3.17	0.60	0.57	0.02	1.23	0.29	0.00	3.04
Zona Centro	PROM	27.34	7.43	1.29	7.65	2.62	6.24	0.10	1.69	10.37	0.14	6.44
	MAX	28.30	8.04	2.08	8.65	4.10	11.90	0.20	3.63	15.00	0.18	7.71
	MIN	26.90	7.18	0.83	4.80	1.20	3.40	0.03	0.92	5.40	0.10	3.55
Zona Sur	PROM	27.83	7.49	1.29	8.70	3.21	2.38	0.06	6.54	2.34	0.18	6.27
	MAX	28.80	8.01	1.87	20.80	6.14	4.04	0.12	20.83	4.71	0.71	8.56
	MIN	26.10	7.09	0.91	1.10	0.23	0.47	0.02	0.10	0.20	0.00	1.75

Tabla 4. Resultado de la clasificación por iones dominantes

Sitio	Clasificación	Sitio	Clasificación
B01	Bicarbonatada – Sódica cálcica	T06	Clorurada cálcica
B02	Bicarbonatada cálcica	T08	Cálcica bicarbonatada
B03	Cálcica bicarbonatada	T09	Cálcica clorurada
B04	Cálcica sulfatada	T10	Cálcica – Clorurada bicarbonatada
B05	Cálcica sulfatada	T11	Clorurada sódica
O01	Cálcica – Sulfatada bicarbonatada	P01	Bicarbonatada cálcica
O04	Cálcica bicarbonatada	P03	Bicarbonatada cálcica
O04	Cálcica bicarbonatada	P04	Clorurada cálcica
O05	Cálcica bicarbonatada	C01	Clorurada cálcica
O06	Cálcica sulfatada	C02	Clorurada cálcica
O07	Cálcica sulfatada	C03	Cálcica bicarbonatada
O08	Bicarbonatada – Cálcica	C04	Clorurada cálcica
O09	Cálcica sulfatada	C05	Cálcica bicarbonatada
T01	Clorurada Cálcica	C06	Clorurada cálcica
T02	Clorurada – Cálcica sódica	C07	Cálcica bicarbonatada
T03	Clorurada – Cálcica sódica	C08	Sódica clorurada
T05	Cálcica clorurada	C09	Sódica clorurada
		C10	Clorurada – Cálcica sódica

Zona sur (B01-O09), zona centro (T01-T11) y zona norte (P01-C10).

7.4 Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff funcionaron como clasificación adicional para los resultados mediante iones dominantes.

En la zona sur (Fig. 11) se observaron tipos de agua relativamente equilibradas en cuanto en la proporción de elementos, se identificaron tres grupos principales, aquellos con tipo de agua cálcica – sulfatada, un segundo grupo con cálcica – bicarbonatada y un tercero con los mismos iones dominantes, pero variaciones en cuanto a su porcentaje.

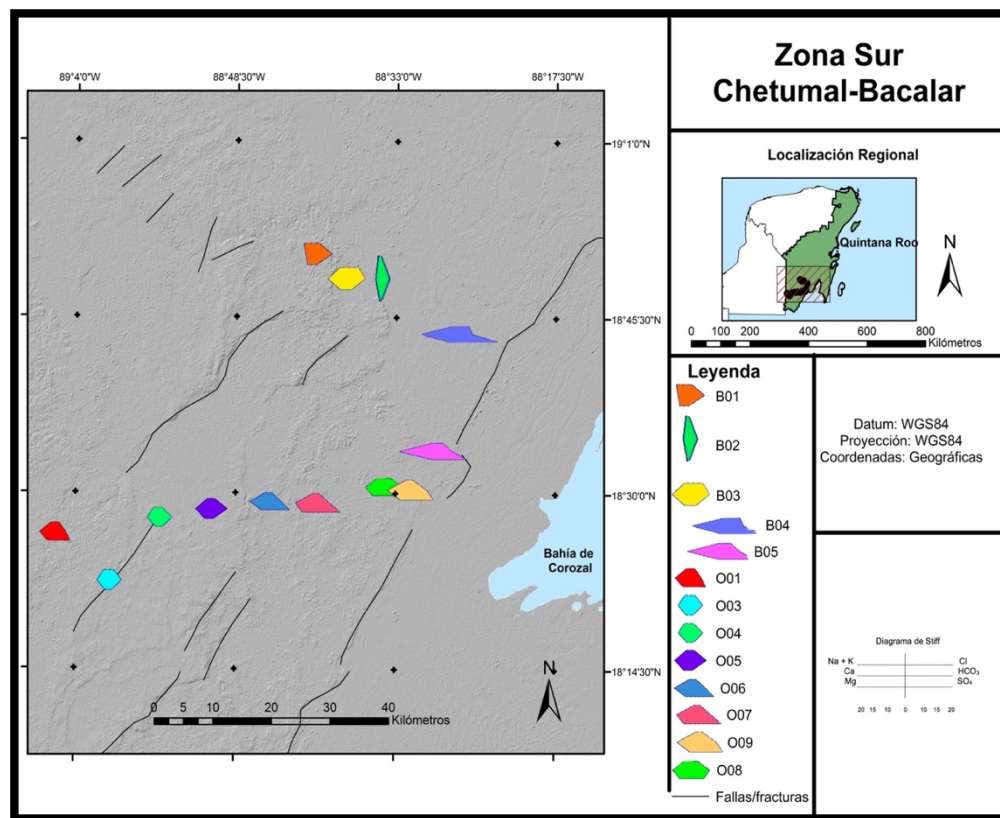


Figura 11. Clasificación por medio de diagramas de Stiff para la zona sur.

En la zona centro (Fig. 12) se observan los polígonos en el eje superior con una tendencia marcada hacia el Cl^- en los aniones y hacia el Ca^{2+} en los cationes. El tipo de agua más abundante es de tipo clorurada – cálcica con y en menor proporción cálcica – clorurada. Las muestras más cercanas a la costa (T11 y T06) muestran una forma particular para agua de mar.

En la zona norte (Fig. 13) se distinguen dos grupos principales, una mayoría de muestras con una tendencia en el eje superior al lado de los cationes, particularmente al Cl^- y en menor proporción al Ca^{2+} por otra parte el segundo grupo que se identificó con una tendencia al Ca^{2+} y al HCO_3^- , estas se distinguen por un menor tamaño del polígono, lo que puede identificarse como agua subterránea natural.

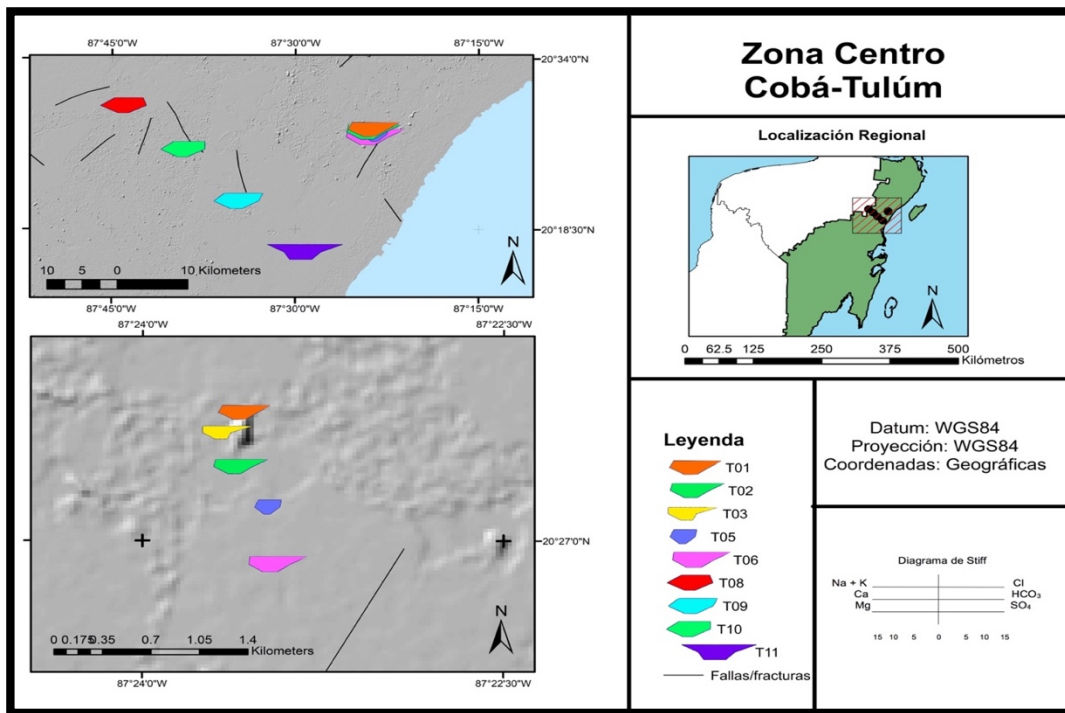


Figura 12. Clasificación por medio de diagramas de Stiff para la zona centro.

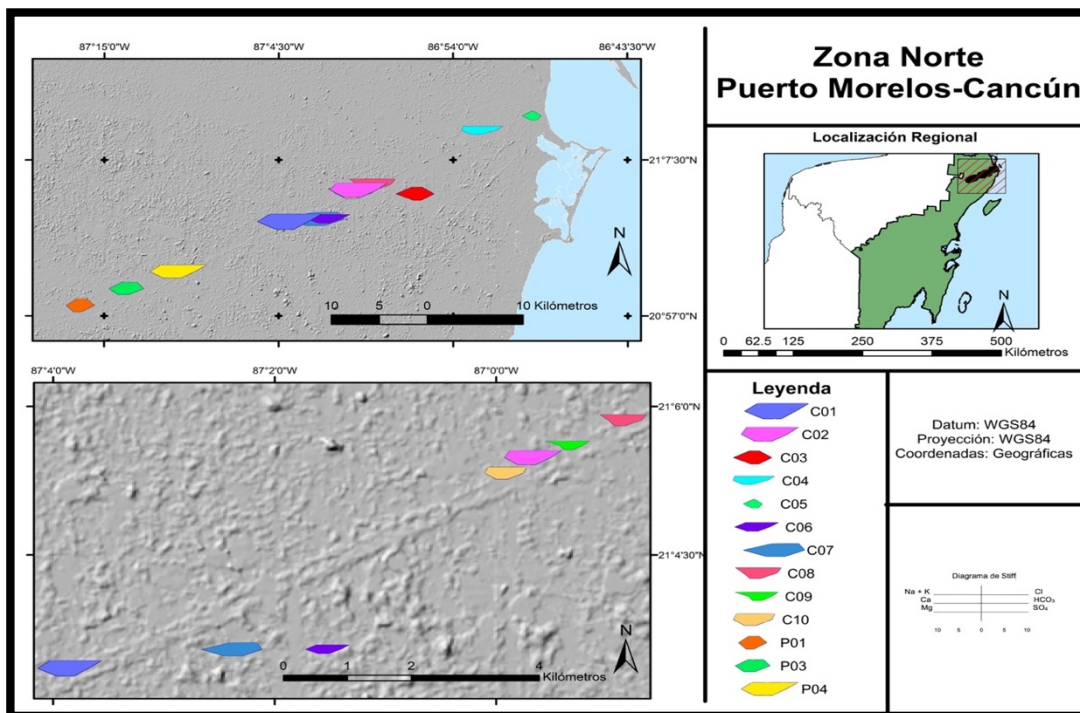


Figura 13. Clasificación por medio de diagramas de Stiff para la zona norte.

7.4 Diagramas de Piper

Los diagramas de Piper muestran los porcentajes relativos de aniones y cationes (meq/l); en el caso de la zona sur (Fig. 14), se puede observar que el 54% de las muestras se agrupan en un mismo tipo de agua correspondiendo al tipo cálcica – bicarbonatada y el 46 % corresponden al tipo cálcica – sulfatada. En la zona centro (Fig. 15) el 88% de acuerdo con el diagrama de Piper se determinó que el 88% de las muestras corresponden al tipo clorurada – cálcica (Cl-Ca) y el 12% restante corresponden al tipo clorurada - sódica (Cl-Na).

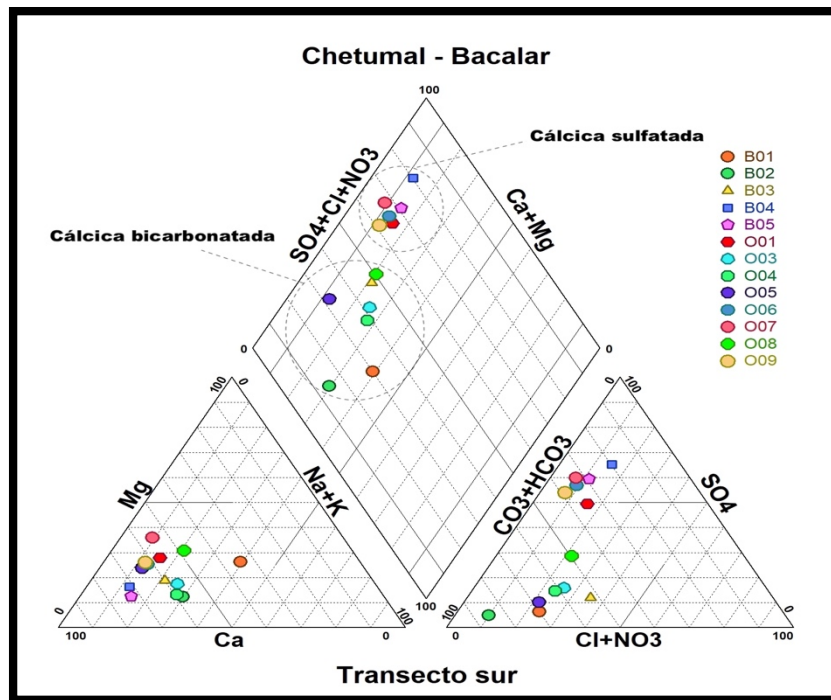


Figura 14. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea de la zona sur.

En la zona norte (Fig. 16) se determinaron en general tres tipos de agua predominantes, siendo esta zona la que presenta mayor variación. El primero corresponde al tipo de agua bicarbonatada cálcica (HCO₃-Ca) con el 39% del total de las muestras. El 46 % de las muestras corresponden al tipo cálcica – clorurada (Ca-Cl), ubicadas en la parte centro del transecto, finalmente con 15% las muestras con un tipo de agua sódica clorurada (Na-Cl).

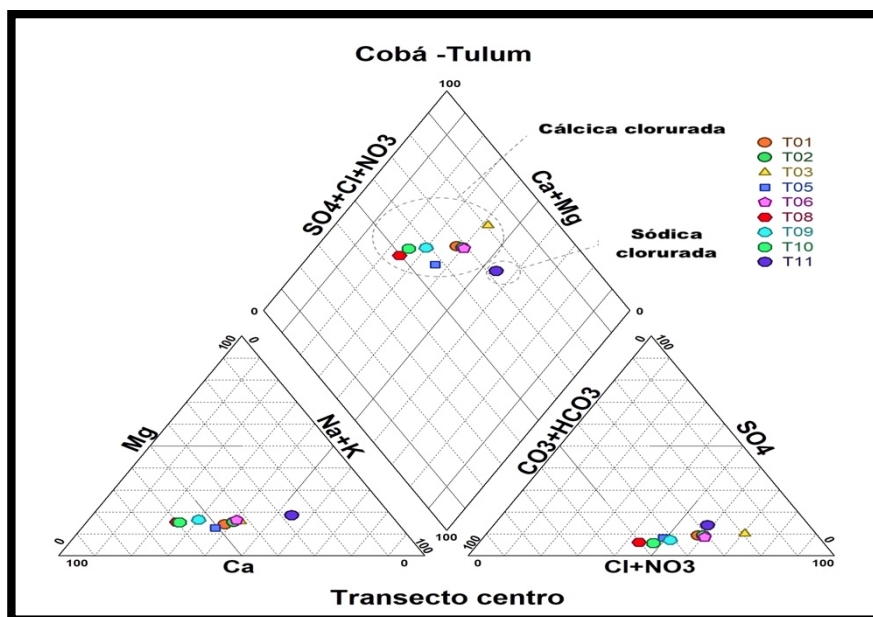


Figura 15. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea de la zona centro.

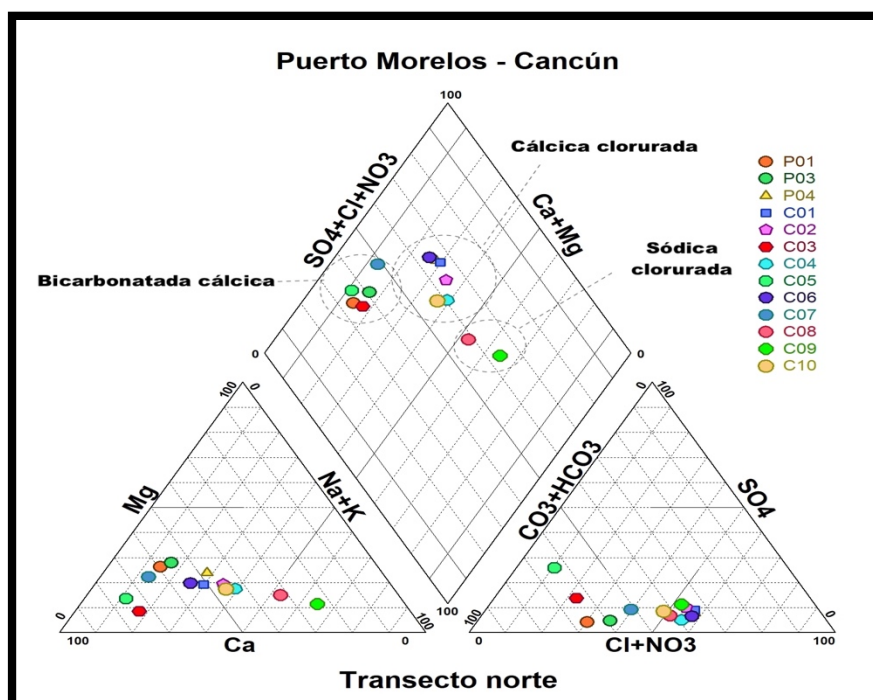


Figura 16. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea de la zona norte.

7.6 Índices de saturación

De acuerdo con los resultados de los análisis realizados para los índices de saturación (IS), se observó que en la zona sur del estado (Fig. 17), en el área sobresaturada, los probables minerales que se encuentran son: aragonita, calcita y dolomita con valores entre el 0 y 2 siendo los valores más altos los de dolomita. En el área subsaturada se encuentran el resto de los minerales reportados: yeso, anhidrita y con valores menores (-7 a -9) la halita y silvita, en disolución, los minerales que se encuentran más cercanos al equilibrio en el segundo grupo son el yeso y la halita. En cuanto a los carbonatos los sitios de muestreo con mayor cercanía al equilibrio fueron B05, O01, O06, O07 y O09.

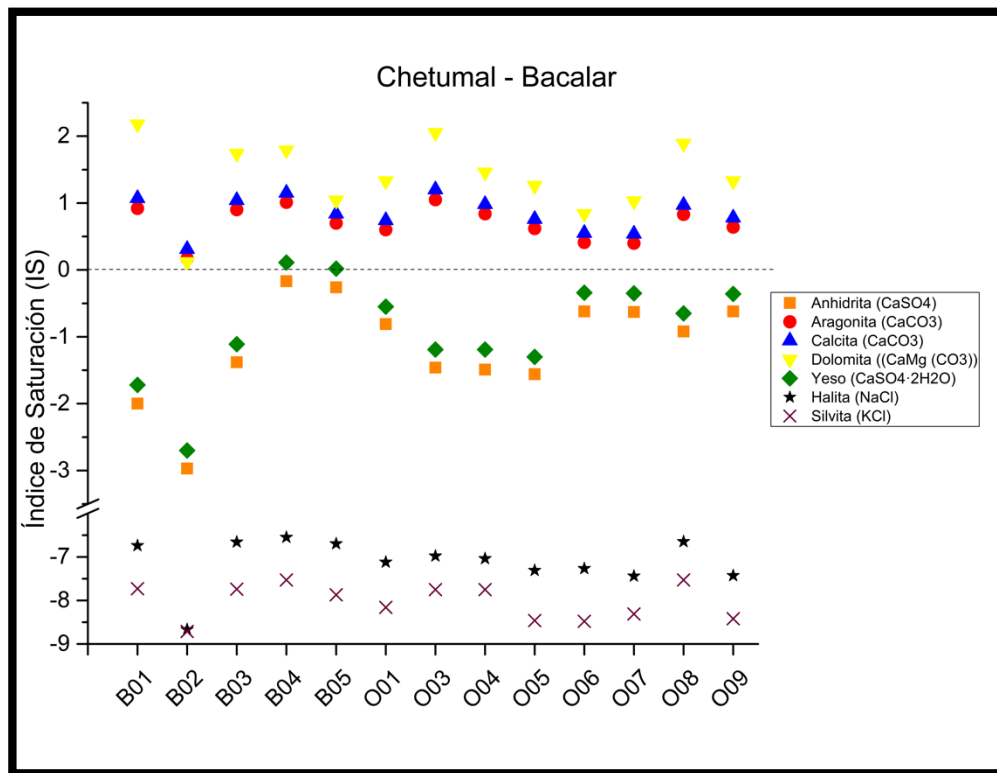


Figura 17. Índice de Saturación (SI) calculados para la zona sur (Chetumal – Bacalar).

En la zona centro (Fig. 18) se identificaron de manera similar a la zona sur, teniendo los mismos dos grupos de minerales con respecto al equilibrio, en el área sobresaturada los probables minerales que se encuentran son: aragonita, calcita y

dolomita con valores entre el 0 y 2 siendo los valores más altos los de dolomita. En el área subsaturada se encuentran el resto de los minerales reportados: Yeso, anhidrita y con valores menores (-7 a -8) la halita y silvita, todos estos en disolución, los minerales que se encuentran más cercanos al equilibrio en el segundo grupo de manera similar son el yeso y la halita sin embargo con valores menores a -1 a diferencia de la zona sur que estos se encontraban mayores a -1. En cuanto a los carbonatos presentes en esta zona los sitios de muestreo con mayor cercanía al equilibrio fueron T05 y T11.

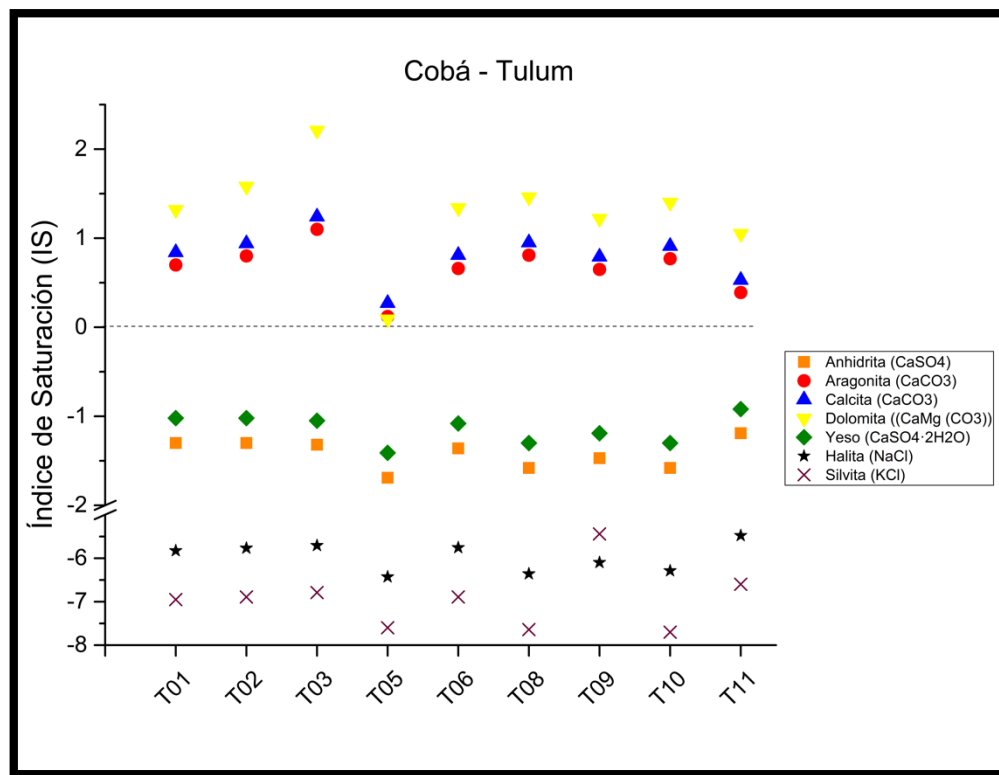


Figura 18. Índice de Saturación (SI) calculados para la zona centro (Cobá – Tulum).

En la zona norte (Fig. 19) se identificaron variaciones en el comportamiento de los minerales respecto a las otras dos zonas. En las muestras P01, P03, P04, C01, C02, C03 Y C05, todos los posibles minerales se encuentran en disolución siendo la calcita y la aragonita los más cercanos al equilibrio con valores mayores a -1. Por su parte las muestras C06, C07, C08, C09 Y C10, presentan un comportamiento similar al de las otras

zonas, los minerales: aragonita, calcita y dolomita se encuentran en el área sobresaturada, sin embargo, con valores entre 0 y 1 y de igual manera en disolución se encuentran el resto de los minerales reportados: yeso, anhidrita y con valores menores (-7 a -9) la halita y silvita. En cuanto a los carbonatos presentes en esta zona los sitios de muestreo con mayor cercanía al equilibrio es el sitio C04 el cual no se integró a ninguno de los grupos anteriores.

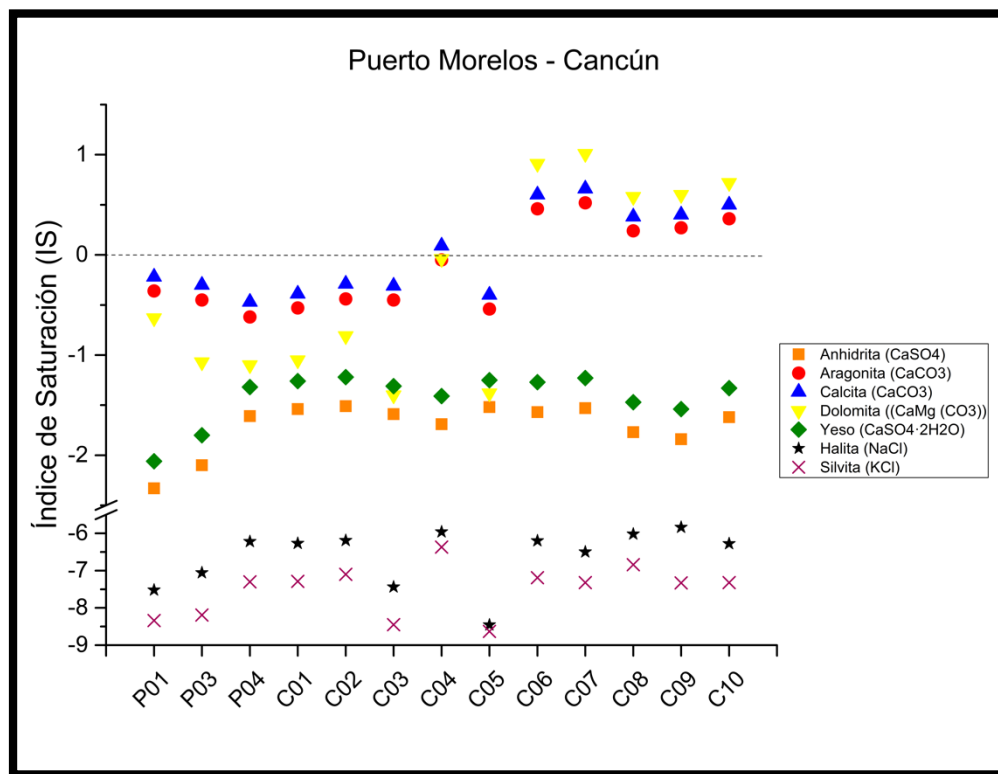


Figura 19. Índice de Saturación (SI) calculados para la zona norte (Puerto Morelos – Cancún).

7.7 Análisis estadísticos

Por medio del análisis SIMPER se obtuvieron los porcentajes de similitud en las diferentes zonas del área de estudio (zona norte, zona centro y zona sur). En la zona sur las variables que contribuyen mayormente en la similitud de este grupo son: Temperatura,

pH, Ca^{2+} , HCO_3^- y SO_4^{2-} con una similitud promedio de 83.61%. En la zona centro las variables son ligeramente distintas siendo temperatura, Cl^- , pH, Ca^{2+} y HCO_3^- , quienes más contribuyen a la similitud de esta zona con un promedio de 90.87. En la zona norte se obtuvieron las mismas variables mayoritarias, temperatura, pH, Ca^{2+} , HCO_3^- y Cl^- , sin embargo con diferente valor de contribución, el valor promedio de similitud en esta zona fue de 88.27%.

El análisis de conglomerados (AC) (Fig. 20) muestra grupos relativamente homogéneos realizados en base a la examinación de las relaciones independientes entre un conjunto de variables por medio de un dendrograma. Las muestras con un valor inferior a 8 en distancia cuadrada de vinculación fueron agrupadas en la misma categoría. Esta posición de la línea fenotípica permitió una división del dendrograma en cinco grupos utilizando 11 variables. Un número mayor o menor de grupos podría definirse moviendo la posición de la línea fenotípica arriba o abajo en el dendrograma (Güler *et al.*, 2002).

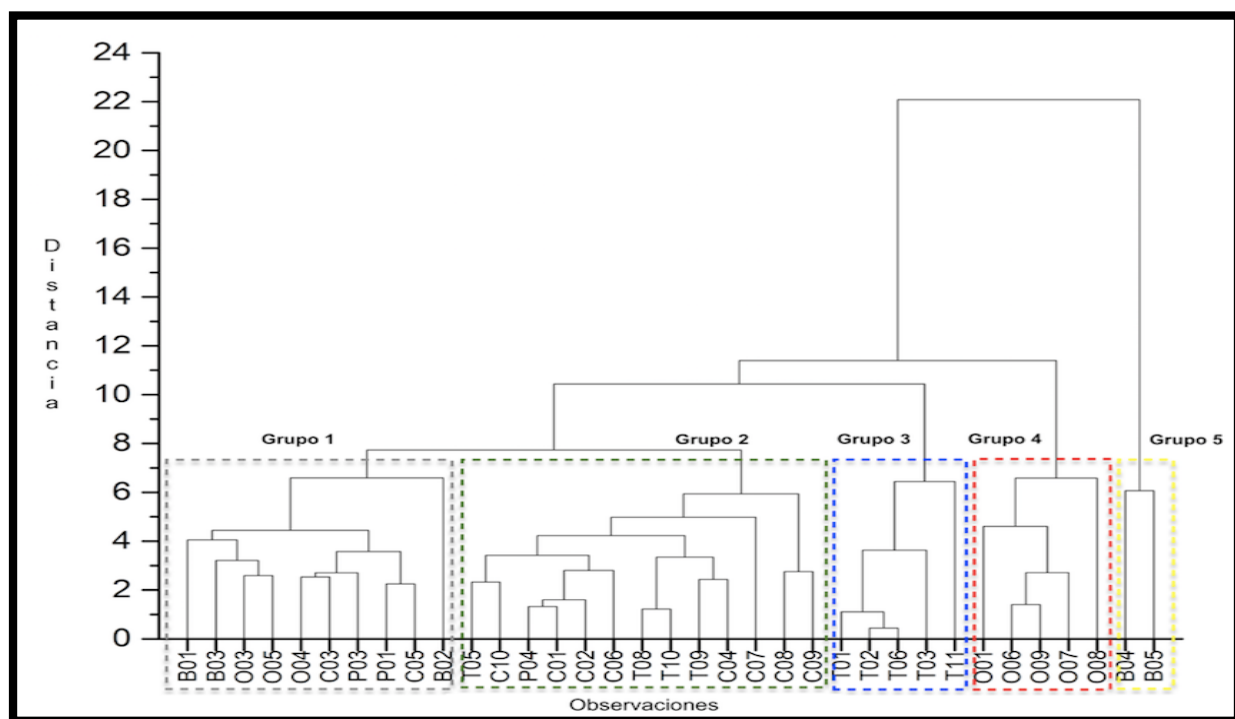


Figura 20. Dendrograma de las 35 muestras en los tres transectos del área de estudio. La línea punteada superior es la línea fenotípica utilizada para la selección del número de grupos.

A través de un análisis SIMPER se obtuvieron los porcentajes de similitud para los diferentes grupos obtenidos en el AC. Las muestras de la zona sur se dividieron en tres grupos, las de la zona centro en dos grupos y la zona norte también en dos grupos. El grupo 1 y 2 agruparon la mayoría de las muestras analizadas. En el grupo 1 las variables que contribuyen mayormente en la similitud de este grupo son: pH, HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- y Na^+ con una similitud promedio de 79.61%, este grupo se compone mayoritariamente de muestras de la zona sur y algunas de la zona norte.

En el grupo 2 las variables son las mismas que en el grupo 1, sin embargo con un diferente porcentaje de contribución siendo: pH, Cl^- , Ca^{2+} , HCO_3^- , y Na^+ , quienes más contribuyen a la similitud de este grupo con un promedio de 87.70%. Este grupo es el de mayor número de muestras con trece y se compone por muestras de la zona norte principalmente y de la zona centro (Fig. 22)

Los grupos 3, 4 y 5, se componen de un menor número de muestras el 3 y 4 con cinco muestras y el grupo 5 con 2. El grupo 3 se conforma solo de muestras de la zona centro, las variables de similitud en este grupo son: Cl^- , pH, Ca^{2+} , Na^+ y HCO_3^- , el valor promedio de similitud fue de 91.79%. Por su parte el grupo 4 está conformado únicamente por muestras de la zona sur, las variables que mayor contribuyen en este grupo son: Ca^{2+} , pH, SO_4^{2-} , HCO_3^- y Mg^{2+} . Por último, el grupo 5 se conforma por dos muestras de la zona sur, sus principales variables de similitud son: Ca^{2+} , SO_4^{2-} , pH, HCO_3^- y Na^+ .

En el análisis de escalonamiento multidimensional se obtuvieron las representaciones geométricas de los agrupamientos obtenidos a partir del análisis de conglomerados de las 35 muestras. El valor del “stress” fue de 0.07 el cual es considerado como bueno. En el mapa del MDS (Fig. 21) se observan los grupos obtenidos en el AC (1,2,3,4 y 5) y su tendencia de agrupamiento.

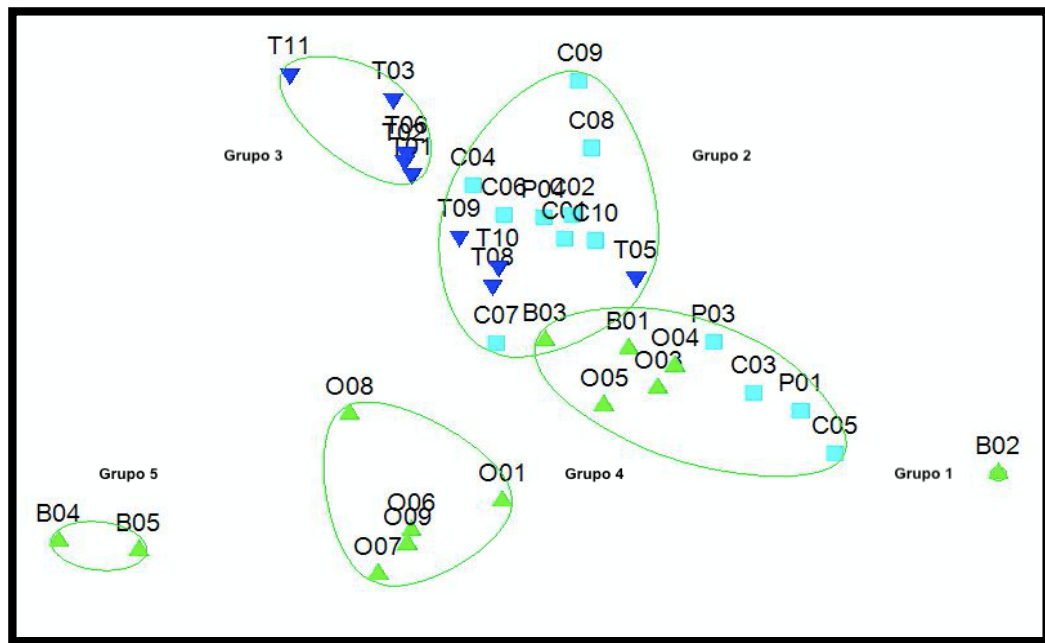


Figura 21. Mapa de escalonamiento multidimensional para los grupos obtenidos a partir del análisis de conglomerados de las 35 muestras.

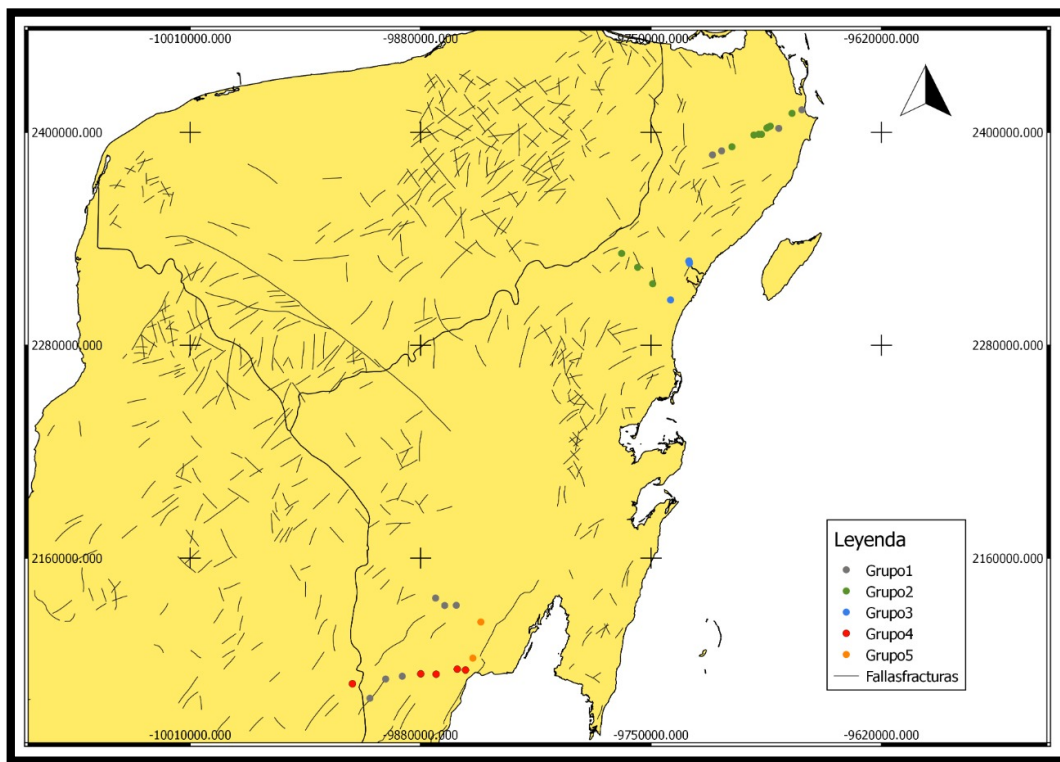


Figura 22. Ubicación geográfica para los grupos obtenidos a partir del análisis de conglomerados de las 35 muestras.

8. DISCUSIÓN

Los resultados de las variables físico-químicas del agua subterránea reportadas en este estudio, como la temperatura, CE, pH, aniones y cationes presentan variaciones entre las tres zonas del área de estudio y se encuentran dentro de los rangos reportados en trabajos anteriores en la PY (Perry *et al.*, 2002; Escolero *et al.*, 2003; Saint-Loup *et al.*, 2018; Sanchez *et al.*, 2015). Los resultados físico-químicos se encuentran dentro del rango de error aceptable. Freeze & Cherry (1979) indican que 5% de error es un límite razonable en el balance iónico para que los análisis sean válidos; sin embargo, de acuerdo a la clasificación de Crites & Tchobanoglous (2000) se considera que $\pm 5\%$ es un valor conservador, por lo tanto se acepta un valor máximo en el error de balance iónico de $\pm 10\%$, de tal forma que el 93% de las muestras analizadas se encuentran dentro de este rango.

Las clasificaciones permitieron reconocer el carácter geoquímico por sitio de muestreo por zona o transecto, en estas se identificaron los tipos de agua predominantes por transecto y otros grupos presentes. En la zona sur el tipo de agua predominante es de tipo cálcica bicarbonatada, lo cual significa que el agua se encuentra circulando por materiales calcáreos de acuerdo con Escolero *et al.*, (2003) en áreas de recarga, el agua subterránea es de este tipo. Otro grupo presente en la zona es el agua de tipo cálcica sulfatada lo que indica que además de que el agua disuelve materiales calcáreos, también está disolviendo otros materiales como son el yeso y/o anhidrita, estas provenientes de sitios que se encuentran en las zonas internas altas en las que prevalecen los materiales evaporíticos.

En la zona centro la mayoría de las muestras presentó al cloruro como ion dominante con diferentes combinaciones (Cl-Ca, Cl-Ca-Na, Cl-HCO₃) y como familia predominante la de tipo: clorurada cálcica. Este transecto es el de menor longitud, la zona está compuesta por rocas jóvenes de edad cuaternaria de acuerdo con Weidie (1985), se encuentran más cerca de la franja costera por lo que el fenómeno de intrusión salina podría estar afectando directamente. Los resultados, particularmente de Cl⁻ y Na⁺ indican

que los pozos están menos influenciados por intrusión salina a diferencia de los cenotes en esta zona. Saint-Loup *et al.*, (2018) indican que esto puede ser explicado por el hecho que los pozos fueron excavados en una matriz calcárea con una conductividad hidráulica menor que la de los conductos de disolución que proveen una mejor conexión con el mar.

Por su parte en la zona norte se identificó a partir de las clasificaciones como familia predominante la de tipo cálcica clorurada y otros grupos clasificadas como clorurada cálcica, cálcica bicarbonatada y sódica clorurada. En esta zona al igual que la zona centro se encuentra conformada por rocas carbonatadas jóvenes de edad cuaternaria. De acuerdo con Perry *et al.*, (2011) en la parte norte de la PY la intrusión salina modifica la presencia de iones debido a la fuerte exposición que tiene con la roca por lo cual se sugiere que existe este fenómeno en esta zona.

La mezcla con agua de mar se puede constatar en zonas cercanas a la costa y es una característica del noreste y centro de Quintana Roo, Hernández *et al.*, (2011) y Beddows *et al.*, (2007) encontraron a lo largo de la costa del estado intrusión salina en el acuífero en diferentes proporciones y de acuerdo con Bauer *et al.*, (2011) y Sánchez *et al.*, (2015) la dirección de flujo del agua subterránea va del interior de la PY hacia la costa. Este patrón en la dirección sugiere que los altos valores encontrados de los iones Cl^- y Na^+ se explican por esta razón, sin embargo, los autores sugieren que para verificarlo se debe hacer un estudio de trazadores como salinidad y SRSi. Por su parte Hanshaw and Back (1980) postulan que la disolución en una zona de mezcla es un proceso geomorfológico importante para el desarrollo de terrenos kársticos principalmente por erosión en las líneas de costa.

Información del INEGI (2002) indica que la zona norte está constituida de roca caliza y dolomía de edad terciaria y se ha encontrado evidencia de intrusión salina en los pozos de la zona, esto coincide con los resultados de los probables minerales en los índices de saturación obtenidos para esta zona, coincidiendo con Stoessell *et al.*, (1989) donde indican que en la parte norte de la PY en especial a lo largo de la costa, la disolución de carbonatos se presenta como principal proceso en la modificación de la

geoquímica subterránea. En la zona centro los valores promedio obtenidos en los índices de saturación para aragonita $IS = 0.7$, calcita $IS = 0.8$ y dolomita $IS = 1.2$, y en la zona subsaturada yeso $IS = -1.4$ y anhidrita $IS = -1.4$ y son similares a los reportados en Saint-Loup *et al.*, 2018 y con diferencias en los valores de halita. En la zona sur los IS concuerdan con la geología reportada en algunos estudios previos (López Ramos 1972; Bauer *et al.*, 2011 y Sánchez-Sánchez *et al.*, 2015) donde identifican la zona sur como la zona de recarga y donde predominan minerales como la calcita, dolomita y aragonita. Los valores de IS demuestran que son minerales que se encuentran en la zona sobresaturada, además las rocas carbonatadas se intercalan con bloques de evaporitas por lo cual se encuentra el yeso y la anhidrita presentes en disolución, Perry *et al.*, (2009) y Perry *et al.* (2011), mencionan que la interacción agua-roca permite la presencia de estos minerales en el agua subterránea. En las tres zonas se observó la dolomita como probable mineral en precipitación, la dolomitización es un proceso cinéticamente lento, por lo cual puede estar presente en la solución pero no necesariamente precipitando, a diferencia del resto de los minerales con velocidades más rápidas de precipitación, además, se sugiere que la presencia de dolomita en las zonas de precipitación, se deba principalmente a la presencia de rocas del pleistoceno con concentraciones más altas de magnesio debido al enriquecimiento de estas rocas con agua marina en los periodos de transgresión en la PY propiciando diferentes arreglos cristalográficos en las rocas, esto podría confirmarse mediante logueo de núcleos de barrenación en las áreas de colecta de muestras.

De los 5 grupos observados en el análisis de conglomerados en el 1 y 2 se ubicaron la mayoría de las muestras analizadas en este estudio en donde se puede constatar lo que se ha estudiado en la PY por diversos autores, sin embargo los grupos 3, 4 y 5 muestran comportamientos particulares para sus zonas. El grupo 3 se compone solo de muestras de la zona centro en donde los iones que mayor contribuyen son el Cl^- , Ca^{2+} y Na^+ por lo que el proceso dominante en esta zona puede ser la mezcla de agua dulce y agua salina. En el grupo 4 y 5 ambas en la zona sur donde los iones de mayor contribución son el $Ca^{2+} SO_4$ y HCO_3^- esta diferencia con el resto de las muestras de la

zona puede estar relacionada con que las muestras fueron colectadas en la zona del sistema de fallas Rio Hondo y puede representar un flujo preferencial debido a esta característica estructural presente en la zona. Stuckles (2012) indica que las propiedades hidrológicas de cada unidad hidrológica o característica estructural son uniformes por lo tanto al haber un sistema de fallas puede haber un cambio en las condiciones propiciando diferentes flujos y con esto diferencias fisicoquímicas en una misma zona debido a las variaciones de nivel freático, contacto con diferentes unidades litológicas y/o más procesos. Al espacializar geográficamente estos grupos se observó que algunos sitios guardan relación con su ubicación, como se mencionó, el grupo 3 se ubica únicamente en la zona centro y el grupo 4 y 5 se ubican solamente en la zona sur, mientras que el grupo 1 está presente en la zona norte y sur y el grupo 2 en la zona norte y centro, esto demuestra que a pesar de la homogeneidad de las zonas existe variabilidad geoquímica particular en el agua subterránea.

9. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un panorama geoquímico en el estado de Quintana Roo. Se realizan las comparaciones de las mediciones de elementos mayores y otros parámetros en tres diferentes zonas del estado. A pesar de que el estado de Quintana Roo es litológicamente similar, la geoquímica del agua subterránea presenta variaciones debido a los distintos factores y la geología local que ocurren en las tres zonas del área de estudio y a la intrusión salina.

Se determinaron las concentraciones de iones y se realizaron clasificaciones por medio de diagramas de Piper y Stiff y se determinó que los tipos de agua predominantes son: en la zona sur la de tipo cálcica bicarbonatada la cual se define como un tipo de agua característico de una zona de recarga, en la zona centro la clorurada cálcica en la cual se sugiere que existe esta en una zona de mezcla, mismo caso en la zona norte pero con mayor predominancia la disolución de carbonatados, siendo el agua predominante la cálcica clorurada.

A través de la espacialización grupal por medio de diagramas de Stiff se determinaron las diferencias en tipos de agua por zona, demostrando que cada una de estas puede haber variaciones. En la zona sur se identificaron tres grupos principales, aquellos con tipo de agua cálcica – sulfatada, un segundo grupo con cálcica – bicarbonatada y un tercero con los mismos iones dominantes. En la zona centro el tipo de agua más abundante es de tipo clorurada – cálcica con y en menor proporción cálcica – clorurada y en la zona norte siendo la que presenta mayor variación corresponden el tipo de agua bicarbonatada, al tipo cálcica – clorurada y al tipo sódica clorurada (Na-Cl).

La estimación de los índices de saturación obtenidos en este trabajo arrojaron que el comportamiento general de los probables minerales en el agua subterránea son: aragonita, calcita y dolomita precipitando y por su parte en disolución el yeso, anhidrita, halita y silvita.

Las técnicas utilizadas brindaron un panorama de la composición y procesos más determinantes en la geoquímica del este de Quintana Roo, la interacción química agua-roca como disolución de carbonatos es el proceso que mayormente determina la composición del agua subterránea seguido por la mezcla entre agua subterránea y agua de mar gracias a la naturaleza kárstica de las rocas permitiendo que la intrusión salina modifique la composición del agua subterránea y a su vez juegue un papel determinante en la forma del paisaje kárstico.

BIBLIOGRAFÍA

Aguayo-Camargo, J.E y Marin, S. (1987) Origen y evolución de los rasgos morfoestructurales postcretácicos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo XLVIII, No. 2.

Alvarez, M. (1954) 'Exploración geológica preliminar del Río Hondo [Preliminary geological exploration of the Río Hondo].', *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 6, pp. 207–213.

Appelo, C. A. . and Postma, D. (2005) *Geochemistry , Groundwater & Pollution*. 2nd

edn. Amsterdam, The Netherlands: Balkema Publishers.

Back, W. and Hanshaw, B. B. (1970) 'COMPARISON OF CHEMICAL HYDROGEOLOGY OF THE CARBONATE PENINSULAS OF FLORIDA AND YUCATAN 1', *Journal of Hydrology*, 10(November 1968), pp. 330–368.

Baker, A. (2003) 'Land use and water quality', *Hydrological processes*, 17, pp. 2499–2501. doi: 10.1002/hyp.5140.

Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B., Charvet, G., Marín, L.E., Rebolledo-Vieyra, M. and Merediz-Alonso, G. (2011) 'Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico', *Hydrogeology Journal*, 19(3), pp. 507–524. doi: 10.1007/s10040-010-0699-5.

Beddows, P. A. (2004) *Groundwater Hydrology of a Coastal Conduit Carbonate Aquifer: Caribbean Coast of the Yucatan Peninsula, Mexico*. University of Bristol, UK.

Beddows, P. A., Smart, P.L., Whitaker, F.F. and Smith S.L. (2007) 'Decoupled fresh – saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: Spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity', *Journal of Hydrology*, 346, pp. 18–32. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.08.013.

Butterlin, J. (1958) 'Reconocimiento geológico preliminar del territorio de Quintana Roo.', *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geólogos Petroleros*, 10, pp. 531–570.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2014) *Estadísticas del agua en México*. 2014th edn. México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2015) 'Reporte Anual 2015 Analistas: Edición', pp. 13–30.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2015) 'Atlas del agua en México', *D. R. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, p. 138. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Crites, R. and Tchobanoglous, G. (2000) *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*. Santa Fé, Bogota: McGraw-Hill Interamericana.

Custodio, E. and Llamas, R. (1976) 'Hidrogeoquímica', in *Hidrología subterránea*. Barcelona: Omega, p. 1194.

Cvijic, J. (1918) 'Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst.', *Recueil des travaux de l'institut de géographie alpine*, pp. 375–426.

Escolero, O. Marín, L.E., Steinich, B., Pacheco, J.A., Molina-Maldonado, A., Anzaldo, J.M. (2003) 'Geochemistry of the hydrogeological reserve of Mérida, Yucatán, México', 44, pp. 301–314.

Ford, D. and Williams, P. (2007) *Speleogenesis: The development of cave systems, Karst Hydrogeology and Geomorphology*. doi: 10.1002/9781118684986.

Frape, S. . and Fritz, P. (1984) 'Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, pp. 1617–1627.

Freeze, A. R. and Cherry, A. . (1979) *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.

Galán, C. and Herrera, F. F. (2017) 'Ríos subterráneos y acuíferos kársticos de Venezuela : Inventario , situación y conservación', *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, 42.

Gondwe, B. R. N., Lerer, S., et al., (2010) 'Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing', *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 389(1–2), pp. 1–17. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.044.

Gondwe, B. R. N., Lerer, S., Stisen, S., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., Bauer-Gottwein, P. (2010) 'Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing', *Journal of Hydrology*, 389(1–2), pp. 1–17. doi:

10.1016/j.jhydrol.2010.04.044.

Gondwe, B. R. N., Hong, S., Wdowinski, S., Bauer-Gottwein, P. (2010) 'Hydrologic Dynamics of the Ground-Water-Dependent Sian Ka ' an Wetlands , Mexico , Derived from InSAR and SAR Data', pp. 1–13. doi: 10.1007/s13157-009-0016-z.

Güler, C., Thyne, G.D., Mccray, J.E. and Turner, A.K. (2002) 'Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data', *Hydrogeology Journal*, 10(4), pp. 455–474. doi: 10.1007/s10040-002-0196-6.

Güler, C. et al., (2012) 'Evaluation of Graphical and Multivariate Statistical Methods for Classification of Water Chemistry Data for classification of water chemistry data', *Hydrogeology Journal*, 10, pp. 455–474. doi: 10.1007/s10040-002-0196-6.

Hanshaw, B. B. and Back, W. (1980) 'Chemical mass-wasting of the northern Yucatan Peninsula by groundwater dissolution', *Geology*, 8, pp. 222–224.

Hausman, H. (2009) *Responsible Development in Tulum , Mexico : Considering Water Quality and Subaqueous Cave Locations* by. Duke University.

Hernández-terrones, L., Rebolledo-vieyra, M. and Merino-ibarra, M. (2011) 'Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems', pp. 517–528. doi: 10.1007/s11270-010-0664-x.

INEGI (2002) *Estudio hidrológico del estado de Quintana Roo*. Agascalientes. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Jenkins, D., Snoeyink, V. L. (1999) *Química del Agua*. Limusa. Edited by N. Editoriales. México.

Lopez Ramos, E. (1975) 'Geological Summary of the Yucatan Peninsula', in, pp. 257–282. doi: 10.1007/978-1-4684-8535-6_7.

Marton, G. and Buffler, R. T. (1994) 'Jurassic Reconstruction of the Gulf of Mexico

Basin', *International Geology Review*, 36, pp. 545–586. doi: 10.1080/00206819409465475.

Milanovic, P. (1981) 'Karst Hydrogeology', *Water Resources Publications, Littleton*.

Moore, Y. H., Stoessell, R. K. and Easley, D. H. (1992) 'Fresh-Water/Sea-Water Relationship Within a Ground-Water Flow system, Northeastern Coast of the Yucatan Peninsula', *Ground Water*, 30, pp. 343–350.

Moral, F., Cruz-Sanjulian, J. . and Olías, M. (2008) 'Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera , southern Spain)', *Journal of Hydrology*, 360, pp. 281–296. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.012.

Morán-Zenteno, D. J. (1984) *Geología de la República Mexicana*. Edited by D. J. Morán-Zenteno. Ciudad de México, México.: Facultad de Ingeniería (UNAM) e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

Musgrove, M., Stern, L. A. and Banner, J. L. (2010) 'Springwater geochemistry at Honey Creek State Natural Area , central Texas : Implications for surface water and groundwater interaction in a karst aquifer', *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 388(1–2), pp. 144–156. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.036.

Padilla y Sanchez, R. J. (2007) 'Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México Ricardo José Padilla y Sánchez', *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIX(1), pp. 19–42.

Pernía Llera, José María; Cuesta Peiro, Felicidad; Ballesteros Navarro, Bruno; Barba-Romero Muñoz, Joaquín; García Sánchez, E. (1993) 'Las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas', in *Las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Perry, E., Paytan A., Pedersen, B., and Velazquez-Oliman, G.V. (2009) 'Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and

hydrogeology', *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 367(1–2), pp. 27–40. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.026.

Perry, E., Velazquez-Oliman, G. V. and Wagner, N. (2011) 'Preliminary Investigation of Groundwater and Surface Water Geochemistry in Campeche and Southern Quintana Roo', in *Water Resources in México*: Springer-Verlag, pp. 87–97. doi: 10.1007/978-3-642-05432-7.

Perry, E., Velazquez-Oliman, G. and Marin, L. E. (2002) 'The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico', *International Geology Review*, 44(3), pp. 191–221. doi: 10.2747/0020-6814.44.3.191.

Porrás-Martín, J., López-Guerrero, P.N., Álvarez-Fernández, C., Fernández-Uría, A y Gimeno, M.V (1985) *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. Madrid: Instituto Geológico Minero de España.

Rivera Medina, M. K. (2013) *ESTUDIO GEOFÍSICO E HIDROGEOLÓGICO PARA UN BANCO DE MATERIALES, EN PLAYA DEL CARMEN QUINTANA ROO, MÉXICO*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Saint-Loup, R., Felix T., Maqueda A., Schiller A., Renard P. (2018) 'A survey of groundwater quality in Tulum region , Yucatan Peninsula , Mexico', *Environmental Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 77(644), p. 0. doi: 10.1007/s12665-018-7747-1.

Sánchez-sánchez, J. A., Pacheco J.G., Carrillo L., González R.A. (2015) 'Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo , México', *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), pp. 62–76.

Sanchez, J. A. et al., (2016) 'Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México', *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), pp. 75–96.

Schönian, F., Tagle R., Stöfler D., Kenkman T. (2005) 'Geology of southern Quintana Roo (Mexico) and the Chicxulub ejecta blanket', *36th Lunar and Planetary Science*

Conference, (March), p. 2389.

Servicio Geológico Mexicano (2007). Carta geológica de México, escala 1:2,000,000 (6a ed.). Pachuca, México: Servicio Geológico Mexicano.

Smart, P. L. Beddows P.A., Coke J.G., Doerr S., Smith S., Whitaker F.F (2006) 'Cave Development on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico', *Geological Society of America*, 2404(10), pp. 105–128. doi: 10.1130/2006.2404(10).

Steinich, B. and Marin, L. E. (1997) 'Determination of flow characteristics in the aquifer of the Northwestern Peninsula of Yucatan , Mexico', 191, pp. 315–331.

Stoessell, R. K., Ward W.C., Ford B.H, Schuffert J.D (1989) 'Water chemistry and CaCO₃ dissolution in the saline part of an open-flow mixing zone , coastal Yucatan Peninsula , Mexico', *Geological Society of America Bulletin*, 101, pp. 159–169.

Stuckles John (2012) *Hydrology and Geochemistry of Yucca Mountain and Vicinity, Southern Nevada and California*. Denver.

Tarbuck, E. J. and Lutgens, F. K. (2005) *Ciencias de la Tierra*. 8th edn. Edited by P. E. S.A. Madrid: Pearson Prentice Hall.

Weidie, A. E. (1985) 'Part I: Geology of Yucatan Platform.', *Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula.*, pp. 1–19. Available at: <http://archives.datapages.com/data/nogs/data/006/006007/0001.htm>.

Werner, J. (1996) *Introducción a la Hidrogeología*. 1ra Edición. Linares: Universidad Autónoma de Nuevo León.

Williams, P. (2008) 'World Heritage Caves and Karst', *International Union for Conservation of Nature World Heritage Studies*, 2, pp. 1–50.