



El Colegio de la Frontera Sur

Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas en la
zona sur del Estado de Quintana Roo, México.

TESIS

Presentada como requisito parcial para optar al grado de
Doctor en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable

Por

Joan Alberto Sánchez Sánchez

2015

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional. Sin duda alguna “Ni antes ni después, los tiempos de Dios son perfectos”.

A mis padres, la Sra. Dolores Sánchez Salas y el Sr. Nicolás Sánchez Cantero, porque con su sacrificio me dieron la posibilidad de llegar a esta instancia, por sus invaluable consejos, por toda su comprensión y apoyo incondicional en los momentos difíciles, por ser ese ejemplo de perseverancia y constancia que me han permitido ser una persona de bien. Los quiero mucho, gracias a ustedes estoy donde estoy.

A mi hijo, Joan Sánchez por ser mi fortaleza, el motivo y la razón que me ha llevado a seguir superándome día con día. Deseo dejarle esta enseñanza como muestra de superación y dedicación, como muestra de que cuando se quiere alcanzar algo en la vida, no hay tiempo ni obstáculo que lo impida.

A mis hermanas Paulina y Jazmín por estar siempre presentes, acompañándome y motivándome en esta aventura.

Agradecimientos a mi tutora y directora de esta tesis, la Dra. Teresa Álvarez Legorreta, por su orientación y apoyo, por su constante y paciente seguimiento compartiendo su disponibilidad de manera generosa durante mi estancia en el programa de doctorado.

A mis asesores, la Dra. Julia G. Pacheco Ávila, por darme la oportunidad de seguir trabajando y adquiriendo sus conocimientos desde mi formación en la maestría. Por su paciencia y excelentes sugerencias en aclarar mis dudas, por su amistad y sus

consejos en los momentos difíciles. A usted Dra., todo mi reconocimiento y afecto. Al Dr. Roger González Herrera, por todas sus observaciones y atinados comentarios en la realización de este trabajo de investigación. A la Dra. Laura Carrillo Bibriezca, por su valiosa asesoría y el apoyo brindado durante mi estancia en el doctorado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de doctorado N° 201123003.

A El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), por brindarme el espacio y la infraestructura para desarrollar mis estudios.

Al Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán (CCPY) y la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (CAPA), por su aporte financiero para la realización de los trabajos de campo y análisis de laboratorio dentro del estudio denominado “Evaluación de la calidad del agua subterránea en varias localidades de los Municipios de Othón P. Blanco, Bacalar y José Ma. Morelos del Estado de Quintana Roo”.

A los ingenieros Luis Velázquez Aguirre y Raúl Muñoz, por su desinteresada colaboración y asistencia profesional al poner a disposición toda su información hidrogeológica lo que facilitó el análisis con detalle del área de estudio.

Al Arq. Humberto Vidal Russi e Ing. Marco Jiménez García, por todas las facilidades brindadas en la obtención de información y atinadas sugerencias en la composición de la tesis.

En general, quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis doctoral, con sus altos y bajos y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde los más profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

ÍNDICE

RESUMEN	6
GUIÓN DE LA TESIS.....	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Marco geohidrológico conceptual de la zona sur de Quintana Roo (RH33-A).....	12
1.2 Contexto geohidrológico.....	17
1.3 Contexto hidrogeoquímico de la región.....	20
1.4 Objetivos	26
1.4.1 Objetivo General	26
1.4.2 Objetivos específicos.....	26
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL SUR DEL ESTADO DE QUINTANA ROO, MÉXICO.	27
RESUMEN	28
ABSTRACT	30
INTRODUCCIÓN.....	32
Características del área de estudio	34
Marco hidrogeológico	36
METODOLOGÍA.....	44
Análisis geoquímico.....	50
Análisis Estadístico Multivariado.....	50
Análisis de Conglomerados (AC).....	51
Análisis de Factores (AF).....	53
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	54
Análisis Estadístico Descriptivo	54
Análisis de factores.....	56

Tipos de agua.....	58
Interpretación del Análisis de Conglomerados	60
CONCLUSIONES	66
AGRADECIMIENTOS.....	67
REFERENCIAS	67
CAPÍTULO 3. COMPORTAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO DEL ACUÍFERO CÁRSTICO DEL SUR DE QUINTANA ROO, MÉXICO.	79
RESUMEN	81
ABSTRACT	82
INTRODUCCIÓN	83
Área de estudio	87
Marco hidrogeológico	89
METODOLOGÍA.....	95
Índices de Calidad del Agua (ICA).....	96
Uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)	102
RESULTADOS Y DISCUSIONES	103
Análisis Estadístico Descriptivo	103
Análisis geoestadístico	107
Mapas de distribución Nitratos.....	109
Dureza Total	111
Sodio.....	113
Cloruros	116
Sulfatos.....	118
Índice de Calidad del Agua Subterránea	121
CONCLUSIONES	124

AGRADECIMIENTOS.....	125
REFERENCIAS.....	126
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN GENERAL.....	135
4.1 Procesos geoquímicos dominantes.....	136
4.2 Índices de saturación y disolución de minerales.....	231
CONCLUSIONES.....	147
RECOMENDACIONES.....	149
REFERENCIAS.....	150
ANEXOS.....	158

Listado de tablas

Tabla 1.1. Fuentes, comportamiento y significancia de los cationes en el agua.	21
Tabla 1.2. Fuente, comportamiento y significancia de los aniones en el agua.	23
Tabla 2.1. Características fisicoquímicas de los aprovechamientos de agua subterránea en la Subregión Hidrológica No. 33-A	46
Tabla 2.2. Estadística descriptiva del agua subterránea de la Subregión Hidrológica No. 33-A durante la temporada de lluvias de 2012.	55
Tabla 2.3. Análisis de factores con Rotación Varimax	57
Tabla 2.4. Valores promedio para los grupos determinados por el Análisis de Conglomerados.	61
Tabla 3.1. Técnicas analíticas según las Normas Oficiales Mexicanas.	96
Tabla 3.2. Pesos relativos de los parámetros considerados para el cálculo del Índice de Calidad de Agua subterránea según su importancia para la salud humana.	98
Tabla 3.3. Estadística descriptiva del agua subterránea durante la temporada de lluvias de 2002.	101
Tabla 3.4. Estadística descriptiva del agua subterránea durante la temporada de lluvias de 2012.	104
Tabla 3.5. Modelo teórico de variograma con mejor ajuste para los parámetros hidroquímicos.	108

Listado de Figuras

Figura 1.1 Geología de la Península de Yucatán modificada de SGM (2007).	14
Figura 2.1. Ubicación geográfica del área de estudio.....	36
Figura 2.2. Geología de la Península de Yucatán modificada de SGM (2007).	38
Figura 2.3. Mapa de flujo de agua subterránea a escala regional modificado de ASK (2003).	42
Figura 2.4. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea.	59
Figura 2.5. Dendograma de las 53 muestras hidrogeoquímicas del área de estudio.....	60
Figura 2.6. Mapa vista de los grupos identificados a partir del Análisis de Conglomerados.....	63
Figura 3.1. Ubicación geográfica del área de estudio.	89
Figura 3.2. Mapa geológico de la Península de Yucatán modificada de SGM (2007).....	90
Figura 3.3. Mapa de flujo de agua subterránea a escala regional modificado de Sánchez-Sánchez et al., (2015).	94
Figura 3.4. Concentraciones de sólidos totales disueltos (a) 2002 y b) 2012) en el agua subterránea de la zona de estudio.	106
Figura 3.5. Concentraciones de nitratos (a) 2002 y b) 2012) en el agua subterránea de la zona de estudio.	110
Figura 3.6. Concentración de dureza total en el agua subterránea de la zona de estudio.	112
Figura 3.7. Concentración de sodio en el agua subterránea de la zona de estudio.	114
Figura 3.8. Relación del Na ⁺ y Cl ⁻ . Los puntos en negro representan las muestras.	115
Figura 3.9. Concentración de cloruros en el agua subterránea de la zona de estudio.....	118
Figura 3.10. Concentración de sulfatos en el agua subterránea de la zona de estudio.	121
Figura 3.11. Índice de Calidad del Agua (a) 2002 y (b) 2012 de la zona de estudio.	123
Figura 4.1. Mapa vista de los grupos identificados a partir del Análisis de Conglomerados.....	143
Figura 4.2. Índices de Saturación de la Calcita.....	143
Figura 4.2. Índices de Saturación de la Dolomita.....	143
Figura 4.3. Índices de Saturación de la Aragonita.....	144

RESUMEN

El sur del Estado de Quintana Roo se caracteriza por la presencia de un suelo calcáreo que, entre otras cosas, se distingue por un proceso altamente dinámico conocido como karstificación los cuales conciben zonas de gran permeabilidad debido al desarrollo de fracturas y canales de disolución por donde se filtra rápidamente el agua y que propician que el agua subterránea sea la principal fuente de abastecimiento y a su vez vulnerable a la contaminación. En este estudio se resaltan las características hidrogeoquímicas del acuífero a través del siguiente objetivo general: “Estudiar el comportamiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas del acuífero kárstico sur del Estado de Quintana Roo, México”. Los resultados demostraron que los procesos geoquímicos más importantes en él están regidos por la disolución de minerales de rocas carbonatadas, dolomías y evaporitas, además de los procesos de intercambio iónico, la presencia de materiales arcillosos someros y los procesos de mezcla de agua dulce y marina. Se demostró que la región de estudio se caracteriza por presentar una heterogeneidad en cuanto sus características hidrogeológicas lo que da lugar a zonas contrastantes con agua de mala calidad y pequeñas zonas de aguas dulces. De acuerdo con el Índice de calidad del agua se expone que en muchas poblaciones se está suministrando aguas que sobrepasan los límites permisibles establecidos en la Norma Mexicana en cuanto a Sólidos Totales Disueltos, Dureza y Sulfatos. Por último, las variaciones del nivel estático revelaron, de manera clara, una orientación de suroccidente a noreste y en la parte costera una orientación de oeste a este, lo cual define el patrón de descarga del acuífero de la región.

Palabras clave: carst, acuífero, hidrogeoquímica, aguas subterráneas, calidad del agua.

GUIÓN DE LA TESIS

A fin de dar cumplimiento al objetivo general de la presente tesis, este trabajo fue integrado en cinco capítulos.

El Capítulo uno; consta de la introducción en la cual se pone en contexto las características generales del área de estudio así como los factores que motivaron su realización. Se describe el objetivo general y los objetivos específicos.

El Capítulo dos; da respuesta a los primeros dos objetivos específicos de la tesis a través del artículo denominado “Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México”. Para ello, se colectaron muestras de 53 pozos de abastecimiento obtenidos en el año de 2012. Se analizaron catorce parámetros físicos y químicos en campo y en el laboratorio y se aplicaron técnicas convencionales como el diagrama de Piper así como la combinación de técnicas multivariadas no antes aplicadas para esta zona geográfica. Con base en los resultados se determinó que los elementos disueltos en el agua subterránea están relacionados principalmente con la presencia y la disolución de minerales de carbonatos, dolomitas y evaporitas, con procesos de intercambio iónico y presencia de materiales arcillosos someros además de procesos de mezcla de agua dulce y marina. Adicionalmente, con este estudio se demostró la utilidad del análisis estadístico multivariado para el estudio de la hidrogeoquímica de acuíferos cársticos.

En el Capítulo tres; se integran los demás objetivos específicos a través de la aplicación de un Índice de Calidad del Agua (ICA) como herramienta de monitoreo para propósitos de consumo humano. El ICA fue desarrollado con el fin de comparar y determinar la

evolución de la calidad del agua en dos temporadas de lluvias. Los periodos de evaluación correspondieron a los años 2002 y 2012. Con base en los resultados se discute la fuente de los constituyentes químicos ahí presentes. Además se verifica el cumplimiento de las muestras de acuerdo con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. El mapeo de los constituyentes químicos fue desarrollado a través de las herramientas de análisis espacial de los Sistemas de Información Geográfica (ARCGIS).

En el Capítulo cuatro se discute, de manera general, la relación entre la composición química y la geología local. Adicionalmente se determina la distribución de las especies químicas presentes en la solución, actividad termodinámica, así como el estado de saturación de la solución con respecto a las distintas fases minerales a través de los Índices de Saturación.

Finalmente, en el Capítulo cinco se exponen las conclusiones finales de este trabajo.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso natural muy importante en países como México con extensas regiones áridas y semiáridas donde el subsuelo suele ser la principal y la única fuente permanente de agua. Alguna vez se pensó que el agua subterránea estaba protegida de la contaminación debido a que los materiales geológicos por los que se desplaza funcionaban como una especie de filtros de las impurezas que se infiltraban desde la superficie del terreno (CNA, 2006). Actualmente se reconoce que esta situación no es completamente válida, por lo que en donde haya contaminación, existe el riesgo de que el agua subterránea se contamine, tornándola no apta para el consumo humano.

En la región sureste de México se capta alrededor de 50% de la precipitación anual del país; se constituye como la zona de captación de agua dulce de mayor importancia, considerando que México únicamente tiene acceso a 0.1% de las reservas del vital líquido a nivel mundial (Alcocer & Escobar, 1996). Dentro de esta región, en la Península de Yucatán (PY), como en cualquier otra zona de carst, el acuífero es la principal fuente de abastecimiento para todas las actividades humanas y a su vez es altamente vulnerable a la contaminación. Los acuíferos cársticos se caracterizan por cuevas, sumideros y otras heterogeneidades geológicas creadas por la disolución de rocas carbonatadas o evaporíticas. Las aguas subterráneas y los contaminantes en estos sistemas son transportados rápidamente a través del acuífero a grandes distancias.

A lo largo de la Península, la demanda de agua subterránea y los problemas de contaminación han ido en aumento. El acelerado y desordenado desarrollo poblacional de las ciudades, principalmente las del Estado de Quintana Roo, constituyen un serio riesgo para la calidad del agua subterránea; ya que en muchas de ellas no se cuenta con cobertura de drenaje y saneamiento. En el mejor de los casos, las viviendas solo cuentan con fosas sépticas. Las aguas residuales a menudo no se tratan, y por lo general se inyectan al acuífero, por ejemplo, a través de la infiltración de los tanques sépticos y la inyección directa en la zona saturada (ASK, 2003; Beddows, 2002; Beddows *et al.*, 2007). Al mismo tiempo, las actividades agrícolas se han incrementado sobre todo hacia la región Sur del Estado de Quintana Roo (Mazzotti *et al.*, 2005), lo que representa un riesgo más de contaminación de las aguas subterráneas por la falta de control en la aplicación de agroquímicos.

Es en esta región sur (área de estudio) donde la disolución de la roca compuesta de carbonato de calcio (CaCO_3) junto con la presencia de ácido carbónico (HCO^-); producto de la reacción entre el CO_2 y el agua (H_2O) (Suárez & Rivera, 2000) propician zonas de gran permeabilidad debido al desarrollo de fallas o fracturas y conductos de disolución lo cual no permite la formación de corrientes superficiales a excepción del Río Hondo que divide políticamente al país de México y Belice (Gutiérrez y Cervantes, 2008).

De acuerdo a la regionalización de las cuencas hidrográficas de México, esta zona forma parte de las sub-subregiones RH33-A “Bahía de Chetumal y otras” y la RH33-B “Cuencas Cerradas”. Se contempla en los límites políticos de los municipios de Othón

P. Blanco, Bacalar, Felipe Carrillo Puerto y José María Morelos. En la primera subregión se pueden encontrar cuerpos de agua superficiales de carácter perenne como son el Río Hondo, y de carácter intermitente como son los Ríos Azul, Escondido y Ucúm; y lagunas como la de Bacalar, San Felipe, Mosquitero, Chile Verde, Nohbec y La Virtud. En la segunda, no existen corrientes superficiales, únicamente se observan las lagunas de Chunyaxché, Chinchancanab, Campechen, Boca Paila, Paytoro, Ocom y Esmeralda (JICA, 2004; CNA, 2009).

La situación meteorológica se ve fuertemente influenciada por la presencia de tormentas y huracanes (CNA, 2007). La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre. Las lluvias extremas influyen directamente en los procesos geoquímicos del agua subterránea. Se sabe que existe una fuerte relación con la disolución de minerales que a su vez producen cambios en la concentración de ciertos iones (Beddows, 2004). De esta manera, mientras que en la temporada de secas existe una baja dilución de los minerales ahí presentes favoreciendo la concentración iónica, en la temporada de lluvias las grandes precipitaciones inducen directamente en la dilución de éstos (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

En el subsuelo el agua sigue diferentes trayectorias de flujo, controladas por el desarrollo o evolución del carst. Hacia el sur de las subregiones (municipio de Othón P. Blanco), se tienen las rocas más antiguas: calizas y evaporitas Paleocénicas, su distribución superficial coincide con porción sur de la provincia Geomórfica “Cerros y Valles”. Esta región se caracteriza por la gran heterogeneidad que presenta el medio cárstico, sobre todo en sentido vertical (CCPY, 2012). Hacia la parte central (municipio

de Bacalar) se presentan formas alargadas escalonadas de diferente altitud que disminuyen desde la zona poniente y en dirección al este sureste. Estas formas se encuentran aparentemente controladas por fallas que favorecen la formación de Uvalas, poljes y depresiones ocupadas por lagunas. El patrón de flujo y descarga del sistema hidrológico muestra que se trata de un sistema dependiente totalmente de aportes pluviales y en función de su estructura puede establecerse que estos cuerpos de agua se comportan más como sistemas de vasos de rebosamiento en los cuales se vierte el manto freático; es decir, se trata de espacios en los cuales el manto freático de la región se encuentra expuesto más que de verdaderos cuerpos lagunares (CCPY, 2012).

1.1 Marco geohidrológico conceptual de la zona sur de Quintana Roo (RH33-A)

Si bien los estudios geohidrológicos en la zona sur realizados a la fecha han sido escasos como para presentar un marco conceptual que permita la observación de las diferentes unidades geológicas y descripción de las características litológicas, estructurales, estratigráficas, hidrológicas y fisiográficas de la región de estudio, la siguiente descripción se sustenta en la literatura citada a nivel regional y en cierta medida, a nivel local.

De acuerdo con el SGM (2007) la región sur (Figura 1.1) está compuesta hacia el sur-occidente (sur- oriente del Estado de Yucatán) por rocas geológicas del Cretácico, seguida de rocas del Mioceno que abarca las porción sur-central del Estado, posteriormente, más hacia el sur-oriente se localiza rocas pertenecientes al Plioceno

compuesta además por algunas porciones correspondientes al Holoceno, y ya en la franja costera en el denominado “Corredor Costa Maya” se puede observar rocas pertenecientes al Pleistoceno.

De acuerdo a López-Ramos (1972) la RH33-A se ubica en la unidad fisiográfica “Planicie Central” caracterizada por terrenos planos ligeramente rugosos u ondulados. Se identifica por una superficie cárstica con un escenario de erosión dentro de su ciclo geomorfológico donde concurren pequeños lomeríos semi redondeados distribuidos en forma irregular y por otros alineados con orientación NE-SW limitados todos por zonas prácticamente planas y bajas. Consta de cavidades y conductos en las rocas calcáreas variando desde poros y fracturas, hasta grandes cavernas cuya profundidad va de los 12 m a los 30 m. Contempla además, numerosas depresiones paralelas a la costa considerada como dolinas menores producto del colapso de las cubiertas de las cavernas que cuando no poseen agua son conocidas como “sumideros”, y cuando el agua es visible se les conoce como “cenotes” (Lugo-Hubp *et. al.* 1992).

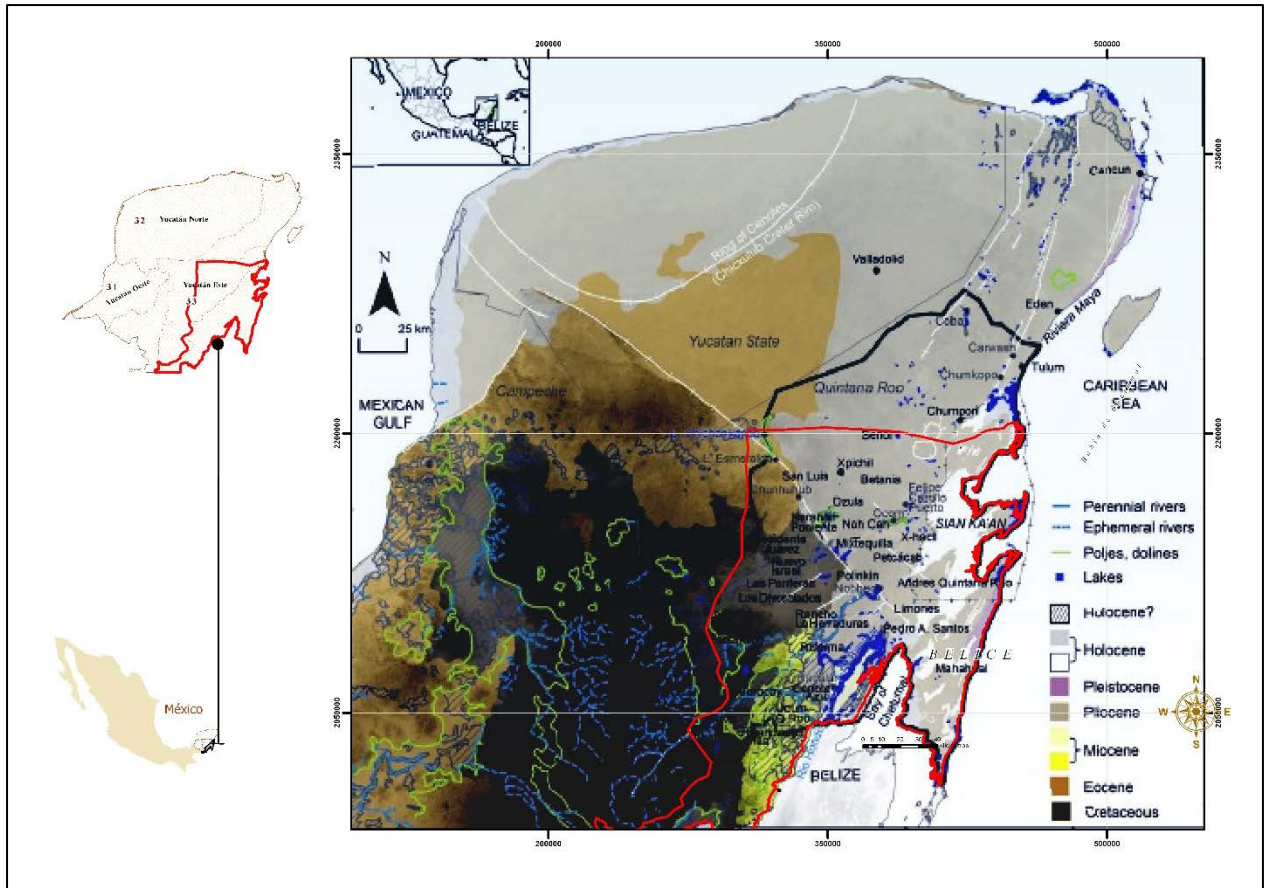


Figura 1.1 Geología de la Península de Yucatán modificada de SGM (2007).

Topográficamente divide en dos zonas de altitud; una correspondiente a las rocas del Plioceno-Holoceno-Pleistoceno con menos de 50 m; y otra hacia la parte de las rocas del Mioceno-Cretácico, con más de 300 m de altitud. En esta última existe un aumento gradual de nororiente a suroccidente. Lugo-Hupb *et al.* (1992) reportó diversos pisos de altitud en las rocas Plioceno-Holoceno-Pleistoceno controlados por fallas de tierra firme en el cual dominan las cuencas alargadas, sin desagüe superficial, rellenas de suelos salinos.

La geomorfología de las rocas del Plioceno, se caracterizan por ser una planicie costera que transita a partir de los límites del Cretácico y Mioceno hasta llegar a la línea de costa. Por su baja altura se encuentra inundable por cuerpos de agua superficial alineados en dirección NE-SO corriendo paralelamente a la línea de costa. No existe una red de drenaje definida, ya que es prácticamente una zona en donde concurren todos los escurrimientos y la presencia de lagunas lo confirman. Existen además, numerosas cavidades horizontales inundadas, tanto de origen freático, fosilizadas, como galerías inundadas y estalagmitas cubiertas por agua (Lugo-Hubp *et al.* 1992).

Las rocas del Cretácico (zona de colinas) parece tener una matriz de baja permeabilidad con una marcada geología evaporítica que pudiera ser originada a partir de la formación del Icaiché (Bauer-Gottwein *et al.* 2011; Lopez-Ramos, 1972). Los sedimentos del Cenozoico parecen ser causantes de la alta permeabilidad de las rocas del Mioceno (zona de transición) y las rocas del Plioceno-Holoceno (zona de planicie) en toda la profundidad del lente de agua dulce (Bauer-Gottwein *et al.* 2011).

La secuencia de rocas paleogénicas consisten principalmente en caliza, arenisca y evaporita del Paleoceno y Eoceno formada por capas con una posición prácticamente horizontal y donde el principal eje estructural tiene orientación NNE-SSO (Butterlin y Bonet, 1960; Velázquez, 1986) y su conjugado ortogonal NO-SE los cuales han contribuido significativamente a establecer una serie de aportes y drenaje de agua dulce desde la porción continental hacia el Sistema Bacalar-Río Hondo, la Bahía de Chetumal y Mar Caribe (CNA 2007). Al respecto, FONATUR (2004) reportó que hacia la porción nororiente (rocas del Pleistoceno), se reportaron depósitos de areniscas y

calizas arenosas con oolitos tipo Grainstone (eolianitas) y calizas conglomeráticas tipo Boudstone del Pleistoceno conformando depósitos superficiales y sub-superficiales hasta una profundidad estimada de 3 m. También se reportaron depósitos lagunares compuestos de limos, arcillas, bioclastos y materia orgánica, depósitos lacustres, representados por sedimentos de granulometría fina con materia orgánica cementada por carbonatos y depósitos litorales que consisten de arenas retrabajadas por la acción del mar con bioclastos de coral, espículas de equinodermos, gasterópodos, ostrácodos, pelecípodos y esponjas. Hacia el suroccidente (área del Cretácico) CNA (2007) reportó estructuras masivas formando extensas llanuras constituidas por calizas de coquina y estructura masiva de dureza media de color blanco y café grisáceo característico de la formación Bacalar. Más hacia el suroriente (rocas del Mioceno) cerca de la localidad de Juan Sarabia se reportaron rocas estratificadas (dolomías de color gris amarillento y calizas de color crema). CNA (2009) por su parte, reportó estratos superficiales e intercalados de arcilla plástica en la Zona Cañera de Álvaro Obregón.

De acuerdo con Weidie (1974) la estructura geológica regional consiste de la formación de Bacalar (Mioceno), la formación de Carrillo Puerto (Plioceno-Mioceno superior) y la formación de Calizas con moluscos (Holoceno-Pleistoceno). Las formaciones con escasa influencia son las antiguas (Eoceno), formación Eocénica indiferenciada, formaciones de mediana edad (Oligoceno) y la formación de Estero Franco. Parte de estas formaciones afloran hacia las rocas del Plioceno-Holoceno (carretera federal Limones–Cafetal), donde se han reportado afloramientos de las calizas microcristalinas de la formación Carrillo Puerto.

1.2 Contexto geohidrológico

Con base en la clasificación de zonas geohidrológicas establecidas por la CNA, la región sur se ubica en las zonas de Xpujil, Cuencas Escalonadas y la Región Costera. Se conoce por CNA (2006) que el espesor saturado de agua dulce decrece conforme se acerca a la costa. Así, en las partes altas (rocas del Cretácico) se han reportado espesores de agua dulce entre 400 y 800 m (CNA 2009), mientras que dentro de una distancia de 20 Km a partir de la costa el espesor es menor de 30 m (CNA 2006). Gondwe *et al.* (2010) reportaron que el nivel de agua subterránea coincide con las diferencias geológicas de los sedimentos expuestos en la superficie del suelo. Por ejemplo, en las rocas del Plioceno-Holoceno y Pleistoceno, debido a una alta conductividad hidráulica los niveles de agua subterránea son bajos (<3 msnm), mientras que en la geología del Cretácico donde la conductividad hidráulica es menor, los niveles de agua van de 4 a 260 msnm. La hidrografía de las rocas del Cretácico pudiera ser identificada como áspera con cambios abruptos en el nivel de agua (SMG 2007). Por lo contrario, la hidrografía del Plioceno-Holoceno es de transición ligera donde existen pequeños cambios en el nivel de agua (CNA, 2007; Gondwe *et al.* 2010). Aunque no existen datos del Mioceno se plantea un comportamiento similar en las rocas del Plioceno-Holoceno.

La orientación de los flujos subterráneos de las rocas del Cretácico y Mioceno a las rocas del Plioceno es de SO-NE, mientras que en las rocas del Plioceno el flujo del agua subterránea presenta un dirección de O-E (Perry *et al.* 2002; Gondwe *et al.* 2010). Estas direcciones se mantienen tanto en temporadas de lluvias como de secas.

Las rocas del Plioceno se identifican por una alta transmisividad y gradientes hidráulicos extremadamente bajos de 3 a 7cm/km (Back and Hanshaw 1970; Beddows 2004; Gondwe *et al.*, 2010; Marín 1990; Moore *et al.*, 1992). Por su parte, las rocas del Cretácico presenta una baja transmisividad con altos gradientes hidráulicos (Gondwe *et al.*, 2010).

El flujo de agua subterránea que circula a través de estas fracturas y conductos de disolución se encuentra a diferentes profundidades en el subsuelo. La tendencia es en relación a la mayor densidad de fracturamiento de las formaciones geológicas que lo conforman, moviéndose de las zonas de mayor precipitación hacia la costa, donde se realiza la descarga natural del acuífero a través de una serie de manantiales a lo largo de la misma (CNA, 2006), alimentando al Río Hondo, a los esteros y lagunas costeras (Laguna de Bacalar), que incluso llegan a producir descargas de agua dulce dentro de la Bahía de Chetumal (CNA, 2009) y al mar (CNA, 2007).

Desde el punto de vista geohidrológico las unidades descritas anteriormente, presentan características particulares para que el ciclo hidrológico actúe completamente en el área de estudio. Los aluviones formados por arcillas plásticas encontrados en las rocas del Cretácico permiten la formación de corrientes superficiales perennes e intermitentes, así como la formación y acumulación de cuerpos de aguas superficiales permanentes (CCPY, 2012). La cresta arcillo-calcárea permite el escurrimiento superficial del agua pluvial sin embargo, también se observa que estos sedimentos permiten la infiltración del agua pluvial y de escurrimiento propiciando un efímero recorrido (CNA 2009). Los niveles totales de las aguas subterráneas y la presencia de estructuras indican la

posibilidad de transferencias significativas de agua subterránea de las rocas del Cretáceo hacia las rocas del Plioceno (Gondwe *et al.* 2010).

La recarga del acuífero se realiza a través de la precipitación pluvial donde el agua se infiltra a través del terreno hasta llegar al acuífero. Las geoformas que funcionan como medios de absorción e infiltración recargando al sistema acuífero son los cenotes, las dolinas, las fracturas y las fallas y a través de los flujos subterráneos (CNA, 2001). Según reporta la UQROO (2002) la recarga del acuífero de esta región tiene lugar durante los meses de mayo a octubre. La recarga por unidad de área es más abundante en las rocas del Cretácico que en las del Mioceno, porque en aquella es menos densa la cobertura vegetal, más delgada la franja arcillosa y mayor el desarrollo cárstico superficial (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Del total de agua pluvial que recibe anualmente la región, alrededor del 82% se infiltra a través de las fisuras y oquedades de la losa calcárea, pero sólo una parte de este volumen ingresa al acuífero; el 18% restante, se distribuye entre la intercepción de la densa cobertura vegetal y la captación directa de los cuerpos de agua: áreas de inundación, lagunas y cenotes. Se estima que aproximadamente el 77.46% del agua infiltrada es retenida por las rocas que se encuentran arriba de la superficie freática y gradualmente extraída por la transpiración de las plantas, el otro 22.54% restante constituye la recarga efectiva del acuífero de la región (UQROO 2002). Cerca de la costa la tasa promedio de evapotranspiración excede la tasa promedio de precipitación (Gondwe *et al.*, 2010). Este patrón puede estar relacionado con los niveles de agua cercanos a la superficie que propician una escasa zona insaturada. Gondwe *et al.* (2010) en su estudio reportó valores de

evapotranspiración para toda la Península entre 937 y 995 mm/año. UQROO (2002) estimó la recarga entre 21% y 23% de la precipitación media anual para Chetumal y Valladolid. Beddows (2004) sugirió que la recarga debería ser mayor del 30% de la precipitación media anual en la costa.

1.3 Contexto hidrogeoquímico de la región

El acuífero se explota por medio de múltiples alumbramientos. Los tipos de captación son norias, pozos someros y pozos profundos que se utilizan para diferentes usos como son: el público urbano, el agrícola, servicios, entre otros (JICA, 2004).

Las investigaciones previas en esta región, se han enfocado al estudio de las características del subsuelo y a correlacionar los movimientos del agua subterránea con la estratigrafía (CNA 2007; 2008; 2009), incluso algunos estudios han aplicado modelos para simular las condiciones del acuífero (CCPY 2012), pero hasta la fecha no se tienen trabajos que relacionen la geología, las direcciones de los flujos del recurso hídrico y la química del agua en un solo estudio que integre los conocimientos de varias disciplinas para tener un mejor entendimiento del acuífero. La hidrogeoquímica es una herramienta que une los conocimientos anteriormente mencionados puesto que permite caracterizar el agua subterránea y aporta información para el estudio de las relaciones entre los diferentes sitios de muestreo (en sentido vertical y horizontal) del sistema acuífero. Este conocimiento puede ser desde determinar las zonas de recarga y descarga del acuífero, la dirección del flujo subterráneo, las mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos), los

fenómenos de intrusión salina, el probable tipo de rocas a través de las cuales circula el agua, el origen del agua subterránea, hasta el tiempo de residencia de las aguas subterráneas.

Cuando esta metodología se aplica en una secuencia de tiempo (en varias ocasiones durante un periodo establecido), se evalúa la evolución de las características químicas del recurso hídrico (Peña-Hernández *et al.*, 2012). Los estudios hidrogeoquímicos se basan en la medición de iones (mayores y menores), elementos traza y características físico-químicas del agua subterránea, para establecer patrones de comportamiento comunes entre muestras obtenidas de diferentes sitios del acuífero. Los iones mayoritarios que participan en su determinación son los cationes; calcio (Ca_2^+), magnesio (Mg_2^+), sodio (Na^+) potasio (K^+), los aniones; bicarbonatos (HCO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y cloruros (Cl^-), así como los parámetros de campo; conductividad eléctrica, temperatura, contenido de oxígeno disuelto y el pH (Custodio y Llamas, 1983; Cuevas *et al.*, 2001) (Tablas 1.1 y 1.2).

Tabla 1.1. Fuentes, comportamiento y significancia de los cationes en el agua.

Ion	Fuentes	Comportamiento y significancia en el agua
-----	---------	---

Ion	Fuentes	Comportamiento y significancia en el agua
CALCIO	<p>Calcita y aragonita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), yeso ($\text{CaSO}_4$), fluorita ($\text{CaF}_2$) y piroxeno ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) (Hem 1970; Hounslow 1995).</p>	<p>En las aguas naturales representa el principal catión debido a su gran tamaño (0.99 Amstrong); su concentración está controlada por los procesos de precipitación-disolución en el sistema carbonato-bicarbonato (pCO_2 y pH) y oscila entre 10 y 250 mg/L (Hem 1970; Manahan 1991) en aguas dulces, mientras que en aguas de terrenos yesíferos las concentraciones pueden llegar a 600 mg/L. Además, en conjunto con el magnesio causan la mayor parte de la dureza en el agua (Sawyer <i>et al.</i> 2001).</p>
MAGNESIO	<p>Minerales tales como dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). En rocas ígneas puede estar presente en minerales ferromagnésicos tales como: olivino, piroxeno.</p>	<p>Tiene propiedades similares al Ca^{2+}, excepto que tiene un radio atómico de 0.65 Amstrong. Su concentración es usualmente menor que el Ca^{2+} (1-100 mg/L). En terrenos calcáreos pueden rebasarse los 100 mg/L y en terrenos evaporíticos pueden alcanzar valores de 1000 mg/L. Asimismo, si se encuentra en altas concentraciones confiere al agua propiedades laxantes y sabor amargo. Su determinación es por diferencia aritmética de los valores encontrados para la dureza total y la dureza de calcio (Manahan 1991).</p>
SODIO	<p>Halita (NaCl), algunos minerales como el feldespato y nahcolita (NaHCO_3), silicatos sódicos como albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y la nefalina ($\text{NaAlSiO}_4$) (Hounslow 1995).</p>	<p>Es el miembro más abundante del grupo metal-alkali. Es retenido en las superficies de los minerales (cationes con alta capacidad de intercambio iónico) por adsorción (Hem 1970). Hay muy pocas reacciones por el cual el Na^+ precipita. En baja concentración no afecta directamente, pero en altos niveles está asociado con la contaminación por intrusión salina (Manahan 1991). Su concentración es muy variable pudiendo alcanzar concentraciones de hasta 120,000 mg/L en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa los 100 ó 150 mg/L en aguas dulces.</p>

Ion	Fuentes	Comportamiento y significancia en el agua
POTASIO	Feldespatos potásicos (KAlSi_3O_8), mica ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) y en menor proporción leucita (KAlSi_2O_6) y silvita (KCl) (Hounslow 1995).	Es un elemento esencial para las plantas (Hounslow 1995). En aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/L, a excepción de algunas salmueras. En ocasiones, muy altas concentraciones pueden ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales (Lillo 2005).

Fuente: Modificado de Sánchez 2009

Tabla 1.2. Fuente, comportamiento y significancia de los aniones en el agua.

Ion	Fuentes	Comportamiento y significancia en el agua
CLORURO	Halitas (NaCl), evaporitas, salmueras (Hounslow 1995).	<p>El agua de lluvia puede ser una fuente importante de ion cloruro, en zonas de recarga próximas al litoral.</p> <p>El ion cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, tampoco es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, por lo que se le considera un buen trazador (Manahan 1991). Los rangos de concentraciones son de 10 a 250 mg/L en aguas dulces. El agua de mar tiene entre 18000 y 21000 mg/L. Las salmueras naturales pueden llegar a tener 220000 mg/L (saturación). En aguas donde el cloruro es el anión dominante, el catión predominante es el sodio (Lillo 2005).</p>

Ion	Fuentes	Comportamiento y significancia en el agua
CARBONATO Y BICARBONATO	<p>Disolución del anhídrido carbónico en el agua.</p> <p>Disolución de calizas y dolomitas, facilitada por el aporte de CO₂ y/o ácidos orgánicos o inorgánicos.</p>	<p>Estos iones dan alcalinidad al agua en el sentido que confiere capacidad de consumo de ácido al producir el tamponamiento del sistema.</p> <p>En aguas con pH > 8.3, la especie carbonatada dominante es el ion bicarbonato, con una concentración que suele variar entre 50 y 400 mg/L, aunque puede llegar a alcanzar valores de 800 mg/L (Lillo 2005). Concentraciones de hasta 1000 mg/L pueden encontrarse en aguas pobres en Ca⁺² y Mg⁺² o en aquellas donde se producen procesos de liberación de CO₂ (reducción de sulfatos).</p> <p>Su contenido depende de la fuente geológica y del pH (Sawyer <i>et al.</i> 2001). Raramente, las aguas subterráneas tienen un valor de pH menor de 4.5 lo que provocaría la transformación de los bicarbonatos a carbonatos en ácido carbónico (Ávila 2006).</p>
SULFATO	<p>Minerales como la piritita (FeS₂), yeso (CaSO₄) (Hounslow 1995).</p>	<p>Es químicamente estable en aguas aireadas y forma sales de baja solubilidad. Puede asociarse fácilmente con otros iones (Hem 1970). Es uno de los aniones más abundantes. En aguas dulces, su concentración varía de 2 y 150 mg/L. En aguas salinas, asociado al Ca⁺², puede llegar a 5000 mg/L; asociado al Mg⁺² y Na⁺¹, en salmueras, puede alcanzar hasta 200,000 mg/L. El agua de mar contiene alrededor de 3000 mg/L (Lillo 2005). Las aguas con elevado contenido en sulfato no quitan la sed y tienen sabor poco agradable y amargo. El ion sulfato por sí mismo o si va asociado a Mg⁺² o Na⁺¹ en cantidades importantes confiere propiedades laxantes.</p>
NITRATO	<p>Como parte del ciclo del nitrógeno conocida como nitrificación (Hounslow 1995).</p>	<p>Está presente en casi todas las aguas naturales en baja concentración. Arriba de 10 mg/L puede indicar contaminación por fertilizantes, aguas residuales municipales, fosas sépticas entre otros. En contraste con el ion amonio, puede moverse libremente a través del acuífero (Hounslow 1995). Su concentración varía de 0.1 a 10 mg/L, pero en aguas contaminadas puede llegar a 200 mg/L y en algún caso hasta 1000 mg/L. El agua de mar tiene alrededor de 1 mg/L o menos (Lillo 2005).</p>

Fuente: Modificado de Sánchez 2009

Tomando en consideración las características particulares de la región donde no existen cuerpos de agua superficiales a excepción del Río Hondo, donde la topografía, fisiografía, litología y geomorfología difieren significativamente a cortas distancias se justifica el investigar el comportamiento del agua en el subsuelo, buscando generar conocimiento que permita valorar y proteger el recurso hídrico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas del acuífero cárstico sur del Estado de Quintana Roo, México.

1.4.2 Objetivos específicos

Caracterizar en términos físicos y químicos las aguas subterráneas del acuífero sur del Estado de Quintana Roo así como analizar los factores que influyen en la variabilidad espacial y su posible relación con otros factores hidrogeológicos y ambientales.

Determinar los procesos que afectan la hidroquímica de las aguas subterráneas de manera espacial y temporal.

Clasificar la calidad del agua subterránea para uso y consumo humano mediante la elaboración de un Índice de Calidad del Agua (ICA) e identificar las posibles fuentes de contaminación.

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL SUR DEL ESTADO DE QUINTANA ROO, MÉXICO.

Este Capítulo ha sido publicado en la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas como:

Sánchez-Sánchez, J.A., Álvarez-Legorreta, T., Pacheco-Ávila, J.G., González-Herrera, R.A., Carrillo-Briebiezca, L., 2015 Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 32, núm. 1, p. 62-76.

Manuscrito recibido: Febrero 11, 2014.

Manuscrito corregido recibido: Noviembre 23, 2014.

Manuscrito aceptado: Noviembre 27, 2014.

Link: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57237105006>

Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México.

Hydrogeochemical characterization of groundwater in the southern part of Quintana Roo, Mexico

Joan Alberto Sánchez-Sánchez^{1*}, Teresa Álvarez-Legorreta¹, Julia G.

Pacheco-Ávila², Roger A. González-Herrera², Laura Carrillo-Bibriezca¹

1 El Colegio de la Frontera Sur, Ave. Centenario Km 5.5. Chetumal, Quintana Roo México.

*joan_ss21@yahoo.com

2 Universidad Autónoma de Yucatán Facultad de Ingeniería, Av. Industrias no Contaminantes por Periférico Norte Apartado Postal 150 Cordemex, 97310, Mérida, Yucatán, México.

RESUMEN

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, en los meses de octubre y noviembre de 2012 (temporada de lluvias) se muestrearon 53 pozos de abastecimiento con una profundidad promedio de 29 m. Los parámetros físicos medidos en campo fueron pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales. Los constituyentes químicos analizados incluyeron los cationes calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+) y los aniones bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-) y nitrato (NO_3^-). Estadísticos descriptivos,

matrices de correlación, análisis de factores, junto con el análisis de conglomerados se utilizaron para obtener una comprensión de los procesos hidrogeoquímicos en el área de estudio. El área de estudio se caracteriza por presentar una heterogeneidad en cuanto a sus características hidrogeológicas (karst), con cambios litológicos y geológico-estructurales que dan lugar a zonas acuíferas independientes de los acuíferos de extensión regional. De acuerdo con el análisis geoquímico a través del diagrama de Piper se observaron cuatro tipos de aguas predominantes en el área de estudio: cálcica-bicarbonatada (Ca-HCO_3), mixta cálcica magnésica clorurada (mixta Ca-Mg-Cl), cálcica sulfatada (Ca-SO_4) y sódica clorurada (Na-Cl). A través del análisis de conglomerados se identificaron siete grupos predominantes en el área de estudio. Dichos grupos muestran valores contrastantes en aprovechamientos cercanos, propiciados por la propia heterogeneidad del medio acuífero en donde el agua transita por diferentes rocas: calizas, dolomías y evaporitas. Se identificaron además tres factores que explican el 74.68% de la varianza observada en la composición química. Los parámetros que definen estos factores 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.

Palabras clave: karst; estadísticos multivariados; hidrogeoquímica; aguas subterráneas; Quintana Roo; México.

ABSTRACT

In order to identify the processes controlling the geochemical evolution of groundwater in the southern part of the state of Quintana Roo, Mexico, 53 drinking water wells were sampled in the months of October and November 2012 (rainy season). Physical parameters measured in the field were pH, temperature, electrical conductivity and total dissolved solids. Chemical constituents analyzed include the cations calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+) and the anions bicarbonate (HCO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}), chloride (Cl^-) and nitrate (NO_3^-). Descriptive statistics, correlation matrices, factor analysis, along with cluster analysis were used to gain an understanding of the hydrogeochemical processes operating in the study area. The study area is characterized by heterogeneity in their hydrogeological characteristics (karst), with lithological and geological-structural changes that result in water-bearing zones isolated from the aquifers of regional extent. Four predominant types of water were identified in the study area: calcium-bicarbonate type (Ca-HCO_3), mixed calcium-magnesium-chloride type (mixed Ca-Mg-Cl), sulfate-calcium type (Ca-SO_4) and sodium-chlorided type (Na-Cl). Through cluster analysis, seven predominant groups were identified in the study area. These groups show contrasting values for nearby sites, favored by the heterogeneity of the aquifer medium where the water flows through different rocks: limestone, dolomite and evaporite. Three factors were identified through factor analysis, accounting for 74.68% of the cumulative variance. The parameters associated to these factors indicate that the dominant

hydrogeochemical processes in the study area are (1) the dissolution of limestone and dolomite and ionic exchange; (2) mixing with seawater; and (3) anthropogenic nutrient input.

Key words: karst, hydrogeochemistry, multivariate statistics, groundwater, Quintana Roo, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La composición química de las aguas subterráneas es controlada por muchos factores que incluyen la composición de la precipitación, la mineralogía de las cuencas hidrográficas y los acuíferos, el clima y la topografía (Güler *et al.*, 2002). Estos factores se combinan para crear diversos tipos de agua que cambian espacial y temporalmente. Esto se explica a través de la evolución química que sufre el agua subterránea mediante la interacción con los minerales de los acuíferos o las mezclas internas entre los diferentes tipos de aguas a lo largo de las trayectorias de flujo en el subsuelo (Kumar *et al.*, 2009). Los procesos hidrogeoquímicos, en ese sentido, 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 (Custodio, 1983; Pernía-Llera *et al.*, 1993). Frecuentemente es determinada a través de la medición de constituyentes fisicoquímicos tales como los cationes: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) potasio (K^+) y los aniones bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-) y nitrato (NO_3^-) (Custodio y Llamas, 1983; Cuevas *et al.*, 2001). El sur del Estado de Quintana Roo se caracteriza por la presencia de rocas calcáreas que, entre otras cosas, se distinguen por sufrir un proceso altamente dinámico conocido como karstificación, el cual consiste en la disolución de rocas

(compuestas de CaCO_3), en presencia de ácido carbónico (HCO_3^-), producto de la reacción entre el bióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) (Suárez-Morales y Rivera-Arriaga, 2000). Estas características propician zonas de gran permeabilidad debido al desarrollo de fracturas y canales de disolución por donde se filtra rápidamente el agua al acuífero, espesores de suelo muy reducidos y limitada existencia de corrientes de agua superficiales (Matthes, 2008; Marín *et al.*, 2001; Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Granel-Castro y Gález-Hita, 2002; Escolero *et al.* 2002; Perry *et al.*, 2002). Debido a estas características existe un riesgo de contaminación del acuífero por las diversas actividades humanas, por lo que es importante el estudio de las características hidrogeoquímicas del acuífero en la región, con la finalidad de identificar los procesos que controlan la evolución geoquímica de las aguas subterráneas, ya que este recurso hídrico representa la única fuente de agua dulce para uso y consumo humano. El enfoque de este estudio incluye representaciones gráficas convencionales y técnicas estadísticas multivariadas como el análisis de factores y de conglomerados con el objetivo de caracterizar en términos físicos y químicos las aguas subterráneas de la Subregión Hidrológica No. 33-A y poder ampliar el conocimiento hidrogeoquímico del acuífero kárstico así como analizar los factores que influyen en la variabilidad espacial y su posible relación con otros factores hidrogeológicos y ambientales. Los análisis multivariados fueron empleados por su utilidad como herramienta para reducir y organizar grandes conjuntos de datos hidrogeoquímicos en grupos con características similares y luego relacionarlos con cambios específicos en el

proceso hidrológico. Las técnicas estadísticas multivariadas han sido ampliamente aceptadas en la evaluación de los procesos hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas en sistemas kársticos (Holland y Witthüser, 2009; Abello *et al.*, 1992; Moral *et al.*, 2008).

Características del área de estudio

El área de estudio forma parte de la Subregión Hidrológica No. 33-A conocida como Bahía de Chetumal y Otras (Figura 2.1) (UQROO, 2002). Se enmarca geográficamente en las coordenadas 17° 49' a 20° 12' de latitud norte y entre los 87° 30' y los 89° 27' de longitud oeste, cubriendo una extensión total de 37,896,420 km². Colinda al occidente con la Subregión Hidrológica RH33-B (Cuencas Cerradas-B), hacia el nororiente con el mar Caribe y hacia el suroriente por una línea que está definida por la bahía de Chetumal, por el límite nacional con Belice en un tramo de límite natural constituido por el río Hondo y enseguida por el límite político con Belice (UQROO, 2002). El área de estudio contiene un notable contraste topográfico: hacia el norte y en la franja costera se observa un relieve topográfico plano con elevaciones que van de 0 a 20 m s.n.m., mientras que al sur-suroccidente se observa un relieve ondulado con elevaciones que van de 50 a 340 m s.n.m. (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). En esta última zona concurre un aumento gradual de nororiente a suroccidente con elevaciones de 20 a 50 m s.n.m. (Lugo *et al.*, 1992). La temperatura promedio anual oscila entre 25.6 °C y 26.7 °C, con una temperatura máxima entre 36 °C y 38 °C y mínima entre 12 °C y

14 °C (BETSCO, 2012). La región cuenta con un clima aw2(i), cálido subhúmedo con abundantes lluvias en verano y parte de invierno (CNA, 2006). La precipitación media anual es de 1365 mm, casi 600 mm más alta que el promedio nacional, el cual es 772 mm (JICA, 2004; Alcocer *et al.*, 1999). La temporada de lluvias se presenta en los meses de mayo a octubre, con una lámina media mensual desde 150 a 220 mm, mientras que la temporada de estiaje o secas comprende los meses de noviembre a abril, durante los cuales las láminas llovidas son menores que 60 mm (UQROO, 2002).

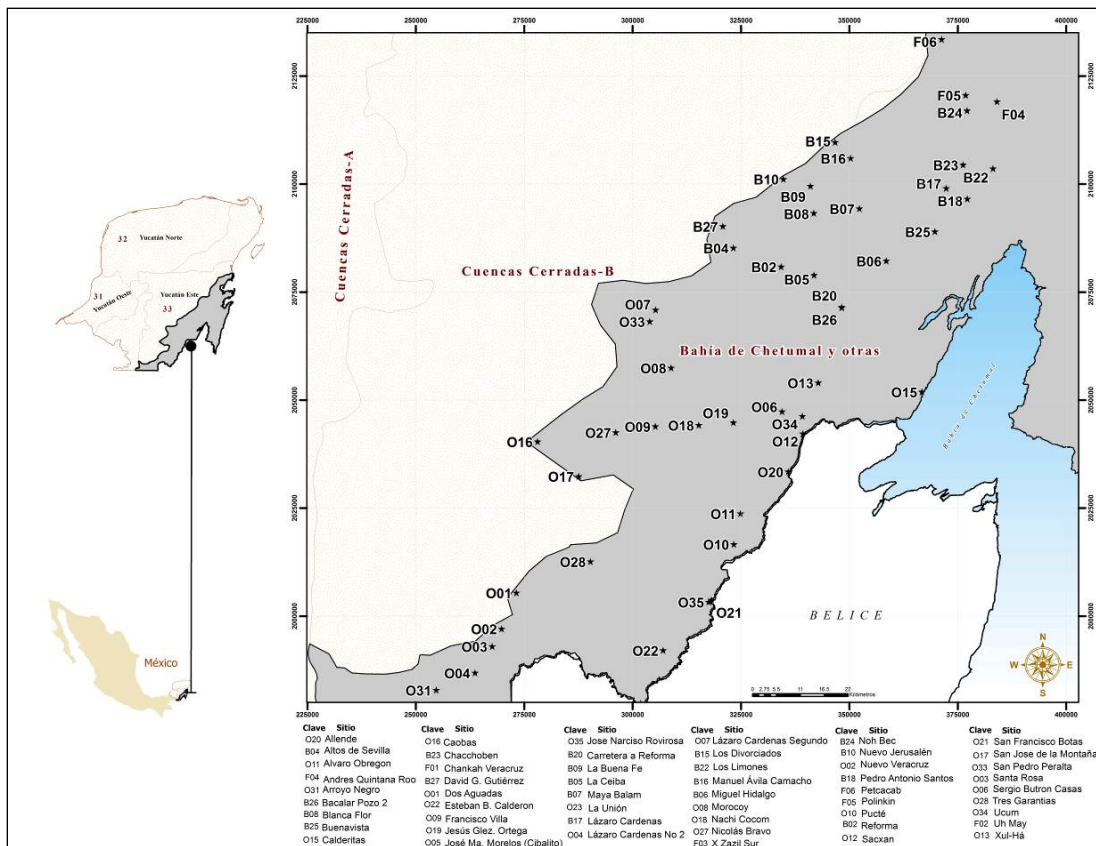


Figura 2.1. Ubicación geográfica del área de estudio. Los puntos negros indican los sitios de muestreo. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Marco hidrogeológico

El área de estudio se define como una unidad geológica cubierta casi en su totalidad de sedimentos calcáreos de origen marino del Paleoceno al Plioceno (Butterlin y Bonet, 1960; López-Ramos, 1973).

Se encuentra constituida de evaporitas intercaladas con rocas calizas y minerales como la dolomita, aragonita, yeso y halita (Isphording, 1975). Estas rocas carbonatadas 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, que a su vez resultan en la presencia de un sistema acuífero kárstico maduro con amplias fisuras, fracturas y cuevas (JICA, 2004; Hausman, 2009; Beddows *et al.*, 2002).

Fisiográficamente, el área de estudio se ubica en la unidad “Planicie Central” caracterizada por tener una superficie plana ligeramente rugosa y ondulada (López-Ramos, 1973). Se identifica por una superficie kárstica con un escenario de erosión dentro de su ciclo geomorfológico donde concurren pequeños lomeríos semirredondeados distribuidos en forma irregular y por otros alineados con orientación NE-SO, limitados por zonas prácticamente planas y bajas (CCPY,

2012). Asimismo, existen cavidades y conductos en las rocas calcáreas variando desde poros y fracturas, hasta grandes cavernas cuyas profundidades van de los 12 m a los 30 m. Contempla además numerosas depresiones paralelas a la costa (dolinas menores) que resultan del colapso de las cubiertas de las cavernas que cuando no poseen agua son conocidas como “sumideros”, y cuando el agua es visible se les llama “cenotes” (Lugo *et al.*, 1992). Estos últimos, al igual que las dolinas, las fracturas y las fallas, funcionan como medios de absorción e infiltración recargando al sistema acuífero (CNA, 2001). Estratigráficamente, la unidad sedimentaria más antigua que aflora en región de estudio (Figura 2.2) corresponde a la Formación Icaiché (TpaCz-Y) del Paleoceno constituida por calizas con yesos, horizontes de arcillas y fragmentos de sílice (SGM, 2007). Esta unidad es sobreyacida discordantemente por la Formación Estero Franco (TmCz-Do) del Mioceno, constituida por calizas y dolomías y horizontes de yeso, la cual cambia de facies lateralmente a la Formación Bacalar (TmCz), formada por caliza, que a su vez es sobreyacida concordantemente por calizas y coquinas de la Formación Carrillo Puerto (TmplCz- Cq) 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. Y cubriendo indistinta y parcialmente a todas las unidades se tienen depósitos aluviales (Qhoal) constituidos por limos y arcillas; depósitos lacustres (Qhola) formados por una cantidad de restos vegetales

mezclados con limos y arcillas, y depósitos palustres (Qhopa) formados por arcillas y limos con alto contenido de materia orgánica.

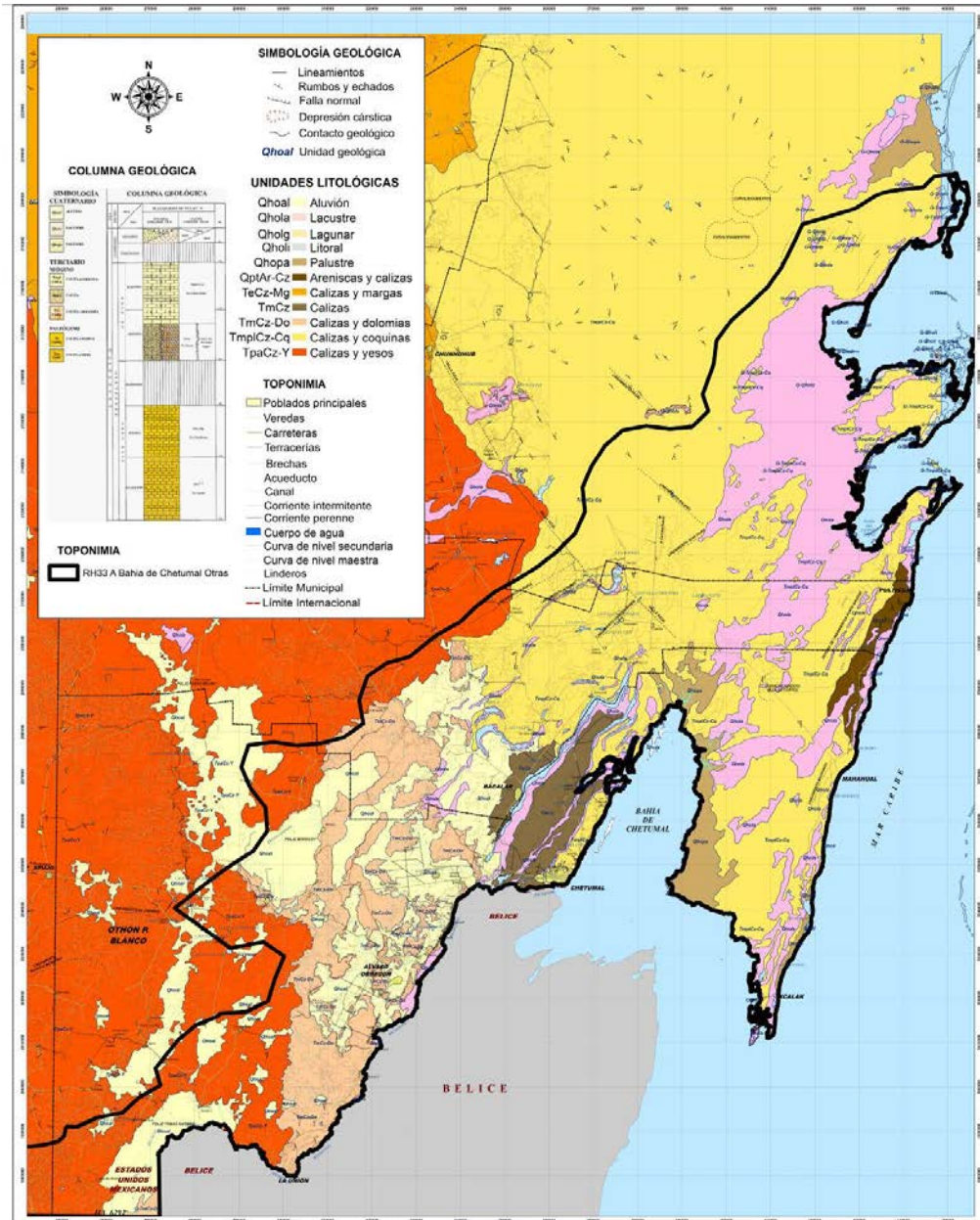


Figura 2.2. Geología de la Península de Yucatán modificada de SGM (2007). El contorno en negro representa la Subregión Hidrológica No. 33-A conocida como Bahía de Chetumal y Otras. El sistema de coordenadas se muestra en

Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Las unidades litológicas se encuentran prácticamente sin deformación significativa (SGM, 2007). La secuencia de rocas paleógenas que aflora consiste principalmente en calizas, areniscas y evaporitas del Paleoceno que forman capas con una posición prácticamente horizontal, cuyo eje estructural tiene orientación NNE-SSO (Butterlin y Bonet, 1962; López-Ramos, 1972; Velázquez-Aguirre, 1986; Lugo-Hubp et. al., 1992) y su conjugado ortogonal NO-SE. Estas estructuras han contribuido significativamente a establecer una serie de aportes y drenaje de agua dulce desde la porción continental hacia la costa (CNA, 2007).

De las diferentes formaciones que componen la estructura geológica regional presentadas por Weidie (1974) destacan con mayor influencia en la región de estudio la Formación Bacalar, la Formación Carrillo Puerto y la Formación Estero Franco. Parte de estas formaciones aflora en el área de Limones–Cafetal (Figura 2.2), donde se han reportado afloramientos de las calizas microcristalinas de la Formación Carrillo Puerto (SARH, 1989) y hacia la zona del sistema lacustre de Bacalar se reportan calizas poco compactas y margas de la Formación Bacalar (CNA 2007). Asimismo, se ha reportado un lineamiento denominado Chetumal, que presenta una dirección de NE 26° SO y cuya traza presenta una longitud de 40 km, afectando a rocas de la Formación Carrillo Puerto; del mismo modo, se reportan los lineamientos Río Escondido, El Chorro y Narciso Mendoza ubicados en las porciones internas de la zona sur del estado, al oeste del Río Hondo

(CCPY, 2012). De acuerdo con las características físicas y litológicas de las rocas que afloran hacia la porción sur (carretera federal Ucum-J. González Ortega) de la región de estudio (Figura 2.2), el área se encuentra ubicada en un acuífero de calizas de características variadas y depósitos aluviales, cuya permeabilidad depende de la litología y es mayor en porciones con fracturamiento y karsticidad (permeabilidad secundaria) y menor en los estratos de caliza masiva, por lo que en general presenta cambios laterales y verticales de manera irregular (Perry *et al.*, 2009; IMEXSUR, 2012). Por su parte, la litología reportada hacia la región Costa Maya (Figura 2) se identifica por un comportamiento homogéneo hasta los 12 m, distinguiéndose de manera general una secuencia calcárea-arenosa de baja porosidad y escasa disolución. A partir de los 19 m y hasta los 50 m, la caliza se vuelve más porosa y más permeable debido a que aumenta su grado de disolución, lo que genera conductos preferenciales de circulación de agua subterránea (FONATUR, 2004).

En general, la mayor parte de la región carece de un sistema de drenaje superficial y solo en algunas áreas se ha formado una red hidrológica desintegrada no muy bien definida que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficial. Gran parte de la precipitación pluvial se infiltra al subsuelo a través de fracturas, oquedades y conductos kársticos en las calizas y evaporitas (CCPY, 2012).

Posteriormente es extraída mediante la evapotranspiración y el resto fluye por el subsuelo alcanzando las costas por donde es descargada al mar. Dominan las

cuencas alargadas, sin desagüe superficial; además, son comunes las grandes depresiones con bordes escarpados ocupadas por lagunas salobres (Lugo et. al., 1992). El espesor saturado de agua dulce decrece desde el interior hacia la costa. Así, en las partes con mayor altitud en donde se han reportado profundidades mayores a los 100 m ((Bauer-Gottwein, et. al., 2011) los espesores de agua dulce alcanzan entre 400 m y 800 m (CNA, 2009), mientras que dentro de una distancia de 20 km a partir de la costa el espesor es menor que 30 m (CNA 2006). La recarga del acuífero de esta región tiene lugar durante los meses de mayo a octubre (UQROO, 2002). La recarga por unidad de área es más abundante en las rocas del Paleoceno que en las rocas del Mioceno, porque en aquéllas es menos densa la cobertura vegetal, más delgada la franja arcillosa y mayor el desarrollo kárstico superficial (UQROO 2002; (Bauer-Gottwein, et. al., 2011). El acuífero se explota por medio de múltiples alumbramientos; los tipos de captación son norias, pozos someros y pozos profundos que se utilizan para diferentes usos como son el público urbano, el agrícola y los servicios, entre otros (JICA, 2004).

En el subsuelo, el agua sigue diferentes trayectorias de flujo controladas por el desarrollo o evolución del karst profundo (Velázquez-Aguirre, 1986). El agua subterránea se presenta tanto en la matriz rocosa como en los conductos de disolución a diferentes profundidades (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). La dirección del flujo de agua subterránea se presenta de SO-NE en las zonas de mayor altitud y de O-E hacia la costa (Marín *et al.*, 2001; CNA, 2001, 2007, 2009; Perry *et al.*, 2002; JICA, 2004; Charvet 2009; Gondwe *et al.*, 2010). La tendencia es en

relación a la mayor densidad de fracturamiento de las formaciones geológicas que lo conforman (Figura 2.3), moviéndose de las zonas de mayor precipitación hacia la costa, constituyendo hacia esta zona su área de descarga y alimentando a su vez al sistema Bacalar-Río Hondo, la Bahía de Chetumal y Mar Caribe (Velázquez-Aguirre, 1986; CNA, 2007).

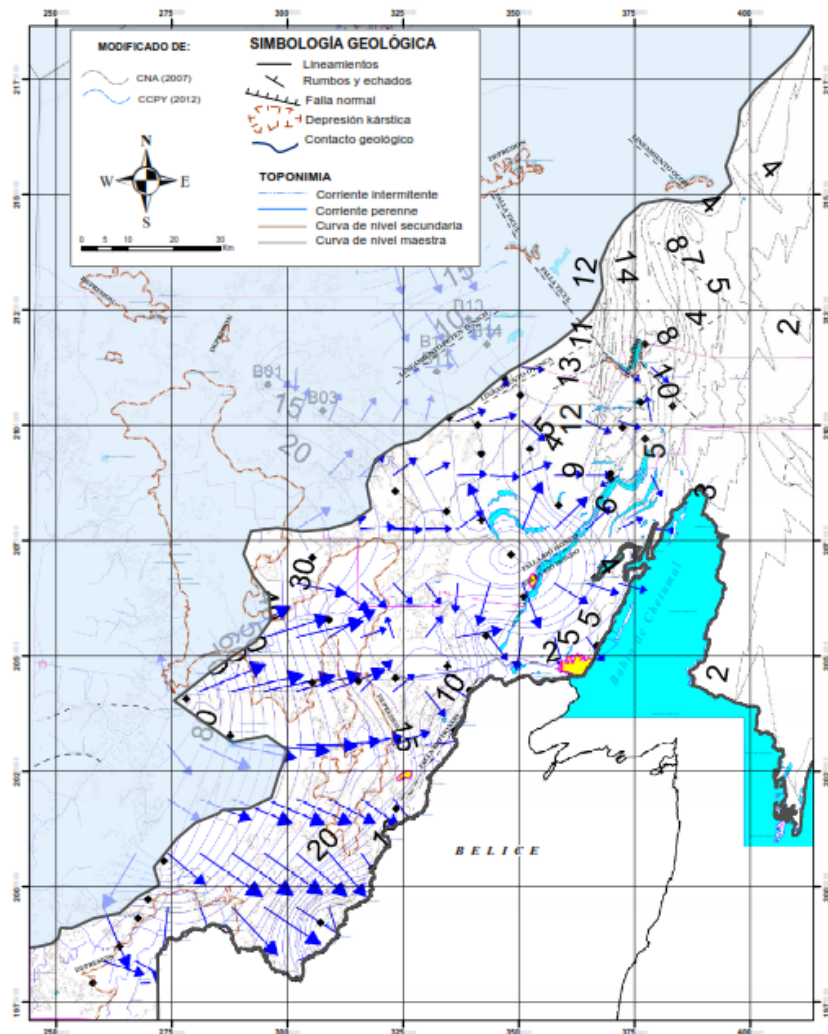


Figura 2.3. Mapa de flujo de agua subterránea a escala regional modificado de ASK (2003). Las flechas indican las direcciones de flujo de agua subterránea según la referencia respectiva. El contorno en negro representa

la Subregión Hidrológica No. 33-A. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

En el área de estudio se identifican dos regiones de acuíferos. La primera corresponde a un acuífero compuesto por rocas carbonatadas del período Paleoceno ubicado hacia las porciones con mayor altitud del sur-suroccidente; la segunda, está compuesta por rocas carbonatadas del período del Mioceno-Plioceno distribuida a largo de la costa (JICA, 2004). De acuerdo con Marín *et al.* (2004), ambas regiones se pueden describir como acuíferos de porosidad triple donde el flujo del agua subterránea circula a través de la matriz, fracturas y un sistema de cavernas interconectadas con orientación NNO-SSE, casi perpendicular a la costa. Las rocas del Paleoceno se caracterizan por la gran heterogeneidad que presenta el medio kárstico, sobretodo en sentido vertical, lo que supone la existencia de pequeñas unidades acuíferas independientes de los acuíferos de extensión regional (CCPY, 2012). Estas facciones son conocidas como acuíferos colgados y se identifican porque su nivel estático está a menor profundidad que el acuífero regional; además, el agua que contienen es por lo general de baja salinidad, lo que indica reciente infiltración (Velázquez-Aguirre, 1986). Gondwe *et al.* (2010) reportaron elevaciones del nivel estático del agua de 4 hasta 260 m s.n.m., con cambios abruptos en el nivel de agua en algunas localidades (Presidente Juárez; Figura 2.2) que reaccionan inmediatamente a los eventos de precipitación local. Igualmente se ha reportado la existencia de

porciones acuíferas confinadas, en donde se presenta el fenómeno de artesianismo (CNA, 2009). Por otra parte, las rocas del Mioceno-Plioceno corresponden a acuíferos kársticos de tipo freático muy permeables con una transmisividad calculada de 3×10^{-7} m²/día y gradientes hidráulicos de 5.19×10^{-5} hasta 9.25×10^{-5} (Beddows, 2004). Los niveles de agua subterránea en estos últimos son bajos (<3 m s.n.m.) y de transición ligera (CNA, 2007; Gondwe et. al, 2010).

METODOLOGÍA

Un total de 53 muestras de agua subterránea (Tabla 2.1) fueron colectadas de pozos de abastecimiento uniformemente distribuidos en el área de estudio, los cuales tienen una profundidad promedio de 29 m. La colecta se realizó durante los meses de octubre y noviembre del año 2012, correspondientes a la temporada de lluvias. Cada sitio fue localizado usando un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) marca Magellan Mobile Mapper 6 empleando el sistema de coordenadas UTM (del inglés Universal Transverse Mercator). Las muestras se recolectaron después de bombear durante 10 min. Esto se hizo para eliminar el agua subterránea que pudiera estar almacenada en las tuberías. Los contenedores usados para la toma de muestras de cationes y aniones fueron envases de polietileno de 2 litros. Todas las muestras se transportaron y preservaron a una temperatura entre 4 °C y 10 °C hasta la realización de su análisis (NOM-014-SSA1-1993). Las mediciones de temperatura (T), pH y

conductividad eléctrica (CE) fueron tomadas en campo inmediatamente después de la colección de las muestras usando un equipo Hydrolab Quanta G. Subsecuentemente, las muestras fueron analizadas en el laboratorio para sus constituyentes químicos: alcalinidad total y alcalinidad a la fenolftaleína por titulación con ácido sulfúrico 0.02 N (NMX-AA-36-SCFI-2001), dureza total y dureza de calcio por titulación con EDTA (NMX-AA-072-SCFI-2001), cloruros por titulación con nitrato de plata (NMX-AA-073-SCFI-2001), sólidos disueltos totales (SDT) por el método gravimétrico (NMXAA-034-SCFI-2001), nitratos por el método de reducción con cadmio cuperizado (NMX-AA-079-SCFI-2001), sulfatos por el método turbidimétrico (NMX-AA-074-1981), sodio por espectrometría de absorción atómica (NMX-AA-051-SCFI-2001) y potasio por el método turbidimétrico (Hach 8049). Los resultados se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características fisicoquímicas de los aprovechamientos de agua subterránea en la Subregión Hidrológica

No. 33-A

Clave	Sitio	Coordenadas (UTM)		pH	T (°C)	CE (μ S/cm)	SDT (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
		X	Y												
B02	Reforma	334278	2080878	7.0	28.5	980.0	785.0	36.0	7.4	43.7	104.0	51.0	51.0	490.4	0.4
B04	Altos de Sevilla	323245	2085225	7.4	27.0	1127.0	716.0	41.0	3.9	35.7	101.2	108.0	35.0	418.5	0.1
B05	La Ceiba	341872	2078944	6.7	26.5	1415.0	1012.0	92.0	5.5	45.7	128.0	128.0	190.0	402.6	0.1
B06	Miguel Hidalgo	358514	2082213	7.3	26.3	967.0	684.0	69.0	4.5	31.6	84.0	69.0	100.0	329.4	0.2
B07	Maya Balam	352319	2094329	7.0	28.3	1590.0	1198.0	132.0	5.2	42.5	156.0	98.0	370.0	428.2	0.1
B08	Blanca Flor	341804	2093278	7.1	27.7	877.0	632.0	15.0	2.8	46.9	82.0	35.0	20.0	446.5	0.5
B09	La Buena Fe	341043	2099540	7.0	27.3	1760.0	1168.0	151.0	4.6	57.8	120.0	197.0	150.0	540.5	0.1
B10	Nuevo Jerusalén	334801	2101153	7.0	27.2	1600.0	956.0	112.0	5.3	47.4	86.0	98.0	110.0	477.0	0.2
B15	Los Divorciados	346735	2109676	7.1	26.3	1530.0	1040.0	98.0	5.2	65.6	116.0	137.0	240.0	438.0	0.1
B16	Manuel Ávila Camacho	350268	2105980	6.9	27.3	2340.0	1576.0	235.0	8.5	64.4	134.0	333.0	260.0	508.7	0.1
B17	Lázaro Cárdenas	372332	2099014	7.1	29.2	886.0	648.0	46.0	3.5	21.4	84.0	55.0	26.0	389.2	0.1

Clave	Sitio	Coordenadas (UTM)		pH	T (°C)	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
		X	Y												
B18	Pedro Antonio Santos	377215	2096557	7.1	26.9	5120.0	3180.0	626.0	16.0	113.0	270.0	1117.0	570.0	359.9	0.4
B20	Carretera Reforma	348230	2071528	6.9	27.2	1780.0	1704.0	316.0	4.7	50.5	118.0	157.0	620.0	412.4	0.2
B22	Los Limones	383140	2103584	6.9	27.5	2600.0	1620.0	331.0	12.8	41.8	147.2	608.0	120.0	355.0	0.3
B23	Chacchoben	376228	2104455	7.5	28.7	690.0	490.0	66.0	5.2	9.7	64.0	104.0	29.0	213.5	0.2
B24	Noh Bec	377164	2117000	7.8	29.3	370.0	317.0	25.0	4.3	3.9	49.6	23.0	18.0	184.2	0.5
B25	Buenavista	369752	2088991	6.9	26.4	6540.0	5030.0	1060.0	31.5	165.2	392.0	1578.0	1400.0	384.3	0.1
B26	Bacalar Pozo 2	348242	2071411	6.9	27.8	1217.0	791.1	75.8	3.0	46.2	110.5	121.3	59.5	482.6	0.7
B27	David Gustavo Gutiérrez	320827	2090225	7.7	28.8	1321.0	858.7	127.4	3.0	41.5	95.3	203.8	9.5	527.8	2.2
F01	Chankah Veracruz	395689	2155853	7.1	25.6	1790.0	1685.0	10.5	5.4	35.3	48.5	63.5	63.2	187.2	0.1
F02	Uh May	389958	2147279	7.1	26.1	1180.0	1029.0	7.3	4.5	21.1	91.7	95.1	70.0	176.9	0.1
F03	X Zazil Sur	386584	2144606	7.1	25.7	1340.0	1267.0	10.2	4.7	32.4	77.3	106.9	58.0	195.7	0.1
F04	Andrés Quintana Roo	384044	2119076	6.9	26.1	2530.0	2520.0	22.2	10.9	14.3	166.4	174.6	155.0	179.8	0.1
F05	Polinkín	376826	2120576	7.2	26.9	1370.0	1296.0	13.8	9.9	22.7	97.0	73.0	73.0	266.4	0.1
F06	Petcacab	371272	2133494	7.1	26.5	1290.0	1278.0	99.5	9.1	40.2	88.5	229.8	86.0	268.9	0.2
O01	Dos Aguadas	273206	2005411	7.1	25.8	439.0	331.0	13.0	0.8	9.7	58.0	14.0	12.0	220.8	1.0

Clave	Sitio	Coordenadas (UTM)		pH	T (°C)	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
		X	Y												
O02	Nuevo Veracruz	269802	1997084	7.0	27.0	1097.0	815.0	56.0	5.7	43.7	102.0	39.0	190.0	379.4	0.7
O03	Santa Rosa	267623	1993014	6.9	27.3	1118.0	784.0	102.0	6.5	23.1	74.0	82.0	40.0	431.9	0.1
O04	Lázaro Cárdenas No 2	263659	1986873	6.8	27.4	980.0	756.0	72.0	1.9	24.3	98.0	59.0	33.0	470.9	0.1
O05	Jose Maria Morelos (Cibali)	257852	1979020	7.1	27.3	1173.0	724.0	40.0	4.3	47.4	98.0	86.0	62.0	412.4	0.1
O06	Sergio Butrón Casas	334467	2047374	7.1	27.2	1680.0	1136.0	94.0	5.5	91.1	96.0	145.0	210.0	491.7	0.1
O07	Lázaro Cárdenas Segundo	305314	2070885	7.0	28.4	798.0	570.0	48.0	1.9	17.0	80.0	51.0	32.0	339.2	0.1
O08	Morocoy	308885	2057460	7.0	28.1	952.0	668.0	57.0	3.4	30.4	92.0	86.0	140.0	281.8	0.1
O09	Francisco Villa	305258	2043924	7.0	28.2	929.0	660.0	25.0	1.9	32.8	104.0	74.0	10.0	411.1	1.1
O10	Pucté	323379	2016653	7.0	26.1	891.0	729.0	18.3	0.5	19.0	144.0	37.0	7.0	507.5	0.1
O11	Álvaro Obregón	324891	2023751	6.9	26.8	849.0	662.0	15.0	0.4	34.0	120.0	35.0	35.0	451.4	0.1
O12	Sacxan	339287	2042225	6.8	28.3	1980.0	1841.0	171.0	2.4	68.0	300.0	65.0	950.0	389.2	0.1
O13	Xul-Ha	342832	2054036	7.0	28.1	1870.0	1707.0	179.0	3.2	70.5	248.0	139.0	750.0	402.6	1.8
O15	Calderitas	366741	2051913	6.8	29.4	4290.0	3200.0	150.0	12.0	155.5	608.0	192.0	2000.0	169.6	0.7
O16	Caobas	278078	2040399	6.9	29.0	2630.0	2810.0	159.0	2.5	77.8	568.0	67.0	1750.0	261.1	0.8
O17	San José de la Montaña	287588	2032374	7.3	28.8	840.0	657.0	68.0	4.1	23.3	81.6	80.0	70.0	350.1	0.1

Clave	Sitio	Coordenadas (UTM)		pH	T (°C)	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
		X	Y												
O18	Ñachi Cocom	315265	2044202	7.1	27.7	850.0	816.0	55.0	2.0	23.3	137.6	34.0	260.0	309.9	0.7
O19	Jesús González Ortega	323252	2044805	7.1	27.2	1590.0	1562.0	124.0	2.8	38.9	264.0	63.0	700.0	361.1	0.8
O20	Allende	335901	2033446	7.2	28.1	1520.0	1510.0	97.0	2.3	55.9	244.0	45.0	650.0	389.2	0.7
O21	San Francisco Botas	318186	2003773	6.9	26.5	870.0	726.0	36.0	0.6	35.2	98.0	27.0	12.0	510.0	0.9
O22	Esteban Baca Calderón	307054	1992081	7.4	26.9	910.0	745.0	49.0	0.7	26.7	108.0	51.0	21.0	479.5	0.8
O23	La Unión	301877	1979801	6.9	27.6	1890.0	2268.0	239.0	1.6	40.1	366.0	27.0	1250.0	341.6	0.3
O27	Nicolás Bravo	296134	2042513	7.4	25.0	1050.0	780.0	6.7	4.4	19.1	76.8	60.4	70.0	166.2	0.1
O28	Tres Garantías	290295	2012636	7.5	25.7	670.0	603.0	1.4	2.4	27.2	53.9	59.6	52.0	168.4	0.1
O31	Arroyo Negro	254705	1982891	7.2	26.0	528.0	400.0	17.3	2.4	2.3	55.2	24.3	4.3	196.0	4.0
O33	San Pedro Peralta	303972	2068192	7.3	29.5	819.0	635.0	58.0	1.1	30.6	91.4	92.8	28.6	407.1	1.9
O34	Ucum	339182	2046276	6.8	29.0	1498.0	1178.0	48.5	4.9	55.4	217.1	77.6	395.9	497.6	4.1
O35	José Narciso Rovirosa	317567	2003270	6.9	29.0	970.0	756.0	30.3	4.0	39.4	133.3	48.5	24.1	558.0	7.9

Análisis geoquímico

Se utilizó el diagrama de Piper con el objeto de establecer los posibles orígenes del agua subterránea y la identificación de los principales procesos geoquímicos. Este diagrama consiste de dos triángulos equiláteros (en uno de ellos se representan los cationes y en el otro los aniones), complementados con un rombo ubicado entre la porción superior de los triángulos (Appelo y Postma, 2005). Los tres campos tienen escalas de lectura de 100 partes. 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 trilineales. 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.*, 2002). El diagrama de Piper fue obtenido a través del paquete informático AquaChem v.12.1.

Análisis Estadístico Multivariado

El análisis estadístico multivariado es un enfoque cuantitativo e independiente de la clasificación de las aguas subterráneas que permite el agrupamiento de muestras de aguas subterráneas y la creación de correlaciones entre los parámetros químicos (Cloutier *et al.*, 2008).

El uso combinado del análisis de componentes principales (ACP) y el análisis de conglomerados (AC) permitió la clasificación de las muestras de agua en distintos grupos con base en sus características hidroquímicas.

Análisis de Conglomerados (AC)

El AC es una herramienta estadística ampliamente utilizada para clasificar datos auténticos en grupos de acuerdo con “similitudes” que los hacen más o menos homogéneos y distintos de otros grupos (Subyani y Al-Ahmadi, 2009; Huang *et al.*, 2010). En el estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas, los conglomerados comprenden una agrupación diferente de las técnicas gráficas geoquímicas convencionales tales como los diagramas de Piper, Schoeller y Stiff (Holland y Witthüser, 2009). Esta distinción radica en que para realizar el AC se emplea una combinación aún mayor de parámetros físicos y químicos (por ejemplo, temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, entre otras) para clasificar las muestras de agua (Kim *et al.*, 2003). En el AC, la clasificación de las muestras acorde a sus parámetros se conoce como clasificación *Q-mode* y la clasificación de acuerdo con la interacción entre las variables lleva el nombre de clasificación *R-mode* (Belkhiri *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2010). En el presente estudio se utilizó *Q-mode* para clasificar las muestras de cada sitio en distintos grupos hidroquímicos. Esta clasificación se aplica comúnmente a las investigaciones químicas del agua con el fin de definir grupos de muestras que tengan características físicas y químicas similares debido a que

rara vez un solo parámetro será suficiente para distinguir entre diferentes tipos de agua (Güler *et al.*, 2002). Se utilizó además, el método de Ward (1963 en Güler *et al.*, 2002) para analizar las distancias entre los vínculos para todo el grupo de observaciones y la distancia euclidiana cuadrada para determinar la distancia entre las observaciones. Este conjunto de métodos promueve los grupos más distintivos en los que cada miembro del grupo es más similar a su compañero que a cualquier otro fuera del grupo (Güler *et al.*, 2002).

En este trabajo se utilizaron 12 variables hidroquímicas (CE, T, pH, SDT, Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) para el AC. Los datos fueron sometidos a la prueba de normalidad ajustándolos a una distribución normal bajo la premisa de que las observaciones son independientes y están idénticamente distribuidas sobre el área y período de muestreo. En la Tabla 2.2 se compilan los parámetros estadísticos descriptivos para las variables químicas y físicas de las 53 muestras de agua subterránea. Las distribuciones de la mayoría de las variables químicas (en mg/L) presentan un sesgo positivo alto (Tabla 2.2) y no siguen una distribución normal. De esta manera, todos los parámetros químicos excepto la temperatura (T) y los bicarbonatos que sí presentaron una distribución normal, fueron transformados logarítmicamente. Subsecuentemente, todas las variables fueron normalizadas mediante el cálculo de las puntuaciones normalizadas (z-score) de la siguiente manera (Holland y Witthüser, 2009):

$$Z_i = \frac{X_i - \mu}{S}$$

Donde Z_i es la puntuación estándar de la muestra i , X_i es el valor de la muestra, μ es la media y S es la desviación estándar. La normalización escala los datos crudos o transformados logarítmicamente a un rango aproximado de ± 3 desviaciones estándar, centrados alrededor de una media de cero. Por lo tanto, cada variable tuvo el mismo peso en el análisis estadístico.

Análisis de Factores (AF)

Uno de los métodos principales del proceso estadístico multivariado es el AF. Esta herramienta se explica como un método estadístico poderoso utilizado para valorar la interrelación entre los distintos parámetros dentro de un gran conjunto de datos y resumir la información en un conjunto más pequeño de factores o componentes para fines de predicción (Davis, 2002 en Subyani y Al-Ahmadi, 2009). Dentro del método de AF, el enfoque analítico más utilizado es el ACP, el cual se define como una transformación lineal ortogonal que convierte las variables a un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño dada por cualquier proyección de las variables es situada en la primera coordenada (primer componente principal), la segunda varianza más grande en la segunda coordenada, y así sucesivamente (Subyani y Al-Ahmadi, 2009). La interpretación geoquímica de los factores determinados proporciona una visión de los procesos dominantes que pueden controlar la distribución de las variables hidrogequímicas (Huang et. al., 2005).

En este caso, el número de componentes extraído fue determinado a partir de los datos obtenidos de los análisis de campo y laboratorio. Antes del análisis, los datos se estandarizaron para producir una distribución normal de todas las variables (Jayakumar y Siraz, 1997; Davis, 2002 en Subyani y Al-Ahmadi, 2009). Los pesos de las variables originales en cada factor son llamados "cargas" y cada factor está asociado con una variable en particular (Subyani y Al-Ahmadi, 2009). Para facilitar la interpretación de los factores seleccionados se utilizó una rotación ortogonal de los ejes factoriales a través del método Varimax (Belkhiri *et al.*, 2010). Para la determinación de la cantidad de factores, se utilizaron aquéllos que presentaron un valor propio (eigenvalor) mayor que 1 (criterio de Kaiser-Guttman). El eigenvalor de un factor indica la cantidad de dispersión de todas las variables del modelo de factores que está explicado por este factor (Kaiser, 1960). Como la varianza de una variable estandarizada tiene un máximo de 1, entonces un eigenvalor mayor que 1 explica por lo menos dos variables. El análisis estadístico de los datos de todas las muestras hidroquímicas, incluyendo el ACP y el AC, se realizó a través del paquete informático Statgraphics Centurion XV.II.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Análisis Estadístico Descriptivo

El resumen estadístico de la composición química de las muestras del agua subterránea se presenta en la Tabla 2.2. Las muestras de agua subterránea del área de estudio estuvieron en un rango de pH de 6.7 – 7.8 con una media de 7.1 y

una desviación estándar de 0.23, lo cual indicó que el agua subterránea fue ligeramente alcalina. Los valores de CE oscilaron de 370 a 6540 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una media de 1507.38 y una desviación estándar de 1100.3. Los valores de SDT oscilaron entre 317 y 5030 mg/L con una media de 1198 y una desviación estándar de 858.8. El patrón que siguieron ambos parámetros permitió corroborar la diversidad en la salinidad de las muestras analizadas estableciendo diferentes niveles de mineralización del agua. La temperatura presentó valores desde 25 a 29.5 °C con una media de 27.4 y una desviación estándar de 1.13. El orden de abundancia de los cationes mayores fue $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ y la de los aniones mayores fue $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. Los valores máximos y mínimos de los cationes y aniones permiten mostrar la heterogeneidad espacial del medio acuífero debido al cambio dinámico entre los diferentes procesos hidrogeoquímicos presentes en el área de estudio.

Tabla 2.2. Estadística descriptiva del agua subterránea de la Subregión Hidrológica No. 33-A durante la temporada de lluvias de 2012.

Parámetro	Unidad	No. Muestras	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar	Sesgo
CE	$\mu\text{S}/\text{cm}$	53	370.00	6,540.00	1,507.38	1,100.34	2.88
T°	°C	53	25.00	29.50	27.40	1.13	0.07
SDT	mg/l	53	317.00	5,030.00	1,198.30	858.84	2.38
pH		53	6.71	7.84	7.08	0.23	1.16
Ca^{2+}	mg/l	53	48.52	608.00	145.81	116.69	2.52
Mg^{2+}	mg/l	53	2.31	165.24	43.44	31.45	2.18
Na^+	mg/l	53	1.39	1,060.00	110.33	169.79	4.09
K^+	mg/l	53	0.40	31.50	5.05	4.92	3.41
Cl^-	mg/l	53	14.00	1,578.00	147.65	261.30	4.38

HCO ₃ ⁻	mg/l	53	166.24	558.03	366.39	115.58	-0.38
SO ₄ ²⁻	mg/l	53	4.27	2,000.00	276.27	447.01	2.43
NO ₃ ⁻	mg/l	53	0.05	7.93	0.67	1.33	3.91

Análisis de factores

Los resultados del análisis de factores para los datos hidrogeoquímicos de la temporada de lluvias se resumen en la Tabla 3. Existen reglas para determinar el número de factores adecuado a conservar, por ejemplo, el que se conoce como criterio de Kaiser (Kaiser, 1960), el cual indica que hay que conservar los componentes principales cuyos valores propios son mayores que la unidad o que el porcentaje de varianza total explicada por cada componente o factor (varianza acumulada) sea lo suficientemente alto (Holland y Witthüser, 2009; Belkhiri *et al.*, 2010; Kanade y Gaikwad, 2011). Bajo estos criterios, sólo los factores con valores propios mayores o iguales a 1 fueron aceptados como posibles fuentes de varianza en los datos, con la más alta prioridad atribuida al factor que tiene la suma más grande del eigenvector (Belkhiri *et al.*, 2010). En este estudio se identificaron tres factores que explican el 74.68% de la varianza acumulada, los cuales se asocian a los procesos hidrogeoquímicos dominantes en el área de estudio. De manera general, en términos de la varianza total, la matriz de cargas y el eigenvalor, se observa una amplia diferencia entre el Factor 1 con respecto a los factores 2 y 3. El Factor 1 explica el 47.9% de la varianza en los datos. Las variables presentes en este factor son Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, SDT, CE, Cl⁻, las cuales indican mezcla con agua marina y un posible proceso de intercambio iónico como fuente enriquecedora del ion Na⁺. El Factor 2 explica el 16.72% de la varianza de

los datos. Las variables que lo incluyen son pH, HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} , que indican la disolución de calizas y dolomías en el área de estudio. El Factor 3, con 10.06% de la varianza, está integrado por las variables de T y NO_3^- . Los nitratos podrían provenir del aporte de nutrientes por actividades humanas en rancherías y áreas agrícolas cercanas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los procesos hidrogeoquímicos dominantes en la región de estudio fueron la disolución, la mezcla y el intercambio iónico. Adicionalmente, se tiene el aporte antropogénico. En conjunto, estos procesos determinaron las características del acuífero durante la época de lluvias.

Tabla 2.3. Análisis de factores con Rotación Varimax

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Comunalidad Estimada	Varianza Específica
T	0.09	0.04	0.85	0.73	0.27
Na^+	0.63	0.42	0.42	0.75	0.25
K^+	0.87	-0.21	-0.09	0.80	0.20
SO_4^{2-}	0.70	0.46	-0.02	0.71	0.29
NO_3^-	-0.15	-0.02	0.70	0.52	0.48
SDT	0.79	0.48	-0.14	0.88	0.12
CE	0.84	0.47	-0.09	0.95	0.05
Ph	0.13	0.82	-0.16	0.71	0.29
HCO_3^-	-0.15	0.60	0.46	0.59	0.41
Cl^-	0.86	0.09	-0.03	0.75	0.25
Ca^{2+}	-0.44	-0.76	-0.23	0.83	0.17
Mg^{2+}	0.57	0.66	0.08	0.76	0.24
Valor eigen	5.75	2.01	1.21		
Varianza (%)	47.90	16.72	10.06		
Varianza Acumulada (%)	47.90	64.62	74.68		

Tipos de agua

El diagrama de Piper fue utilizado en lugar de otros gráficos convencionales, debido a que permite una identificación más precisa de las muestras de agua y de algunos procesos geoquímicos dominantes (Figura 2.4). En general, se determinaron cuatro tipos de aguas predominantes en el área de estudio. La primera corresponde al tipo cálcica-bicarbonatada (Ca-HCO_3) con el 50.94% del total de las muestras, ubicadas en zonas donde prevalecen las calizas. La segunda fue la mixta cálcicamagnésica clorurada (mixta Ca-Mg-Cl) con el 28.3% de los pozos ubicados en zonas con yesos intercalados con calizas, principalmente. Un tercer tipo de agua se refiere a la cálcica sulfatada (Ca-SO_4) con el 13.21% de las muestras, provenientes de sitios que se encuentran en las zonas internas altas en las que prevalecen los materiales evaporíticos (yeso y anhidrita). Por último, se observó la sódica clorurada (Na-Cl) con el 7.55% de muestras ubicadas en porciones cercanas a las franjas costeras en donde la influencia de aguas saladas marinas es importante. La anterior clasificación en el diagrama de Piper muestra varias trayectorias de reacción (Figura 2.4). Primero, la de disolución de carbonatos en zonas altas cercanas a la zona de recarga, que evoluciona a la disolución de yesos (Trayecto 1) y que pasa finalmente a una posible mezcla con aguas marinas (Trayecto 2). La otra reacción (Trayecto 3) va directamente de la disolución de carbonatos (en zonas de recarga) a la mezcla con aguas marinas. Una última reacción (Trayecto 4) que parte de las zonas de recarga a una posible presencia de procesos de intercambio iónico.

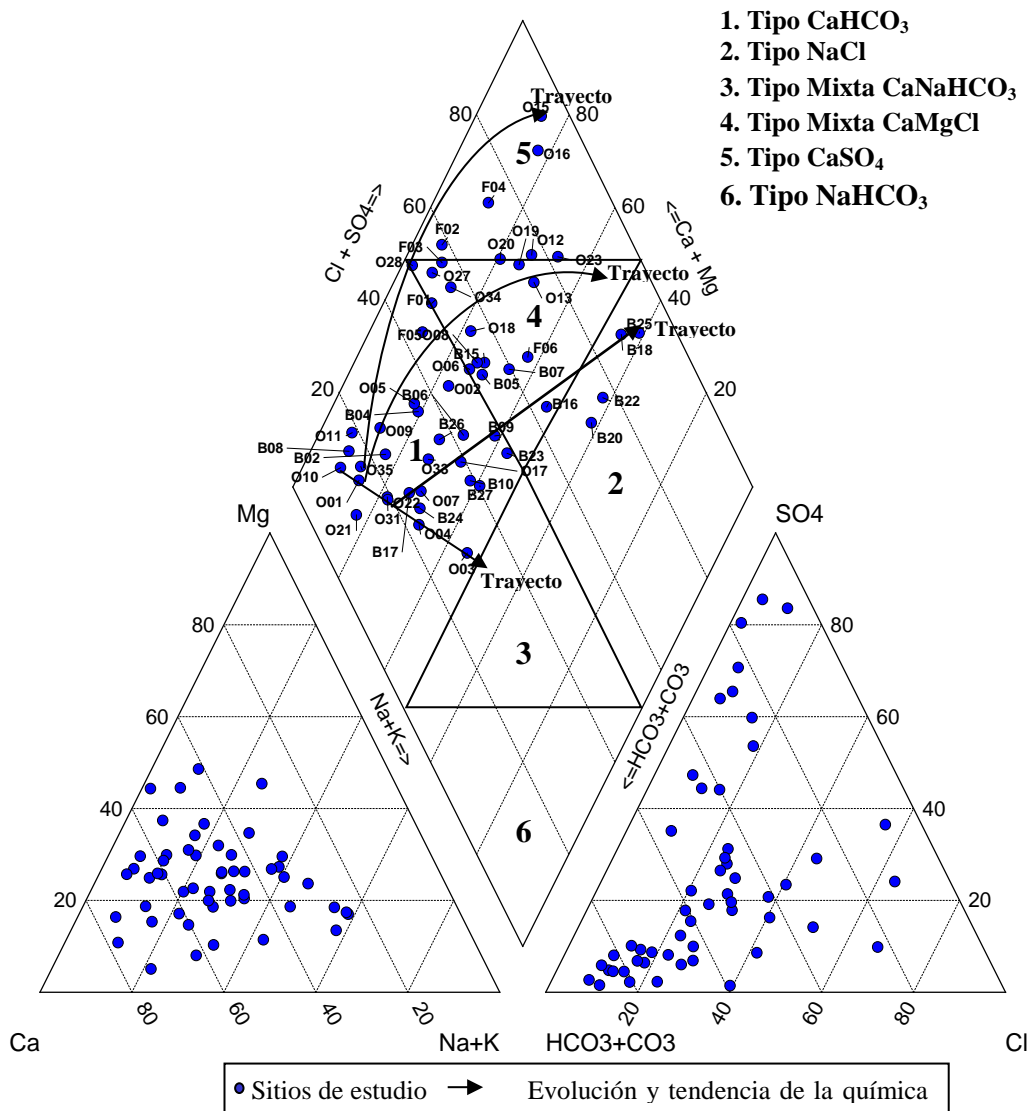


Figura 2.4. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea. La nomenclatura que acompaña a los puntos en azul dentro del rombo central indican los sitios de muestreo. Las flechas indican la evolución y tendencia de la química del agua. Los números en negrita corresponden a la clasificación por tipos de familias de agua.

Interpretación del Análisis de Conglomerados

La clasificación de las muestras en grupos se basa en una observación visual del dendrograma (Figura 2.5). En este trabajo, la línea fenotípica (línea punteada) se estableció a través del dendrograma a una distancia cuadrada de vinculación de aproximadamente 230 (Figura 2.5). Por lo tanto, las muestras con una distancia cuadrada de vinculación inferior a 230 fueron agrupadas en la misma categoría. Esta posición de la línea fenotípica permitió una división del dendrograma en siete grupos (1-7) usando 12 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 2.5. Dendrograma de las 53 muestras hidrogeoquímicas del área de estudio. La línea punteada horizontal define la “línea fenotípica”, la cual fue elegida para seleccionar el número de grupos.

La Tabla 2.4 muestra los valores promedio de cada parámetro para cada grupo identificado en el análisis del AC. Esos valores revelan algunas tendencias entre los grupos identificados.

Tabla 2.4. Valores promedio para los grupos determinados por el Análisis de Conglomerados.

Grupo	n	pH	T (°C)	CE (µS/cm)	SDT (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
1	20	7.09 (±0.22)	27.97 (±0.93)	1034.45 (±190.27)	770.59 (±174.36)	58.47 (±27.48)	3.94 (±2.01)
2	4	7.03 (±0.24)	26.57 (±0.34)	880 (±26.34)	715.5 (±36.63)	29.58 (±15.9)	0.55 (±0.13)
3	4	7.43 (±0.31)	27.44 (±1.82)	506.75 (±138.23)	384.5 (±79.14)	30.33 (±24.29)	3.18 (±1.97)
4	7	7.18 (±0.2)	25.87 (±0.59)	1418.57 (±596.5)	1311.43 (±641.15)	10.31 (±6.52)	6.02 (±3.15)
5	9	6.97 (±0.12)	27.2 (±0.56)	1810.56 (±395.64)	1267.78 (±286.37)	173.44 (±95.9)	6.37 (±2.67)
6	6	6.98 (±0.15)	28.06 (±0.62)	1913.33 (±394.9)	1949.67 (±501.16)	161.5 (±48.94)	2.47 (±0.54)
7	3	6.91 (±0.17)	27.54 (±1.6)	5316.67 (±1137.82)	3803.33 (±1062.37)	612 (±455.16)	19.83 (±10.3)
Grupo	n	Mg ²⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	20	34.9 (±10.69)	102.93 (±31.43)	84.14 (±51.23)	83.63 (±97.34)	410.14 (±80.67)	1.05 (±1.91)
2	4	28.75 (±7.5)	117.5 (±19.82)	37.5 (±9.98)	18.75 (±12.28)	487.09 (±27.52)	0.46 (±0.46)
3	4	6.41 (±3.88)	56.71 (±5.99)	41.33 (±42.03)	15.82 (±10.43)	203.64 (±16.61)	1.42 (±1.76)
4	7	24.57 (±7.48)	87.37 (±39.15)	90.45 (±41.37)	77.32 (±35.06)	191.5 (±34.56)	0.08 (±0.04)
5	9	56.32 (±15.78)	122.36 (±22.35)	211.22 (±165.02)	252.22 (±159.36)	450.45 (±58.52)	0.13 (±0.1)
6	6	58.52 (±16.34)	331.67 (±124.34)	67.67 (±38.17)	1008.33 (±424.76)	357.46 (±52.16)	0.73 (±0.6)
7	3	144.59	423.33	962.33	1323.33	304.59	0.38

(±27.79) (±171.17) (±705.83) (±718.08) (±117.56) (±0.31)

La ubicación geográfica de los grupos de muestras definidos en el AC muestra la información más importante que contienen los conjuntos de datos geoquímicos, es decir, la variación en su distribución regional (Reimann *et al.*, 2005 en Holland y Witthüser, 2009). El mapeo de los grupos con base en su similitud química permitió identificar la relación espacial de los procesos hidroquímicos. De manera general, se observa una correspondencia entre los sitios geográficos y los grupos determinados por el AC (Figura 2.6). Las muestras compuestas por los grupos 2, 4, 5 y 6 son las que mejor agrupamiento geográfico presentaron.

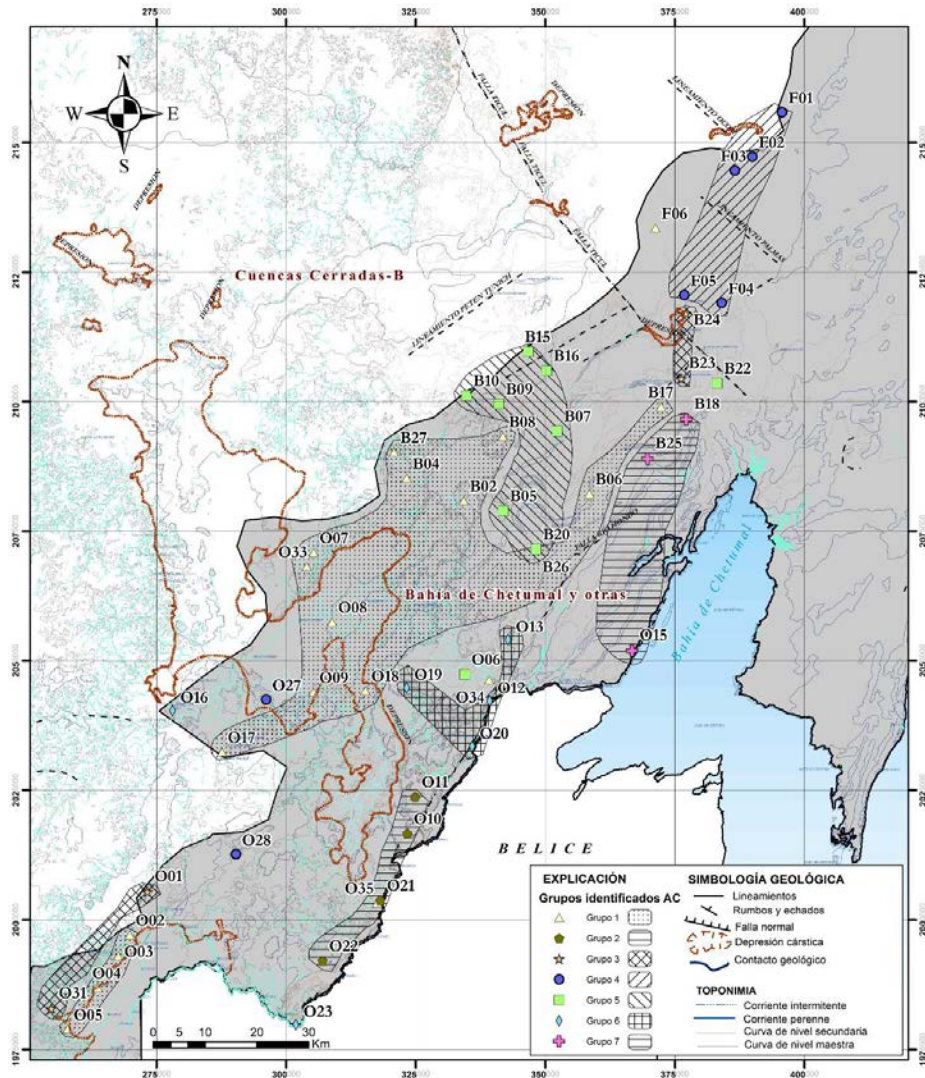


Figura 2.6. Mapa vista de los grupos identificados a partir del Análisis de Conglomerados. Modificado de SGM (2007). Los achurados representan los grupos reconocidos a través del área de estudio. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Las muestras compuestas por los grupos 2, 4, 5 y 6 son las que mejor agrupamiento geográfico presentaron.

Con base en el mapa de distribución espacial, las muestras compuestas por el Grupo 1 se ubicaron en las zonas internas de mayores elevaciones topográficas con aguas del tipo Ca-HCO₃ en su mayoría, y en menor proporción tipo mixta Ca-Mg-Cl, indicando la disolución de carbonatos que evoluciona a la disolución de yesos. Las aguas subterráneas Ca-HCO₃ se distinguen por presentar bajas salinidades, con cortos tiempos de recorrido y permanencia en el subsuelo (Custodio, 1983). Las muestras compuestas por el Grupo 2, con agua del tipo Ca-HCO₃, se ubicaron todas a lo largo del sistema de fallas Río Hondo, indicando zonas de recarga. Las muestras pertenecientes al Grupo 3, con agua del tipo Ca-HCO₃, se ubicaron en dos porciones del área de estudio, una porción al nororiente y otra al suroccidente. La característica principal de ambas regiones fue que las muestras de agua presentaron los menores valores de CE, SDT, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻ y NO₃⁻. Estos sitios, ubicados a poca distancia de los reportados por Gondwe *et al.* (2010), permiten reforzar el planteamiento que a hacia estas porciones se tiene la presencia de acuíferos colgados donde existe una respuesta más abrupta a los efectos de precipitación y escorrentía, debido al medio altamente transmisivo, que en un acuífero regional. Lo anterior concuerda con los cambios temporales en el nivel estático reportados por Gondwe *et al.* (2010), que para estas zonas fueron en su mayoría de varios metros. Las muestras del Grupo 4 quedaron ubicadas en un 71.4% hacia el norte del área de estudio y el otro 28.6% en las zonas altas del suroccidente. Los tipos de aguas de este grupo fueron Ca-HCO₃, mixta Ca-Mg-Cl y Ca-SO₄ mostrando claramente la evolución de las aguas subterráneas desde la

disolución de carbonatos hacia la disolución de yesos (Trayecto 1). Las muestras del Grupo 5 se conjuntaron en un 87.5% hacia el noroccidente del área de estudio, el otro 12.5% quedó ubicado en la parte centro-oriental. Los tipos de agua de este grupo fueron la mixta Ca-Mg-Cl y la Na-Cl indicando la evolución desde la disolución de carbonatos hacia la mezcla con aguas marinas. Las muestras del Grupo 6 se ubicaron en su mayoría (66.75%) en la porción centro-oriental del área de estudio; el otro 33.25% quedó dividida en dos zonas, una hacia las zonas altas del occidente (porción lacustre) y la otra hacia el sur-suroriente, hacia la desembocadura más al sur del río Hondo. Los tipos de aguas de este grupo son la mixta Ca-Mg-Cl y la Ca-SO₄, indicando la primera la mezcla con aguas marinas y la segunda, la disolución de yesos (localidades de Caobas y La Unión; Figura 2). Por último, las muestras del Grupo 7 se agruparon todas hacia el oriente del área de estudio, cercanas a la franja costera de la bahía de Chetumal en donde la influencia de aguas salobres es importante. Los tipos de aguas subterráneas identificadas para este grupo fueron la NaCl y la Ca-SO₄. La Na-Cl corresponde a las localidades de Buenavista y Pedro Antonio Santos (Figura 2.2) y la Ca-SO₄ a la localidad de Calderitas (Figura 2.2). Las características principales de este último grupo fueron los valores más altos de CE, SDT, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻ y SO₄²⁻ y el valor más bajo de pH. De acuerdo a lo anterior, se establece que esta región del sur de Quintana Roo presenta heterogeneidad del acuífero debido a que el agua transita por diferentes rocas: calizas, dolomías y evaporitas. Las primeras generarán aguas cálcicas y magnésicas con valores medios a bajos de

dureza total y las últimas generan aguas sulfatadas con valores altos de salinidad. En algunas zonas es posible encontrar aguas sódicas asociadas a procesos de intercambio iónico y a la presencia de materiales arcillosos someros (CCPY, 2012).

CONCLUSIONES

Los procesos más importantes en el acuífero de la zona sur del Estado de Quintana Roo son la disolución de minerales de rocas carbonatadas, dolomías y evaporitas, además de los procesos de intercambio iónico, la presencia de materiales arcillosos someros y los procesos de mezcla de agua dulce y marina.

El orden de abundancia de los cationes mayores fue: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ y de los aniones $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$.

A través del Diagrama de Piper se encontró que las muestras de agua colectadas pueden agruparse en cuatro familias de aguas denominadas Tipo Cálcica-Bicarbonatada (CaHCO_3), la Tipo Mixta Cálcica Magnésica Clorurada (Mixta CaMgCl), la Tipo Cálcica Sulfatada (CaSO_4) y la Tipo Sódica Clorurada (NaCl).

El dendrograma del análisis de conglomerados (*Q-mode*) identificó la existencia de siete grupos hidroquímicos. Estos grupos estadísticos tuvieron patrones espaciales distintos en el área de estudio. De acuerdo con el análisis, las muestras compuestas por los grupos 2, 4, 5 y 6 son las que mejor agrupamiento geográfico presentaron. Cada grupo reveló diferentes patrones hidrogeoquímicos que demuestran la heterogeneidad del acuífero. Los parámetros asociados a los tres

factores obtenidos por medio del análisis de factores indican que los procesos hidrogeoquímicos que controlan la composición de las aguas son la disolución de calizas y dolomías, la mezcla con agua marina y el aporte de nutrientes por actividades humanas.

Po último, los resultados de este estudio demuestran claramente la utilidad del análisis estadístico multivariado en la caracterización hidrogeoquímica de acuíferos kársticos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de doctorado del primer autor en El Colegio de la Frontera Sur. A los ingenieros Luis Velázquez Aguirre, Raúl Muñoz y Marco Jiménez García por su valioso apoyo y atinadas sugerencias en la revisión de este artículo. Los recursos para esta investigación fueron proporcionados por el Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán a través de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo mediante el contrato CAPA-CCPY-SE-001/2012.

REFERENCIAS

Abelló-Ugalde, I.A., Lauces, P., Fagundo, J.R., Guerón, J., 1992, Estudio estadístico multivariado sobre datos hidroquímicos de las diferentes litologías de la cuenca del Río San Marcos, en Llanos, H.J., Antigüedad, I.,

- Morell, I., Eraso, A. (eds.), I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Cuba, 6-11 de abril de 1992, Libro de Comunicaciones: Universitat Jaume I de Castelló, 205-214.
- Alcocer-Durand, J., Lugo-Vázquez, A., Sánchez-Reyes, M., Escobar-Briones, E., 1999, Contaminación del agua subterránea en la Península de Yucatán, México: Imagen Veterinaria, 1(1), 41-50.
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005, Geochemistry, Groundwater and Pollution: Rotterdam, Balkema, 2a ed., 672 pp.
- Back, W., Hanshaw, B.B., 1970, Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan: Journal of Hydrology, 10(4), 330-368.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B.R.N., Charvet, G., Marín L.E., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., 2011, Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico: Hydrogeology Journal, 19, 507-524.
- Beddows, P.A., Smart, P.L., Whitaker, F.F., Smith, S., 2002, Density stratified groundwater circulation on the Caribbean Coast of Yucatan peninsula, Mexico, en Martin, J.B., Wicks, C.M., Sasowsky, I.D. (eds), Hydrogeology and Biology of Post-Paleozoic Carbonate Aquifers: Karst Waters Institute, Special Publication 7, 129-134.
- Beddows, P.A., 2004, Groundwater Hydrology of a Coastal Conduit Carbonate Aquifer: Caribbean Coast of the Yucatán Peninsula, México: Reino Unido,

- University of Bristol, School of Geographical Sciences, Ph. D. Thesis, 303 pp.
- Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., Baouz, T., 2010, Multivariate statistical characterization of groundwater quality in Ain Azel plain, Algeria: African Journal of Environmental Science and Technology, 4(8), 526-534.
- Butterlin, J., Bonet, F., 1960, Información básica para la interpretación geohidrológica de la Península de Yucatán: Mexico, D.F., Secretaría de Recursos Hidráulicos, 28 pp.
- CCPY (Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán), 2012, Evaluación de la calidad del agua subterránea en varias localidades de los Municipios de Othón P. Blanco, Bacalar y José María Morelos del Estado de Quintana Roo: Gerencia Regional Península de Yucatán, Informe Final, 122 pp.
- Charvet, G., 2009, Exploration, modeling and management of groundwater resources in northern Quintana Roo, Mexico: Denmark, Technical University of Denmark, MSc Thesis, 94 pp + apéndices.
- Cloutier, V., Lefebvre R., Therrien R., Martine M.M., 2008, Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system: Journal of Hydrology, 353, 294-313.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2001, Actualización geohidrológica del acuífero de la zona norte del Estado de Quintana Roo, (poligonal

comprendida entre Cancún, Nuevo Xcan, Coba y Tulum): Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia Técnica, Informe técnico.

CNA (Comisión Nacional del Agua), 2006, Ampliación de la red piezométrica en la región costera norte del Estado de Quintana Roo, segunda parte: Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia técnica, Informe Final, 256 pp.

CNA (Comisión Nacional del Agua), 2007, Reactivación de la red piezométrica de la zona Costa Maya, Quintana Roo: Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia técnica, Informe final, 142 pp.

CNA (Comisión Nacional del Agua), 2009, Establecimiento de una red piezométrica de la zona cañera de Álvaro Obregón, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo: Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia técnica, Informe final, 68 pp.

Cuevas E., Pacheco J., Cabrera A., Coronado V., Vázquez J., Comas M., 2001, Calidad química y bacteriológica del agua subterránea en el principal campo de pozos para el abastecimiento de Mérida, Yucatán, México: Revista Ingeniería, 5(3), 10 pp.

Custodio E., 1983, Hidrogeoquímica, en Custodio E., Llamas M. (eds.), Hidrología Subterránea, Tomo 1: Barcelona, España, Omega S.A., 2ª edición, 1005-1091.

- Escolero, O.A., Marín, L.E., Steinich, B., Pacheco, A.J., Cabrera, S.A., Alcocer, J., 2002, Development of a protection strategy of karst limestone aquifers: the Mérida Yucatan, Mexico case study: *Water Resources Management*, 16, 351-367.
- FONATUR (Fondo Nacional de Fomento al Turismo), 2004, Estudio geohidrológico para conocer la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas para el suministro de agua potable al Proyecto Turístico Integral Costa Maya, ubicado en el Municipio Othon P. Blanco, Estado de Quintana Roo: Delegación Federal en Quintana Roo, Subgerencia Técnica Regional, 53 pp.
- Gondwe, B.N., Hong, S.H., Wdowinski, S., Bauer-Gottwein P., 2010, Hydrologic dynamics of the ground-water-dependent Sian Ka'an wetlands, Mexico, derived from InSAR and SAR data: *Wetlands*, 30(1), 1-13.
- Granel-Castro, E., Gález-Hita, L., 2002, Deterioro de la calidad del agua subterránea por el desarrollo poblacional: Cancún, Q. Roo: *Ingeniería*, 6(3), 41-43.
- Güler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E., Turner, A.K., 2002, Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data: *Hydrogeology Journal*, 10, 455-474.
- Matthes, L., 2008, Analysis and evaluation of ground and surface water quality and groundwater flow in the northern aquifer of Quintana Roo, Mexico en Gutiérrez-Aguirre, M.A., Cervantes-Martínez, A. (comp.), Estudio

- geohidrológico del norte de Quintana Roo: México, Universidad de Quintana Roo y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 59-99.
- Hausman, H., 2009, Responsible development in Tulum, Mexico: Considering water quality and subaqueous cave locations: Durham, North Carolina, Nicholas School of the Environment of Duke University, Tesis de Maestría, 55 pp.
- Holland, M., Witthüser, K.T., 2009, Geochemical characterization of karst groundwater in the Cradle of Humankind World Heritage Site, South Africa: *Environmental Geology*, 57, 513-524.
- Huang, Y.C., Wu, T.N., Cheng, P.J., 2005, Characterization of groundwater quality by multivariate statistical analysis: an example from Kaohsiung County, Taiwan, en Mathew K., Nhapi I. (eds.), *Water and Wastewater Management for Developing Countries, WAMDEC 2004*: London, IWA Publishing, Water and Environment Management Series, 39-49.
- Huang, Y.C., Yang, C.P., Lee, Y.C., Tang, P.K., Hsu, W.M., Wu, T.N., 2010, Variation of groundwater quality in seawater intrusion area using cluster and multivariate factor analysis, en *The 6th International Conference on Natural Computation (ICNC)*, Yantai, Shandong: Taiwan, IEEE, 6, 3021-3025.
- Isphording, W.C., 1975, The physical geology of Yucatan: *Transactions Gulf Coast Association of Geological Societies*, 25, 231-262.
- Jayakumar, R., Siraz L., 1997, Factor analysis in hydrogeochemistry of coastal aquifers – a preliminary study: *Environmental Geology*, 31(3/4), 174-177.

- JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón), 2004, Estudio de manejo de saneamiento ambiental en la costa del Estado de Quintana Roo en los Estados Unidos Mexicanos: Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Informe final, 370 pp.
- Kaiser, H.F., 1960, The application of electronic computers to factor analysis: *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141-151.
- Kanade, S.B., Gaikwad, V.B., 2011, A Multivariate Statistical Analysis of Bore Well Chemistry Data-Nashik and Niphad Taluka of Maharashtra, India: *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 1(2), 193-202.
- Kim, J.H., Yum, B.W., Kim, R.H., Koh D.C., Cheong T.J., Lee J., Chang H.W., 2003, Application of cluster analysis for the hydrogeochemical factors of saline groundwater in Kimje, Korea: *Geosciences Journal*, 7(4), 313-322.
- Kumar, M., Kumari, K., Kumar Singh, U., Ramanathan, A.L., 2009, Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab: conventional graphical and multivariate statistical approach: *Environmental Geology*, 57 (4), 873-884.
- López-Ramos, E., 1973, Estudio Geológico de la Península de Yucatán: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 25(1-3), p. 25-72.
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J.F., Espinasa-Pereña, R., 1992, Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán: Universidad

- Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 10(2), 143-150.
- Marín, L.E., Perry, E.C., Essaid, H.I., Steinich, B., 2001, Hydrogeological investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico, en Ouazar, D., Cheng, A.H.D. (eds.), Proceedings of the First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers; Monitoring, Modeling, and Management SWICA-M3 abril 2001, Essaouira, Morocco: <<http://www.olemiss.edu/sciencenet/saltnet/swica1/swica1.html>>.
- Marín, L.E., Perry, E.C., Essaid, H., Steinich, B., 2004, Hydrogeological investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico, en Cheng A.H.D., Ouazar D. (eds) Coastal aquifer management: monitoring, modeling and case studies: Boca Raton, FL., Lewis Publishers, CRC press, 257-277.
- Moore, Y.H., Stoessell, R.K., Easley, D.H., 1992, Fresh-water/sea-water relationship within a ground-water flow system, northeastern coast of the Yucatan Peninsula: Groundwater, 30(3), 343-350.
- Moral, F., Cruz-Sanjulián, J.J., Olías, M., 2008, Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain): Journal of Hydrology, 360, 281–296.

NMX-AA-074-1981, 1981, Análisis de agua - Determinación del ión sulfato: México, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, Dirección General de Normas, 10 pp.

NMX-AA-034-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: México, Secretaria de Economía, Dirección General de Normas, 22 pp.

NMX-AA-036-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua- Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba: Secretaria de Economía, Dirección General de Normas, 22 pp.

NMX-AA-051-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: Secretaria de Economía, Dirección General de Normas, 52 pp.

NMX-AA-072-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: México, Secretaria de Economía, Dirección General de Normas, 19 pp.

NMX-AA-073-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: México, Secretaria de Economía, Dirección General de Normas, 18 pp.

- NMX-AA-079-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: México, Secretaría de Economía, Dirección General de Normas, 27 pp.
- NOM-014-SSA1-1993, 1994, Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados: México, Secretaría de Salud, 6 pp.
- Pernía-Llera, J.M., Cuesta-Peiro, F., Ballesteros-Navarro, B., Barba-Romero Muñoz, J., García-Sánchez, E., 1993, Las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas: Madrid, Instituto Geológico y Minero de España, <http://aguas.igme.es/igme/publica/libros3_RHS/libro34/lib34.htm>, consulta: 16 de agosto de 2013.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., Marin, L., 2002, The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico: International Geology Review, 44, 191-221.
- Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B., Velazquez-Oliman, G., 2009, Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology: Journal of Hydrology, 367, 27-40.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1989, Sinopsis geohidrológica del Estado de Quintana Roo: México, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Infraestructura

Hidráulica, Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos, 43 pp.

Schmitter-Soto, J.J., Comín, F.A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L.E., Steinich, B., 2002, Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico): *Hydrobiologia*, 467, 215-228.

SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2007, Carta Geológica de México, escala 1:2,000,000: Pachuca, México, Servicio Geológico Mexicano, 6ta ed, 1 mapa.

Suárez-Morales, E., Rivera-Arriaga, E., 2000, The aquatic fauna of karstic environment in the Yucatan Peninsula, Mexico: an updated overview, en Gutiérrez-Aguirre M., 2007, *Biología y calidad del agua del acuífero norte de Quintana Roo: Teoría y Praxis*, 135-141.

Subyani, A.M., Al-Ahmadi, M.E., 2009, Multivariate Statistical Analysis of Groundwater Quality in Wadi Ranyah, Saudi Arabia: *Journal of King Abdulaziz University Earth Sciences*, 21 (2), 29-46.

UQROO (Universidad de Quintana Roo) 2002, Entorno Geográfico: Los Entornos: Chetumal, Q. Roo: México, Universidad de Quintana Roo, Publicación Especial, 90 pp.

Velázquez-Aguirre, L., 1986, Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la Península de Yucatán: Ingeniería Hidráulica en México, 1(3): 21-29.

Weidie, A.E., 1974, Note on the regional geology of Yucatán Peninsula, en Weidie A.E. (ed.), Field Seminar On Water and Carbonate Rocks of the Yucatan Peninsula, Mexico, Field trip 2, 1974 Annual Meeting, Miami, of the Geological Society of America: New Orleans Geological Society, 2-9.

CAPÍTULO 3. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA: ACUÍFERO SUR DEL ESTADO DE QUINTANA ROO, MÉXICO.

Este artículo ha sido aceptado con cambios mayores en la revista Tecnología y Ciencias del Agua, la versión que se presenta contiene las correcciones y sugerencias de los dictaminadores y ha sido enviada de nuevo a la Revista para su publicación.

Calidad del agua subterránea: acuífero sur del Estado de Quintana Roo, México.

Groundwater quality: Quintana Roo, Mexico, southern aquifer.

Joan Alberto Sánchez-Sánchez^{1*}, Teresa Álvarez-Legorreta¹, Julia G. Pacheco-Ávila², Roger A. González-Herrera², Laura Carrillo-Bibriezca¹

1 El Colegio de la Frontera Sur, Ave. Centenario Km 5.5. Chetumal, Quintana Roo México.

*joan_ss21@yahoo.com

2 Universidad Autónoma de Yucatán Facultad de Ingeniería, Av. Industrias no Contaminantes por Periférico Norte Apartado Postal 150 Cordemex, 97310, Mérida, Yucatán, México.

RESUMEN

Este estudio se llevó a cabo con la finalidad de conocer el estado de la calidad del agua subterránea del acuífero sur del Estado de Quintana Roo, seguido de intentos por investigar la distribución espacial y temporal de los parámetros físicoquímicos para identificar las zonas con mejor potencial para consumo humano. Para este propósito se aplicaron en conjunto el Índice de Calidad del Agua (ICA) y los Sistemas de información geográfica (SIG). Los datos estudiados corresponden a las temporadas de lluvias de los años 2002 y 2012. Los parámetros fueron: pH, temperatura (T°), sólidos totales disueltos (SDT), dureza total, sodio (Na^{+1}), sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^{-}) y nitratos (NO_3^{-}). En la interpretación de los resultados se utilizaron estadísticos descriptivos y mapas de distribución espacio-temporal de concentraciones así como del ICA. Los resultados denotaron condiciones de heterogeneidad espacial del medio acuífero, debido a procesos como la disolución de minerales de rocas carbonatadas, dolomías y evaporitas, la mezcla de agua dulce-marina y la posible contaminación antropogénica, principalmente por aguas residuales domésticas y el uso de fertilizantes. Los constituyentes químicos que excedieron el límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994 fueron: STD (22% en el periodo 2002, y 42% en el periodo 2012), Dureza Total (60%), Na^{+} (9.8%), Cl^{-} (9.9%) y NO_3^{-} (3% periodo 2012). El ICA demostró que la calidad química del agua subterránea para consumo humano es aceptable para la mayoría de los sitios estudiados.

Palabras clave: Aguas subterráneas, carst, Quintana Roo, índice de calidad del agua, límites permisibles, distribución espacial.

ABSTRACT

This study was conducted in order to know the status of the groundwater quality of the aquifer south of Quintana Roo, followed by attempts to investigate the spatial and temporal distribution of physicochemical parameters to identify to identify places with the best quality for drinking consume within the study area. This goal has been achieved with the combined use of the Water Quality Index (WQI) and a geographical information system (GIS). The analyzed data correspond to the rainy seasons of 2002 and 2012. The parameters were: pH, temperature (T°), total dissolved solids (TDS), total hardness, sodium (Na^+), sulfate (SO_4^{2-}), chlorides (Cl^-) and nitrate (NO_3^-). Descriptive statistics and maps of spatiotemporal distribution and ICA were used in the interpretation of the results. The results denoted conditions of spatial heterogeneity of the medium aquifer, due to processes such as mineral dissolution of carbonate rocks, dolomites and evaporites, the mixing of fresh-salt water and possible anthropogenic pollution, mainly by domestic sewage and fertilizer use. The chemical constituents that exceeded the allowable limit of NOM-127-SSA1-1994 were: STD (22% between 2002 and 42% in the period 2012), Total Hardness (60%), Na^+ (9.8%), Cl^- (9.9%) and NO_3^- (3% period 2012). The ICA showed that the chemical quality of groundwater for human consumption is acceptable to most of the sites studied.

Keywords: Groundwater, carst, Quintana Roo, water quality index, permissible limits, spatial distribution.

INTRODUCCIÓN

En la zona sur del Estado de Quintana Roo, al igual que en toda la Península de Yucatán, el acuífero es la principal fuente de abastecimiento de agua para todas las actividades humanas; no obstante, es altamente vulnerable a la contaminación debido a sus características cársticas que permiten la infiltración y el arrastre de los contaminantes. Aunada a esta situación, las perspectivas de crecimiento demográfico y económico impulsado por la industria turística han traído consigo una creciente demanda de agua y por consiguiente, una creciente generación de aguas residuales y de desechos sólidos (CNA, 1997).

Aparentemente las características propias de la Península deberían proporcionar abundantes suministros de agua; sin embargo, la combinación de factores como el clima y la hidrogeología han generado un sistema hidrológico en el que el agua dulce es escasa, teniéndose inclusive un suministro restringido en algunas regiones (Ward *et al.*, 1985).

Dadas estas condiciones se han empezado a desarrollar diversos programas de ordenamiento con la firme intención de garantizar el abastecimiento de agua potable para las zonas urbanas, así como establecer las bases para que el agua que se extraiga para uso público en las zonas rurales se mantenga en condiciones

adecuadas de calidad y en la cantidad suficiente para satisfacer la demanda de manera oportuna y permanente.

No obstante, para impulsar la gestión adecuada del agua es fundamental contar con la información necesaria sobre el estado de este recurso, ya que de esta manera será posible guiar la toma de decisiones y definir las acciones. En este sentido el conocimiento de la composición química y su distribución espacial a través de la calidad del agua es fundamental desde el punto de vista de su aptitud para el consumo humano, como por la información que pueden aportar acerca de la dirección y extensión de los sistemas de flujo subterráneo (CCPY, 2012); más aún, puede indicar cambios estacionales y temporales en la medida que sus constituyentes químicos estén presentes en el acuífero (Sajil & James, 2013). El Índice de Calidad del Agua (ICA) es una de las herramientas más efectivas para resumir los datos de calidad de las aguas subterráneas en un formato fácilmente expresable y comprensible, capaz de ser utilizado por los responsables políticos y los ciudadanos interesados (Lateef, 2011). Se define como una técnica de clasificación que engloba la influencia compuesta de cierto grupo parámetros de calidad del agua en un solo valor general (Aly *et al.*, 2014).

A nivel mundial se han desarrollado diferentes ICA para aguas superficiales y subterráneas, entre los que se destaca el de la National Sanitation Foundation (ICA– NSF), desarrollado por Brown *et al.* (1970) para ríos de Estados Unidos y ampliamente empleado en diferentes estudios internacionales. Dinius (1987) desarrolló un ICA similar teniendo como valor agregado el planteamiento de

rangos de clasificación basados en usos específicos, entre los que se destaca el del consumo humano. Backman *et al.* (1998) creó un índice para evaluar y asignar la cantidad de contaminación del agua subterránea y lo aplicó en el suroeste de Finlandia y Eslovaquia central. De manera más reciente se han planteado ICA para la evaluación del recurso hídrico a ser destinado al consumo humano, previo tratamiento, que incluyen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relacionados con el nivel de riesgo sanitario presente en el agua. Avvannavar y Shrihari (2008) mostraron los resultados de su intento por desarrollar un índice mediante seis parámetros fisicoquímicos para evaluar la calidad del agua superficial del río Netravathi en la India. Saeedi *et al.* (2010) aplicaron ocho parámetros diferentes, incluyendo K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , pH y STD como los componentes más importantes del agua para el desarrollo de un índice de calidad de las aguas subterráneas en Irán. El trabajo de Ketata-Rokbani *et al.* (2011) informa de la creación de ICA para las aguas subterráneas y los resultados de su aplicación para evaluar la calidad del agua subterránea en El-Khairat acuífero profundo de Túnez.

En México a principios de los años setentas se desarrolló un Índice de Calidad del Agua compuesto por dieciocho parámetros como sistema cualitativo para hacer comparaciones de los niveles de contaminación en diferentes áreas. Este ICA define el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo, expresado como un porcentaje de agua pura, donde el 0% del ICA representa agua altamente contaminada y el 100% agua en excelentes condiciones. Este ICA

sigue vigente en la actualidad, no obstante para fines exclusivos de evaluación se ha decidido utilizar tres parámetros indicadores (Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST)) que muestran la influencia antropogénica desde el punto de vista de la afectación por la presencia de centros urbanos e industriales.

Si bien este ICA incluye gran cantidad de parámetros indicadores elegidos a partir de las estaciones de medición de la Red Nacional de Monitoreo de la Comisión Nacional del Agua, es de mencionar que los distintos pesos relativos (W_i) asignados a cada parámetro para su sistematización no corresponden con las características geohidrológicas de cada región, no se toma en cuenta la injerencia de cada parámetro en su entorno como puede ser la geología del suelo e incluso el uso de suelo. Se sustenta más bien en una estandarización lineal homogénea tomando como base que el recurso hídrico para el abastecimiento de las poblaciones se obtiene de fuentes superficiales y no subterráneas como es el caso de la Península de Yucatán.

De acuerdo con lo anterior y con la intención de establecer un sistema estimativo de la calidad del agua subterránea basado en la medición física de los parámetros de contaminación del agua y el uso de una escala estandarizada de medición para expresar la relación entre la existencia de varios contaminantes en el agua y el grado de impacto en los diferentes usos de la misma para esta región, en este estudio se consideró utilizar siete parámetros fisicoquímicos para el cálculo del

ICA con distintos pesos relativos (W_i), según la importancia que se le concedía a cada uno de ellos en la evaluación total.

Se ilustra y explica además el comportamiento de siete parámetros fisicoquímicos donde se pretende realizar una valoración cuantitativa y cualitativa de la calidad de las aguas subterráneas de manera espacial y temporal en el acuífero del sureste del Estado de Quintana Roo.

Área de estudio

El área de estudio forma parte de dos Subregiones Hidrológicas (RH): la No. 33-A conocida como Bahía de Chetumal y Otras, y la No. 33-B conocida como Cuencas Cerradas (Figura 3.1). Se localiza geográficamente al sureste de la Península de Yucatán en las coordenadas $17^{\circ} 49'$ a $20^{\circ} 12'$ de latitud norte y entre los $87^{\circ} 30'$ y los $89^{\circ} 27'$ de longitud oeste, cubriendo una extensión total de 37,896,420 km². Colinda hacia el nororiente con el mar Caribe y hacia el suroriente por una línea que está definida por la Bahía de Chetumal, por el límite nacional con Belice en un tramo de límite natural constituido por el río Hondo y enseguida por el límite político con Belice (UQROO, 2002). Esta área tiene un notable contraste topográfico, hacia el norte y la franja costera se observa un relieve topográfico plano con elevaciones que van de 0 a 20 msnm, mientras que al sur-suroccidente se observa un relieve ondulado con elevaciones que van de 50 a 340 msnm (Bauer-Gottwein *et al.* 2011). La temperatura promedio anual es de 26.15°C , con temperaturas máximas entre 36°C y 38°C , y mínimas entre 12°C y 14°C (CCPY,

2012). De acuerdo a la clasificación climática de Köppen-Geiger, la región cuenta con un clima aw2 (i); cálido subhúmedo con abundantes lluvias en verano y parte de invierno (CNA, 2006). La precipitación media anual es de 1365 mm, aproximadamente 600 mm más alta que el promedio nacional el cual es 772 mm (JICA, 2004; Alcocer *et al.*, 1999). La temporada de lluvias se presenta en los meses de mayo a octubre, con una lámina media mensual desde 150 a 220 mm, mientras que la temporada de estiaje o secas comprende los meses de noviembre a abril, durante los cuales las láminas llovidas son menores que 60 mm (UQROO, 2002).

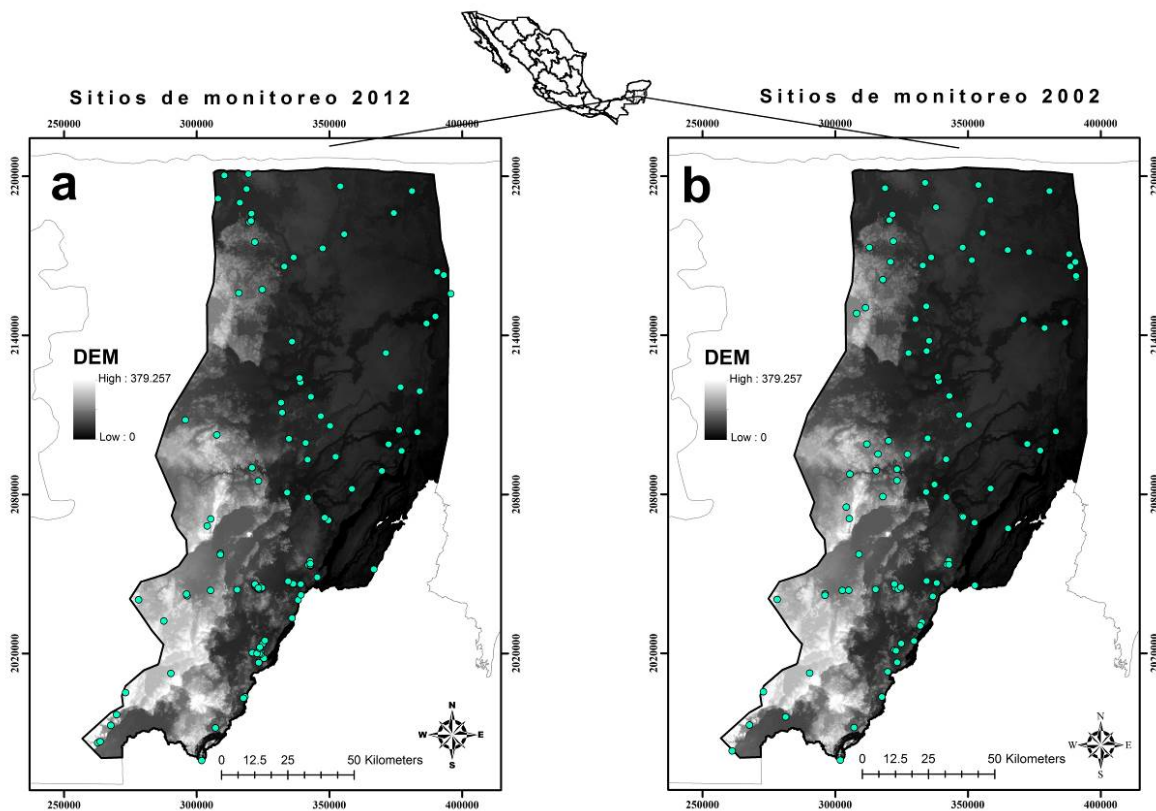


Figura 3.1. Ubicación geográfica del área de estudio. La figura “a” muestra los sitios de monitoreo del año 2012, la figura “b” muestra los sitios de monitoreo del año 2002. El fondo en sombreado gris indica el Modelo Digital de Elevación (DEM) modificado de INEGI (2014). El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Marco hidrogeológico

El área de estudio se define como una unidad geológica cubierta casi en su totalidad de sedimentos calcáreos de origen marino del Terciario reciente (Butterlin & Bonet, 1960; López-Ramos, 1972). Se sabe por Isphording (1975) que la geología estructural de la región de estudio está conformada por una secuencia de rocas de edad Terciaria constituida de evaporitas intercaladas con rocas calizas y minerales como la dolomita, aragonita, yeso y halita (Figura 3.2). Estas rocas carbonatadas 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, que a su vez resultan en la presencia de un sistema acuífero cárstico maduro con amplias fisuras, fracturas y cuevas (Beddows *et al.*, 2002; Hausman,

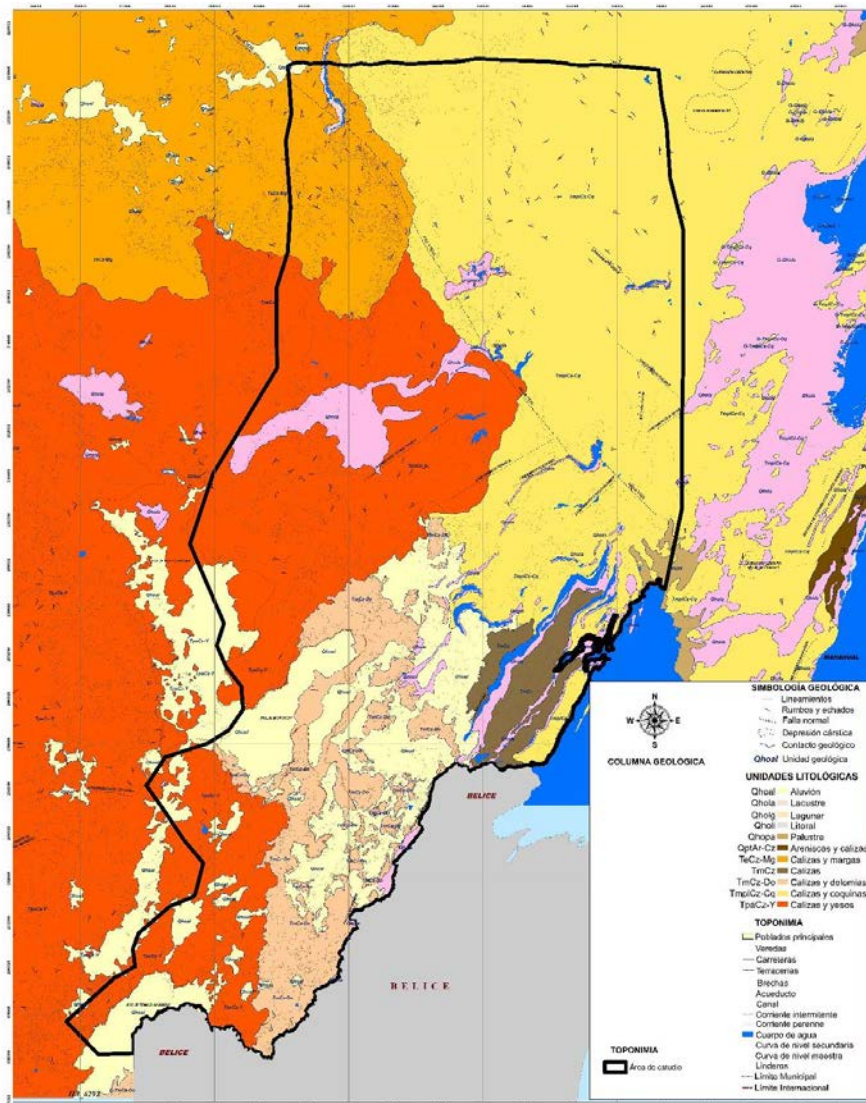


Figura 3.2. Mapa geológico de la Península de Yucatán modificada de SGM (2007). El contorno en negro representa el área de estudio. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Fisiográficamente, el área de estudio se ubica en la unidad “Planicie Central” caracterizada por tener una superficie plana ligeramente rugosa y ondulada (López-Ramos, 1972).

Estratigráficamente, la unidad sedimentaria más antigua que aflora en región de estudio (Figura 3.2) corresponde a la Formación Icaiché (TpaCz-Y) del Paleoceno constituida por calizas con yesos, horizontes de arcillas y fragmentos de sílice (SGM, 2007). Esta Unidad le sobreyace discordantemente la Formación Estero Franco (TmCz-Do) del Mioceno constituida por calizas y dolomías y horizontes de yeso que cambia de facies lateralmente a la Formación Bacalar (TmCz) formada por caliza, que a su vez es sobreyacida concordantemente por calizas y coquinas de la Formación Carrillo Puerto (TmplCz- Cq) 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. Y cubriendo indistinta y parcialmente a todas las unidades se tienen depósitos aluviales (Qhoal) constituidos por limos y arcillas; depósitos lacustres (Qhola) formados por una cantidad de restos vegetales mezclado con limos y arcillas, y depósitos palustres (Qhopa) formados por arcillas y limos con alto contenido de materia orgánica.

Por sus características físicas y litológicas, las rocas presentes hacia la carretera de Ucum-La Unión y González Ortega (Figura 3.2) forman parte de un acuífero de calizas de características variadas y depósitos aluviales, cuya permeabilidad

primaria es mayor en las porciones que contienen fracturamiento y cársticidad y menor en los estratos de caliza masiva CAPA (2012a) y Perry *et al.*, (2009).

La mayor parte de la región carece de un sistema de drenaje superficial y solo en algunas áreas se ha formado una red hidrológica desintegrada no muy bien definida que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficial. El acuífero se explota por medio de múltiples alumbramientos; los tipos de captación son norias, pozos someros y pozos profundos que se utilizan para diferentes usos como son: el público urbano, el agrícola y servicios, entre otros (JICA, 2004).

La recarga del acuífero tiene lugar durante los meses de mayo a octubre (UQROO, 2002). De esta manera, gran parte de la precipitación pluvial se infiltra al subsuelo a través de fracturas, oquedades y conductos cársticos en las calizas y evaporitas (CCPY, 2012). El agua fluye por el subsuelo alcanzando las costas por donde es descargada al mar, el resto se pierde por evapotranspiración. El espesor saturado de agua dulce decrece desde el interior hacia la costa (CNA, 2006; CNA 2009). En el subsuelo, el agua sigue diferentes trayectorias de flujo controladas por el desarrollo o evolución del carst profundo (Velázquez, 1986). La dirección del flujo de agua subterránea se presenta de SO-NE en las zonas de mayor altitud y de O-E hacia la costa (CNA, 2001; 2007; 2009; Charvet 2009; Gondwe *et al.*, 2010; Marín *et al.*, 2001; JICA, 2004; Perry *et al.*, 2002).

En el área de estudio se identifican dos regiones de acuíferos: la primera, corresponde a un acuífero compuesto por rocas carbonatadas del período del

Eoceno-Paleoceno ubicado hacia las porciones con mayor altitud del sur-suroccidente; la segunda, está compuesta por rocas carbonatadas del período del Mioceno-Plioceno distribuida a largo de la costa (JICA, 2004). De acuerdo a Marín *et al.* (2004), ambas regiones se pueden describir como acuíferos de porosidad triple donde el flujo del agua subterránea circula a través de la matriz, fracturas y un sistema de cavernas interconectadas con orientación NNO-SSE, casi perpendicular a la costa.

En el subsuelo, el agua sigue diferentes trayectorias de flujo controladas por el desarrollo o evolución del carst profundo (Velázquez, 1986). La dirección del flujo de agua subterránea se presenta de SO-NE en las zonas de mayor altitud y de O-E hacia la costa (Marín *et al.*, 2001; Gondwe *et al.*, 2010; Charvet 2009; JICA, 2004; CNA, 2001; 2007; 2009; Perry *et al.*, 2002). La tendencia es en relación a la mayor densidad de fracturamiento de las formaciones geológicas que lo conforman (Figura 3.3), moviéndose de las zonas de mayor precipitación hacia la costa, constituyendo hacia esta zona su área de descarga alimentando a su vez al sistema Bacalar-Río Hondo, la Bahía de Chetumal y Mar Caribe (Velázquez, 1986; CNA, 2007).

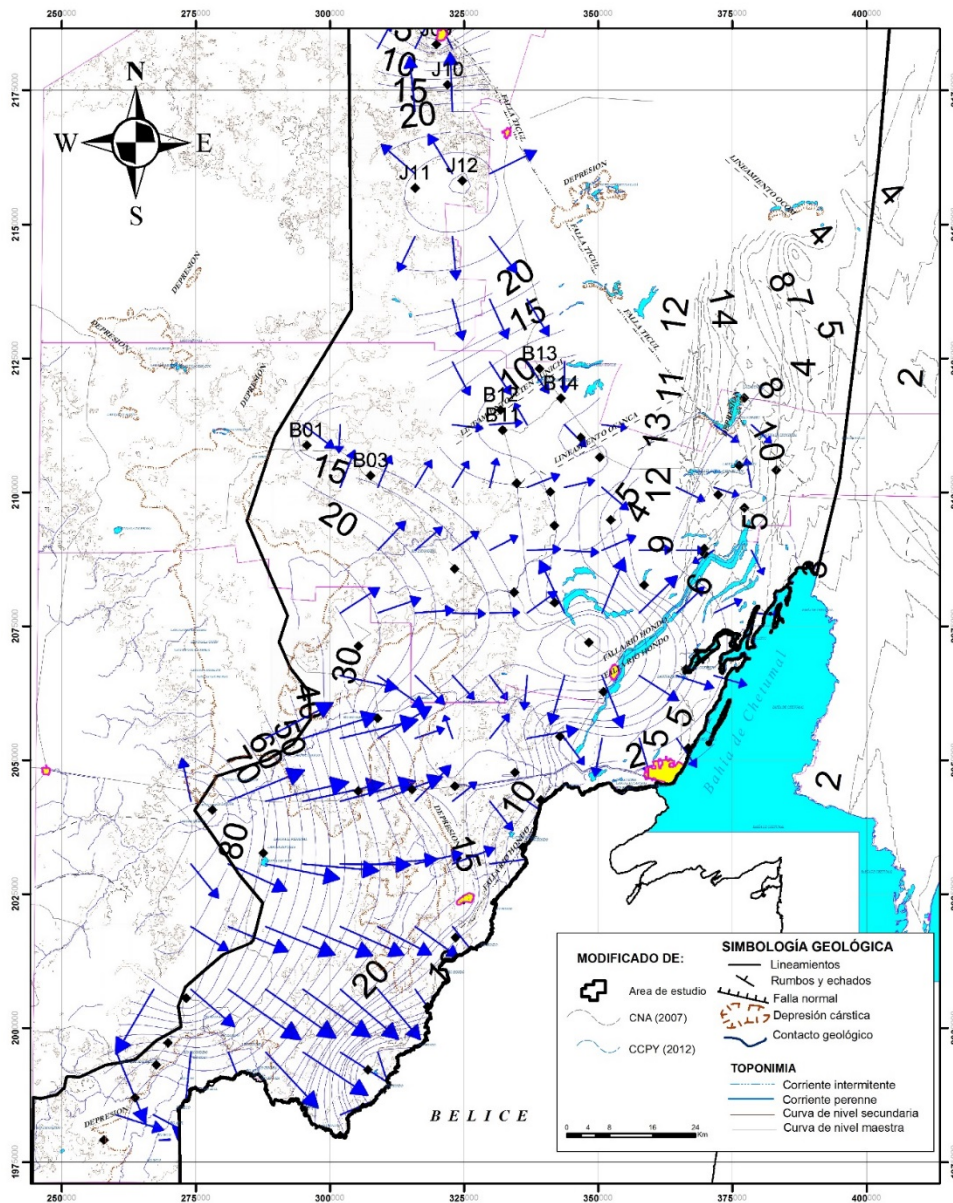


Figura 3.3. Mapa de flujo de agua subterránea a escala regional modificado de CCPY (2012). Las flechas indican las direcciones de flujo de agua subterránea según la referencia respectiva. El contorno en negro representa el área de estudio. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

METODOLOGÍA

Los datos físico-químicos de la calidad de las aguas subterráneas corresponden a dos periodos de muestreo (años 2002 y 2012) realizados durante la temporada de lluvias. La información del periodo 2002 forma parte del estudio de Aguas Subterráneas Serie II, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2002), del cual se obtuvieron 103 datos físico-químicos cubriendo la región de estudio. La información del periodo 2012 fue obtenida a partir un muestreo realizado por CAPA (2012b) cubriendo un total de 120 datos. Todas las muestras fueron colectadas de pozos de abastecimiento uniformemente distribuidos en el área de estudio. Cada sitio fue localizado geográficamente usando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) a través del sistema de coordenadas UTM (del inglés Universal Transverse Mercator). Las muestras se recolectaron después de bombear durante 10 min., para eliminar el agua que pudiera estar en las tuberías. Las mediciones de temperatura (°C), pH y conductividad eléctrica (CE) fueron tomadas en campo usando un Hydrolab Quanta G., y los análisis químicos se realizaron en el laboratorio mediante las técnicas analíticas según las Normas Oficiales Mexicanas (Tabla 3.1). Las muestras para análisis del catión sodio y los aniones fueron recolectadas en envases de polietileno de 2 litros. Todas las muestras se transportaron y preservaron a una temperatura entre 4 °C y 10 °C hasta la realización de su análisis (NOM-014-SSA1-1993). Posteriormente, las muestras fueron analizadas en el laboratorio para sus constituyentes químicos: Alcalinidad

total y Alcalinidad a la Fenolftaleína por titulación con ácido sulfúrico 0.02N (NMX-AA-36-2001), Dureza total y Dureza de calcio por titulación con EDTA (NMX-AA-072-SCFI-2001), Cloruros por titulación con nitrato de plata (NMX-AA-073-SCFI-2001), Sólidos Disueltos Totales por el método gravimétrico (NMX-AA-034-SCFI-2001), Nitratos por el método de reducción con cadmio cuperizado (NOM-AA-079-SCFI-2001), Sulfatos por el método turbidimétrico (NMX-AA-074-SCFI-1981), Sodio por el método potenciométrico (Ion Selectivo).

Tabla 3.1. Técnicas analíticas según las Normas Oficiales Mexicanas.

Parámetro	Método	Norma oficial mexicana
Alcalinidad total y Alcalinidad a la Fenolftaleína	Titulación con ácido sulfúrico 0.02N	NMX-AA-36-2001
Dureza total y Dureza de calcio	Titulación con EDTA	NMX-AA-072-SCFI-2001
Cloruros	Titulación con Nitrato de Plata	NMX-AA-073-SCFI-2001
Sólidos Totales Disueltos	Método gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2001
Nitratos	Método de reducción con cadmio cuperizado	NOM-AA-079-SCFI-2001
Sulfatos	Método turbidimétrico	NMX-AA-074-SCFI-1981
Sodio	Espectrofotómetro de absorción atómica	NMX-AA-051-1981

Índices de Calidad del Agua (ICA)

El Índice de Calidad del Agua fue desarrollado por Brown *et al.* (1970) y mejorado por Deininger (Scottish Development Department, 1975). El ICA se define como una técnica de clasificación que engloba la influencia compuesta de cierto grupo parámetros de calidad del agua en un solo valor general (Aly *et al.*, 2014). El método ICA ha sido utilizado debido a su capacidad de expresar de forma integral la información de la calidad del agua subterránea de alguna región determinada (Sadat-Noori *et al.*, 2014).

El ICA fue calculado con el fin evaluar la calidad del agua subterránea de la región de estudio de acuerdo con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994). Se utilizaron siete parámetros químicos de calidad de agua (pH, SDT, Dureza Total, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ y NO₃⁻) y el cálculo consistió de tres etapas. En la primera, a cada uno de los siete parámetros se les asignó una ponderación (w_i) acorde a su importancia relativa en la calidad del agua para consumo humano, así como de las condiciones geohidrológicas de la región de estudio (zona cárstica). La ponderación máxima fue de cinco y se asignó a sólidos totales disueltos y nitratos en función de los efectos adversos en la salud humana (Camargo y Alonso, 2007; Pacheco *et al.*, 2004). A los iones sodio y cloruro se les asignó una ponderación de cuatro ya que son indicativos de mezcla con agua marina (intrusión salina) en las zonas costeras. La ponderación de tres fue asignado a la dureza total y al ion sulfato, y al pH se le asignó la ponderación mínima de uno debido a su variación mínima.

En la segunda etapa, se determinó el peso relativo (W_i) de cada parámetro de acuerdo con la ecuación del método del peso aritmético (Brown *et al.*, 1970; Horton, 1965):

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=0}^n w_i} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde, W_i es la ponderación relativa, w_i es el peso de cada parámetro y n es el número de parámetros.

En la tercera etapa se estableció una escala de valoración de la calidad para cada parámetro (q_i). Para esto, se dividió la concentración resultante de cada muestra de agua analizada por su respectivo límite máximo permisible de acuerdo con NOM-127-SSA1-1994 y el resultado fue multiplicado por 100:

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde, q_i es la calificación de la calidad, C_i es la concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua en mg/l y S_i es el valor estándar de agua potable en mg/l (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Pesos relativos de los parámetros considerados para el cálculo del Índice de Calidad de Agua subterránea según su importancia para la salud humana.

Parámetros	Unidad	Límite Máximo Permisible México NOM-127-SSA1-1993		Ponderación (wi)	Ponderación relativo (Wi)
Ph	Rango pH	6.5	8.5	1	0.04
SDT	mg/l		1000	5	0.20
Dureza total	mg/l		500	3	0.12
NO ₃ ⁻	mg/l		10	5	0.20
Cl ⁻	mg/l		250	4	0.16
SO ₄ ⁼	mg/l		400	3	0.12
Na ⁺	mg/l		200	4	0.16
TOTAL				25	1.00

Finalmente, para calcular el ICA se determinó el SI_i usando la Ecuación 3:

$$SI_i = (Wi)(qi) \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde SI_i es el subíndice de cada parámetro y q_i es la calificación de la calidad.

$$ICA = \sum SI_i \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde ICA es el Índice de Calidad del Agua y SI_i es el subíndice de cada parámetro.

El resultado final son valores clasificados en cinco categorías de calidad del agua: excelente (<50), buena (50-<100), pobre (100-<200), muy pobre (200-300) y no apta para consumo humano (>300).

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para comparar los valores de las medias, desviaciones estándar y varianza de cada parámetro (Tabla 3.3). Para determinar si existe diferencia en la calidad del agua entre las muestras de agua correspondientes a los años 2002 y 2012, se realizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, debido a que los valores no se ajustaron a una distribución normal. Dichos análisis estadísticos se realizaron a través del programa estadístico “Statgraphics Centurion versión XV”.

Tabla 3.3. Estadística descriptiva del agua subterránea durante la temporada de lluvias de 2002.

Parámetro	Unidad	No. Muestras	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Sesgo
pH		103	7.15	8.23	7.63	0.21	2.81%	0.32
T	°C	103	25.1	31.3	27.25	1.04	3.80%	1.25
SDT	mg/l	103	228.2	2877	847.15	448.51	52.94%	2.2
Dureza Total	mg/l como CaCO ₃	103	140.61	2304.84	693.49	381.03	54.94%	1.64
Na ⁺	mg/l	103	13.79	531.07	89.83	84.64	94.22%	2.98
Cl ⁻	mg/l	103	17.37	911.07	139.2	144.76	103.99%	3.47
SO ₄ ⁼	mg/l	103	4.32	1845.79	326.31	385.52	118.15%	1.82
NO ₃ ⁻	mg/l	103	0.062	8.8	1.6827	1.92	114.09%	1.95

Uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar de forma lógica y coordinada en la captura, almacenamiento, análisis, transformación y presentación de toda la información geográfica y sus atributos, con el fin de satisfacer múltiples propósitos (Burrough & Mcdonnell, 1998).

En este estudio, la modelación de los patrones de distribución espacial de cada parámetro de calidad del agua, se desarrolló con base en técnicas geoestadísticas usando la interpolación Kriging. A través de estas técnicas se puede estimar los valores espaciales en aquellos sitios no muestreados o en el que no se ha realizado algún tipo de medición. El método Kriging se sustenta sobre modelos estadísticos que incluyen la auto-correlación y la generación de superficies de predicción con elevado grado de certeza (Goovaerts, 1997). Kriging se comprende en tres etapas: el análisis estadístico-exploratorio de los datos, el modelo del variograma (ajuste teórico) y la creación de la superficie de predicción (García, 2004). Su ecuación general es la siguiente:

$$\hat{Z}(0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde $\hat{Z}(0)$ es la predicción de la variable de interés, Z, en el punto X_0 , $Z(X_i)$ es el valor observado en el punto (base) X_i con $i = 1, 2, \dots, N$, y λ_i es un coeficiente de

ponderación con $i = 1, 2, \dots, N$. Estas ponderaciones son estimadas considerando la correlación espacial y la configuración de las observaciones a través de los modelos del variograma equiparados a los variogramas experimentales (Castiglioni *et al.*, 2009).

Se elaboraron los mapas de distribución espacial de cinco variables hidrogeoquímicas (Dureza Total, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-). Los mapas fueron creados utilizando el programa ArcGIS 10.3. El ajuste teórico del variograma se realizó a través del programa GS plus versión 9.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Análisis Estadístico Descriptivo

El resumen estadístico de la composición química de las muestras del agua subterránea para los años 2002 y 2012 se presenta en las Tablas 3.3 y 3.4. Las muestras de agua subterránea presentaron valores de pH de 6.71 – 8.23, indicando que el agua fue moderadamente alcalina para los periodos estudiados. No obstante, ninguna de las muestras analizadas estuvo fuera de los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 3.4. Estadística descriptiva del agua subterránea durante la temporada de lluvias de 2012.

Parámetro	Unidad	No. Muestras	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Sesgo
pH		120	6.71	8	7.18	0.22	3.13%	0.68
T	°C	120	21.0	32	27.64	1.3	4.70%	-1.09
SDT	mg/l	120	288.6	7466.85	1182	880.26	74.47%	4.1
Dureza Total	mg/l como CaCO ₃	120	122.5	2160	658.02	380.72	57.86%	1.19
Na ⁺	mg/l	120	1.0	1060	106.44	125.92	118.31%	4.54
Cl ⁻	mg/l	120	14.0	1578	148.65	188.65	126.91%	5.18
SO ₄ ⁼	mg/l	120	0.01	2000	334.15	393.02	117.62%	2.05
NO ₃ ⁻	mg/l	120	0.002	9.36	1.47	1.98	134.74%	2.14

Los STD para el periodo 2002 variaron entre 228.2 y 2,877.0 mg/l con una media y desviación estándar de 847.15 ± 448.51 mg/l. Para el periodo 2012, el contenido de STD varió entre 288.6 y 7466.85 mg/l con una media de 1182.04 ± 880.26 mg/l (Figuras 3.4a y 3.4b). Además de exhibir una gran dispersión, se observó para el periodo 2002, que más del 22% de las muestras rebasó el límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (1000 mg/l), mientras que para el periodo 2012 más del 42% de las muestras excedió dicho límite (Tablas 3.3 y 3.4). En general, las menores concentraciones de SDT se localizaron en la planicie interna del área de estudio, con valores entre 500 y 1000 mg/l, incrementándose gradualmente hacia las costas hasta alcanzar concentraciones mayores a 2,800 mg/l para el periodo 2002 y mayores a 7,400 mg/l para el periodo 2012 (Figura 3.4). La magnitud y diferencia de los valores encontrados demuestra el efecto de salinización que da origen a aguas de mala calidad en algunas regiones del área de estudio, en especial en la zona norte. Esto coincide con lo reportado por CCPY (2012) en el que reportan que la gran dispersión del contenido de STD entre la porción norte y sur del área de estudio, sugiere que el emplazamiento de las aguas subterráneas se da en materiales litológicamente diferentes, unos más solubles que otros; sin embargo, hacia la porción noreste, la menor variación indica la presencia de materiales muy solubles.

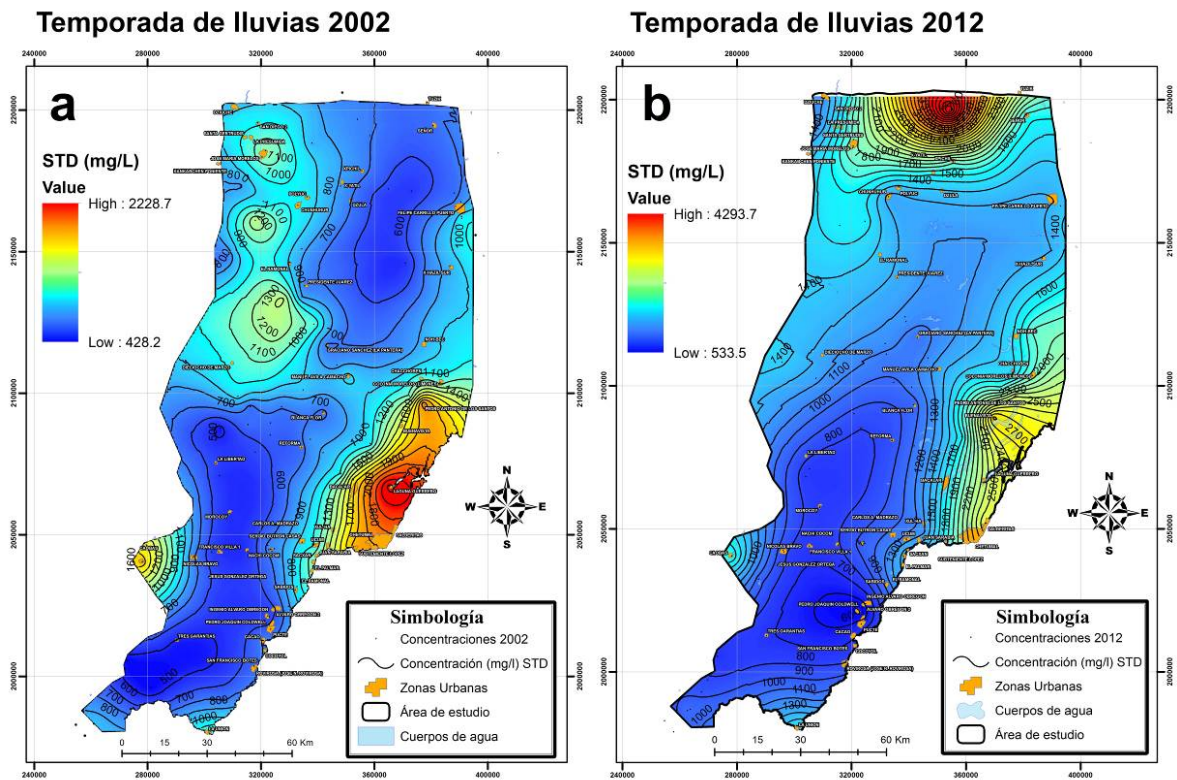


Figura 3.4. Concentraciones de sólidos totales disueltos (a) 2002 y b) 2012) en el agua subterránea de la zona de estudio. Los puntos en azul representan los sitios monitoreados. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

La temperatura (T °C) no presentó mayores cambios en ambos años, teniendo valores medios alrededor de 27 °C con una desviación estándar de ± 1 aproximadamente. El orden de abundancia de los aniones ($\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$) fue similar para ambos años. La amplitud encontrada en los valores máximos y mínimos de los cationes y aniones revela una heterogeneidad espacial del medio acuífero debido al cambio dinámico entre los diferentes procesos

hidrogeoquímicos presentes en el área de estudio, como la disolución de minerales de rocas carbonatadas, dolomías y evaporitas y la mezcla de agua dulce-marina.

Análisis geoestadístico

La prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S) indicó que los valores de Dureza Total, Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} no presentaron diferencias estadísticamente significativas para ambos periodos, por lo que se agruparon para formar un solo conjunto de datos. Por el contrario, los valores de NO_3^- exhibieron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Se obtuvo la media aritmética para aquellos valores que coincidieron en un mismo sitio en ambos periodos.

A partir de los resultados de la prueba de K-S se construyeron los variogramas omnidireccionales para cada variable química ajustándolo a un modelo teórico isotrópico (Tabla 3.5). En ningún caso se consideró la existencia de anisotropía debido al número de datos disponibles.

Tabla 3.5. Modelo teórico de variograma con mejor ajuste para los parámetros hidroquímicos.

Parámetro	Modelo		Pepita		Meseta		Rango		R ²	
	2002	2012	2002	2012	2002	2012	2002	2012	2002	2012
NO3	Exponencial	Exponencial	0.19	0.88	1.63	4.07	20700	31200	0.67	0.69
Dureza Total	Esférico		0.07		0.27		53600		0.84	
Cl	Gaussiano		0.24		0.63		79155		0.89	
SO4	Exponencial		0.33		0.61		24300		0.72	
Na	Esférico		0.29		0.86		77500		0.81	

Los modelos teóricos a los que se ajustaron los semivariogramas experimentales fueron el modelo esférico, el modelo exponencial y el modelo gaussiano. De éstos, el parámetro con mejor coeficiente de determinación (R^2) fue el ion cloruro con el 89%, mientras que el ion NO_3^- del periodo 2002 fue el que menor coeficiente de determinación mostró con el 67%. Se utilizó el método de interpolación Kriging Ordinario, para la elaboración de los mapas de distribución espacial para cada variable química.

Mapas de distribución Nitratos

La presencia de nitratos en el agua subterránea puede tener diversos orígenes relacionados con actividades humanas como la agricultura, la disposición de los desechos de humanos y de animales, la infiltración de aguas residuales sin tratamiento y en pequeña proporción la precipitación (Pacheco *et al.*, 2004; Price, 2003). En contraste con el ion amonio, el nitrato puede moverse libremente a través del acuífero por lo que difícilmente precipita (Hounslow, 1995). Diversos estudios acerca de la contaminación por nitratos en aguas subterráneas, han mostrado que generalmente existe una relación inversa entre las concentraciones de nitratos y la profundidad por debajo del nivel freático (Freeze & Cherry, 1979; Ritter & Chirnside, 1984). Pacheco (1985) reportó para una región rural al norte del estado de Yucatán que la tendencia de las concentraciones de este contaminante en el agua subterránea es de naturaleza estacional, con las mayores concentraciones asociadas a los centros poblacionales.

Las Figuras 3.5a y 3.5b muestran que existió una diferencia en la distribución espacial de NO_3^- para los periodos 2002 y 2012, como resultado posible de las actividades agrícolas, por lo que sus cantidades pueden variar de una temporada a otra o de un año a otro (Velasco, 2012). Todos los valores de NO_3^- del periodo 2002 y 2012 se encontraron por debajo del límite máximo permisible (10 mg/l) establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

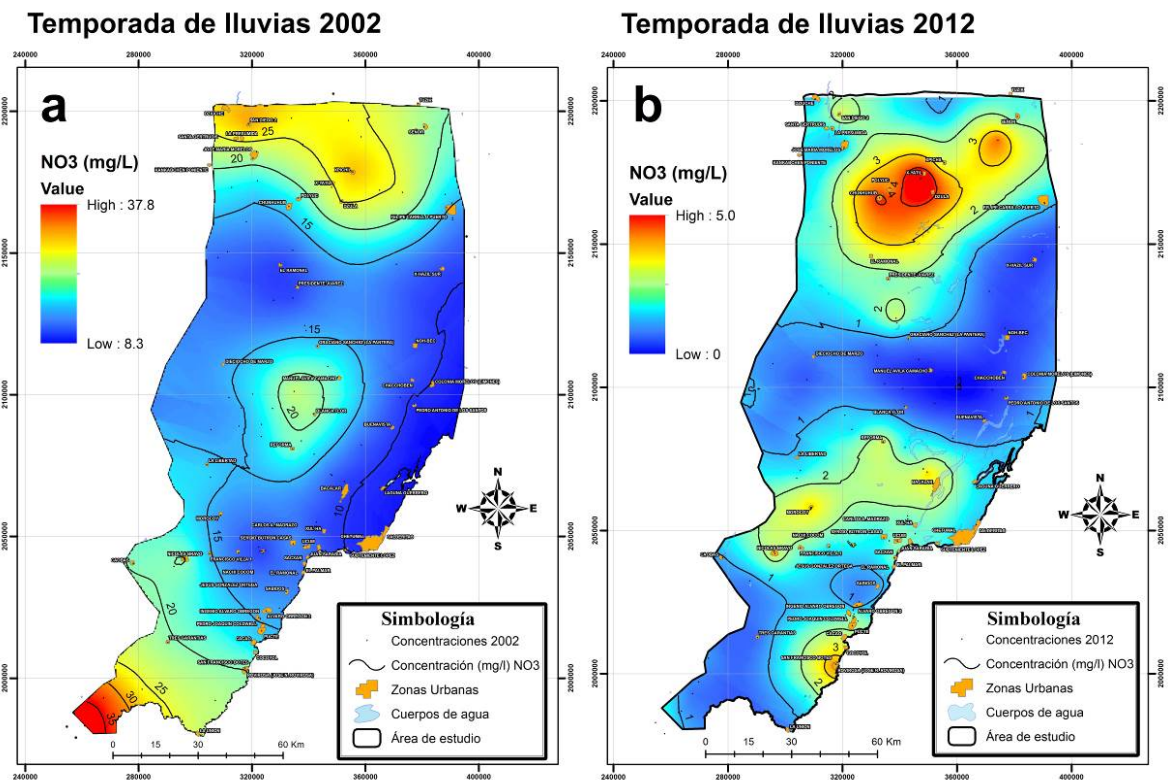


Figura 3.5. Concentraciones de nitratos (a) 2002 y b) 2012) en el agua subterránea de la zona de estudio. Los puntos en azul representan los sitios monitoreados. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Es importante señalar que cuando el nitrato se halla en concentraciones de 10 mg/l o superiores, el agua es indeseable para consumo humano, debido al posible efecto tóxico que puede tener sobre los niños (cianosis) (Hernández, 2008; Mora & Alfaro, 1999; Pacheco & Cabrera 2003).

Dureza Total

La dureza total representa la suma de las durezas individuales debidas a los iones de calcio, magnesio y es expresado como mg/l de CaCO_3 (Appelo & Postma 1996; Manahan, 1991). Las aguas duras son por lo general incrustantes, mientras que las blandas suelen ser agresivas (Lillo, 2007). Dependiendo de varios aspectos como el pH del agua y la concentración de carbonatos de calcio y magnesio, pueden producir procesos de corrosión o incrustación en las tuberías utilizadas para el abastecimiento de aguas domésticas (Mora & Alfaro, 1999).

Los valores de dureza total de las aguas subterráneas en el área de estudio, variaron entre 122.5 mg/l y 2,304.84 mg/l como CaCO_3 . Los valores obtenidos se agruparon en tres categorías; las dos primeras, cumplen con lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (<500 mg/l) y la tercera, presentó valores que excedieron dicho límite (Figura 3.6).

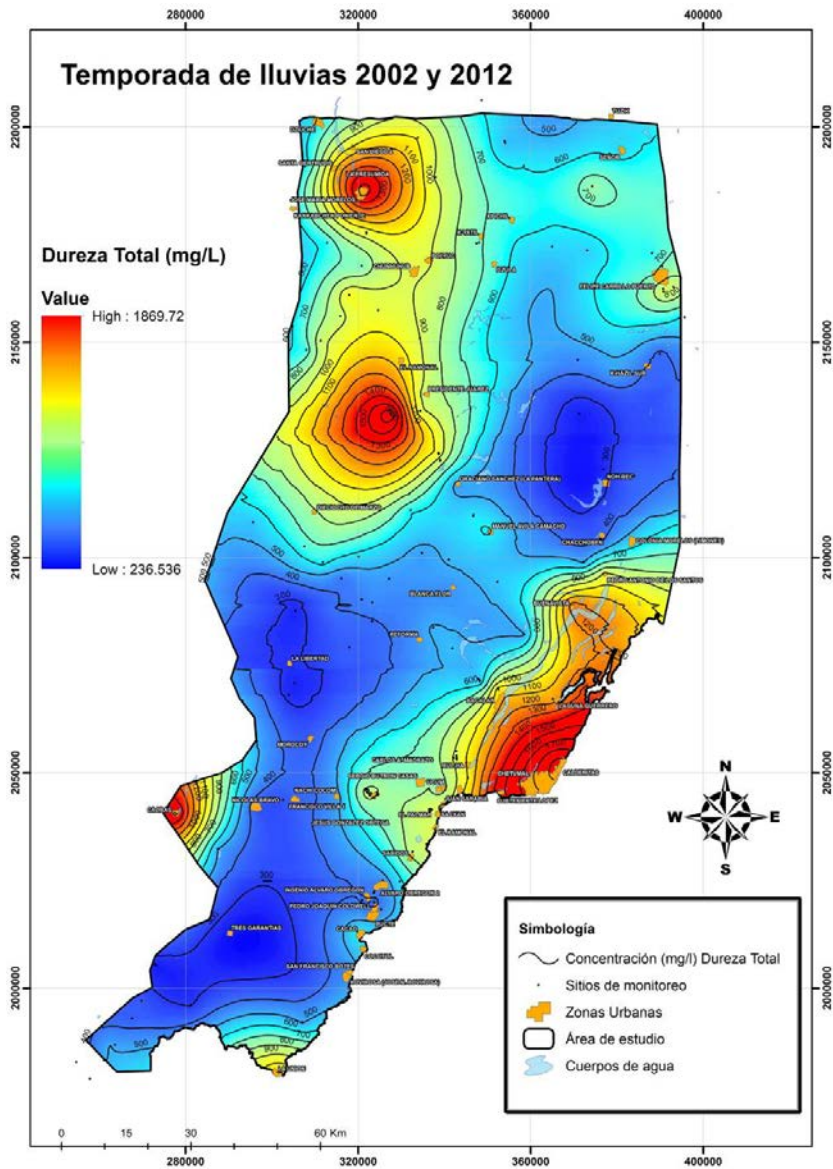


Figura 3.6. Concentración de dureza total en el agua subterránea de la zona de estudio. Los puntos en azul representan los sitios monitoreados. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

En el área de estudio, el 60% de las muestras rebasaron la Norma, siendo el valor máximo encontrado de 2,304.84 mg/l como CaCO_3 . Con base en la clasificación de Custodio & Llamas (1976), el agua subterránea del área de estudio se clasificó como de dura a muy dura lo que pudiera explicarse por la presencia de minerales disueltos como carbonatos (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y anhidrita (CaSO_4), característicos del sistema cárstico de la Península de Yucatán (CCPY, 2012; Pacheco *et al.*, 2004).

Es importante señalar que el problema que afronta la población al utilizar aguas muy duras no sólo radica en una mala cocción de los alimentos o en la generación de sarro e incrustaciones en los utensilios de cocina y en la poca disolución del jabón, sino además predispone a los pobladores a padecer ciertas enfermedades. Por ejemplo, en el Estado de Yucatán, Medina *et al.* (2002) reportó que el antecedente familiar y la dureza extrema (≥ 400 mg/l de CaCO_3) del agua empleada para consumo humano son factores que predisponen el desarrollo de la enfermedad de urolitiasis la cual se incrementa en forma notable con la edad.

Sodio

El sodio no se encuentra libre en la naturaleza, la fuente común de los niveles de sodio en el agua subterránea se debe, en algunos casos, a la presencia de rocas evaporitas, al efecto de la intrusión marina o bien a la inadecuada disposición de desechos de humanos y de animales (Basavaraddi *et al.*, 2012; Lillo, 2007; Pacheco *et al.* 2004). Los valores de las concentraciones del sodio de las aguas

subterráneas en el área de estudio oscilaron entre 1.0 y 1060 mg/l. Con base en el límite máximo permisible de 200 mg/l establecido en la NOM-127-SSA1-1994, se estimó que el 9.8% de los aprovechamientos rebasaron la Norma (Figura 3.7).

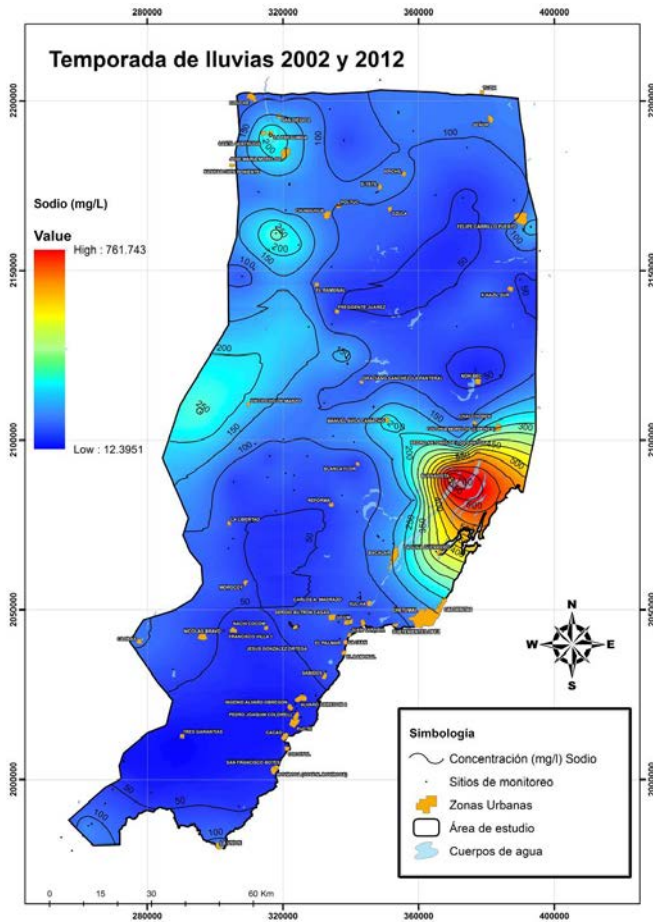


Figura 3.7. Concentración de sodio en el agua subterránea de la zona de estudio. Los puntos en azul representan los sitios monitoreados. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Con el fin de identificar los procesos geoquímicos que originan la presencia del sodio en el agua subterránea del área de estudio, se elaboró un diagrama con la relación Na^+/Cl^- en mEq/l (Figura 3.8). De manera general, se observó que las aguas subterráneas del área de estudio se encontraban ligeramente enriquecidas en sodio. Además, la mayoría de las muestras se encontraron por debajo de 10 y 15 mEq/l para Cl^- y Na^+ , respectivamente.

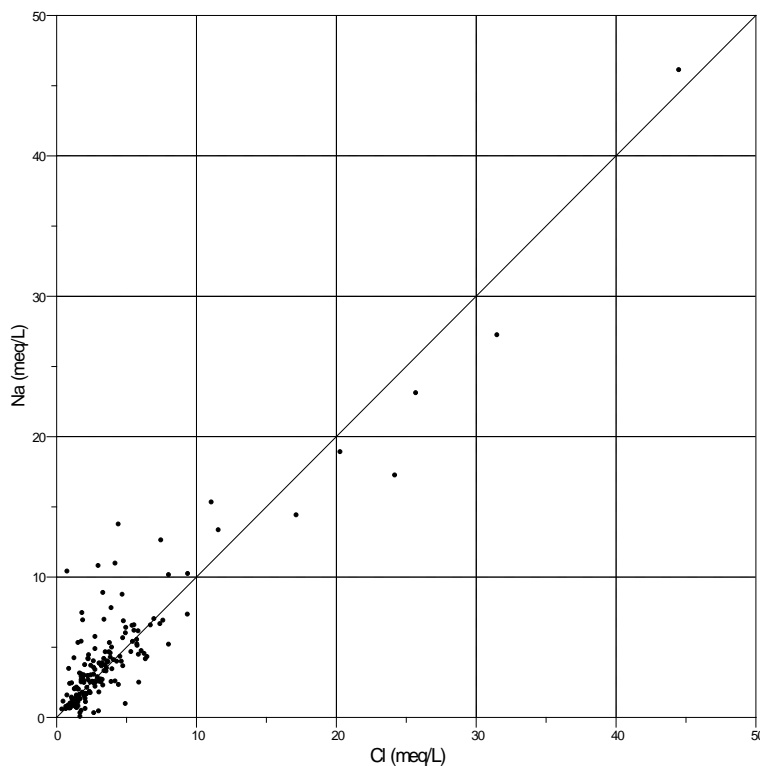


Figura 3.8. Relación del Na^+ y Cl^- . Los puntos en negro representan las muestras. Algunos estudios de toxicidad del sodio en las aguas subterráneas y su efecto adverso en la salud humana revelan que la ingestión de sodio en altas concentraciones puede causar hipertensión, fallo del corazón, enfermedades renales, cirrosis hepática, toxemias del embarazo, enfermedad de Menier, la cual

es una afección del oído interno que causa vértigo, y la hipernatremia (elevado nivel de sodio en la sangre) en los niños (Catalán, 1981). Asimismo, como cloruro de sodio puede causar náuseas, vómitos, inflamación del tracto gastrointestinal, la conmutación muscular, convulsiones e incluso la muerte (Basavaraddi *et al.*, 2012).

Cloruros

La mayor parte del cloruro que se encuentra en las aguas subterráneas suele proceder de las cuatro fuentes naturales siguientes: 1) del agua marina de sedimentación atrapada en el interior de los sedimentos; 2) de la disolución de la sal común y de los minerales afines que existen en las formaciones de evaporitas; 3) de la concentración por evaporación de los cloruros existentes en el agua de lluvia, y 4) de la disolución de las partículas de material sólido existentes en la atmósfera (Davis & De-Wiest, 1971). De forma antropogénica, el aumento de cloruros puede ser motivado por ciertos desechos industriales, aguas residuales domésticas, retornos de aguas de riego o bien residuos de actividades en zonas pecuarias (Catalán, 1981; CCPY, 2012). El ion cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, tampoco es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, por lo que se puede considerar como una propiedad conservativa del agua resultando en un buen trazador (Manahan, 1991).

La distribución espacial de los cloruros en el agua subterránea del área de estudio (Figura 3.9), mostró un rango de concentraciones de 14.0 a 1578 mg/l. El 9.9% de las muestras excedieron los 250 mg/l que es el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994. Estos valores se ubican geográficamente hacia las porciones noreste y noroeste de la región de estudio. Esta distribución puede estar asociada con la influencia de aguas marinas, aunque no se descartan la asociación con aguas derivadas de retornos de riego o de aguas residuales derivadas de los asentamientos humanos.

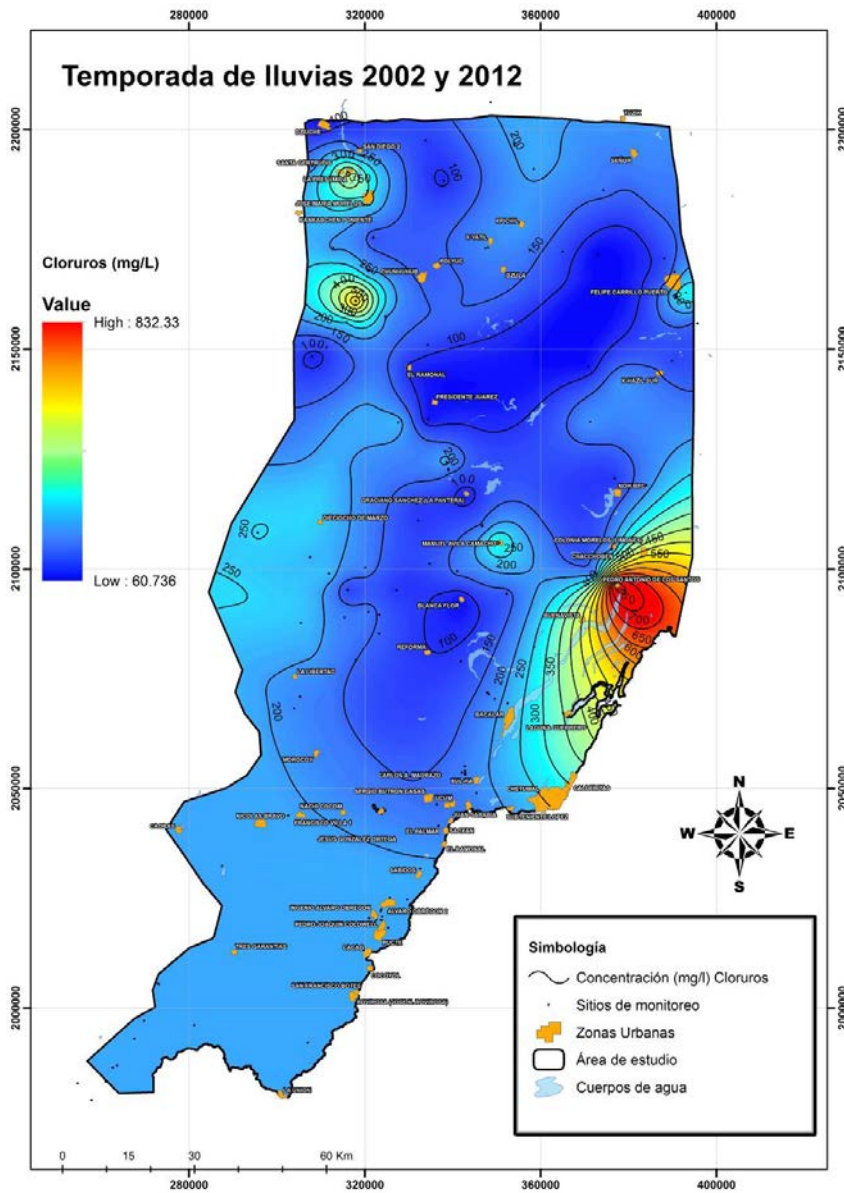


Figura 3.9. Concentración de cloruros en el agua subterránea de la zona de estudio. Los puntos en azul representan los sitios monitoreados. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Sulfatos

El origen de los sulfatos está asociado principalmente con la disolución de sales sulfatadas de yeso y anhidrita (Hounslow, 1995; Lillo, 2007). El sulfato está sujeto a procesos de reducción, especialmente en presencia de bacterias y materia orgánica además, posee la capacidad de asociarse fácilmente con otros iones (Hem, 1986). En ambientes reductores ($\text{pH} < 7$), la forma reducida estable es el ácido sulfhídrico (H_2S), mientras que en soluciones alcalinas predomina el ácido sulfúrico (HS) (Lillo, 2007). La concentración del ión sulfato en las aguas de bebida ha sido motivo de atención debido a su acción catártica, habiéndose encontrado un efecto laxante de las aguas que contienen más de 750 mg/l (Cabrera 1986; Catalán, 1981). En la Península de Yucatán, los sulfatos son uno de los principales iones que se encuentran en las aguas subterráneas y además, difícilmente alcanzan la saturación debido a que su producto de solubilidad es muy alto (CCPY, 2012).

En el área de estudio, los valores del ion sulfato se encontraron en el rango de 0.01 a 2,000 mg/l. Dentro de este rango, el 27.8% de los aprovechamientos rebasó el límite de 400 mg/l que establece la NOM-127-SSA1-1994. La Figura 3.10 muestra que la zona suroeste y la franja central del área de estudio son las que presentaron menores concentraciones de sulfatos; sin embargo, existen áreas dentro de estas zonas con concentraciones superiores a la establecida en la NOM. No obstante, estas últimas, presentan sorprendentemente concentraciones bajas en cloruros, lo que sugiere que sus características provienen específicamente de la disolución de evaporitas (yesos/anhidritas) y no de la mezcla con agua de mar.

Por otra parte, se observó un incremento gradual hacia las zonas noreste y noroeste donde se llegaron a alcanzar concentraciones de hasta 2,000 mg/l de sulfatos. Este incremento puede estar asociado con tres factores, 1) la presencia de rocas evaporitas (yesos y anhidritas) lo que genera un incremento sustancial en la salinidad del agua subterránea (Perry *et al.*, 2011), 2) la descarga de las aguas de las zonas acuíferas de las porciones altas, y 3) la presencia de aguas marinas.

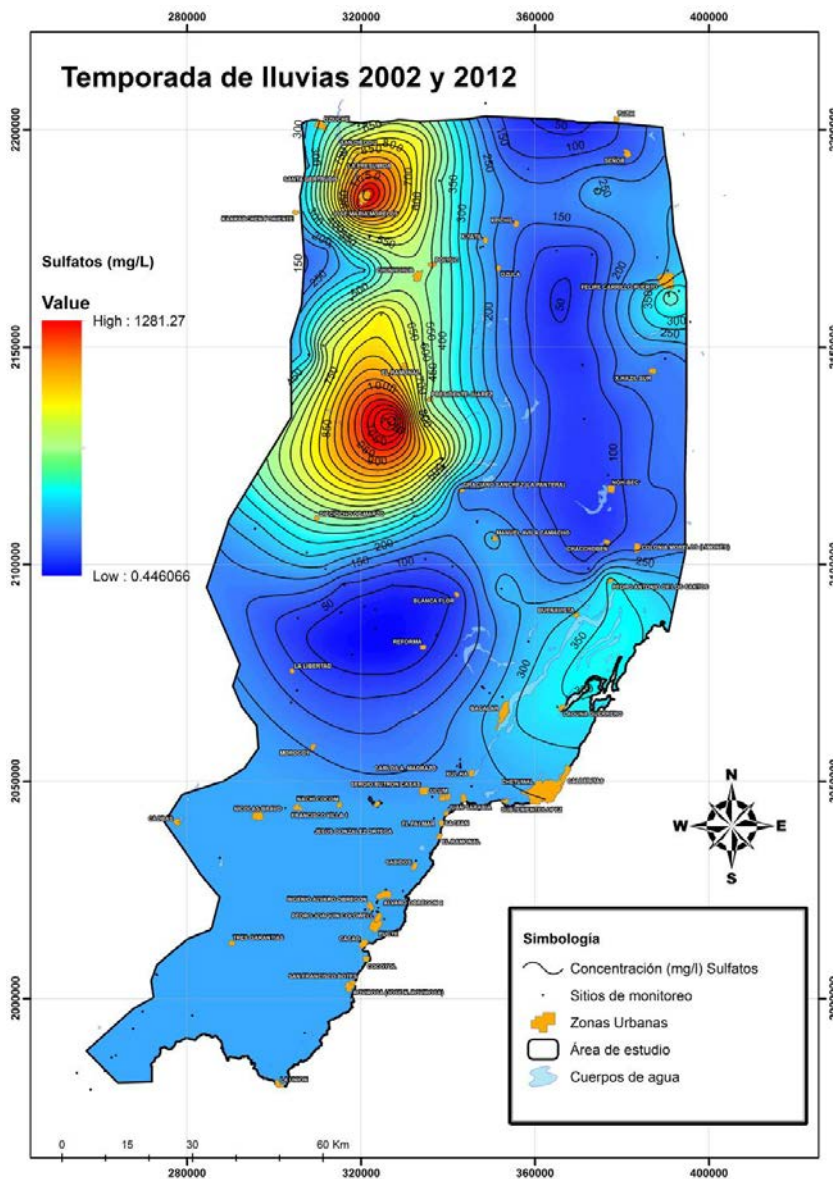


Figura 3.10. Concentración de sulfatos en el agua subterránea de la zona de estudio. Los puntos en azul representan los sitios monitoreados. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Índice de Calidad del Agua Subterránea

Para los dos periodos analizados, se encontró una gran variación en los índices de calidad del agua. Respecto al periodo 2002, el índice más bajo fue de 14 y el máximo de 174 (Figura 3.11a). El valor medio del ICA es de 53 y la mediana de 47, lo que indica que para este periodo aproximadamente la mitad de los pozos se encontró en la categoría de “excelente”. De los aprovechamientos muestreados, el 58% se ubicó en la categoría de “excelente”, el 36% en la categoría “buena” y el 6% en la categoría “media”. Respecto al periodo 2012, el índice más bajo encontrado fue de 18 y el máximo de 372 (Figura 3.11b). El valor medio del ICA es de 74 y la mediana de 69. Estos valores permitieron constatar una degradación en la calidad del agua, ya que la mitad de los pozos se clasificó en las categorías “excelente” y “buena”. De los aprovechamientos muestreados, el 34% se ubicó en la categoría de “excelente”, el 48% en la categoría “buena”, el 15% en la categoría “media”, el 2% en la categoría “pobre” y el 1% en la categoría “extremadamente pobre”. Estas dos últimas categorías se ubicaron geográficamente en la porción central este del área de estudio. Esta distribución puede estar asociada con el crecimiento poblacional de las dos comunidades que se localizan en esa región, ya que pasó de 870 habitantes en el año 2000 a 1,500 en el 2010 (INEGI, 2014). Este crecimiento dio origen a la generación de más aguas residuales domésticas. Otra causa de esta distribución es el uso de agroquímicos en las actividades agrícolas (producción de Piña) que se desarrollan en estas entidades. Respecto a los procesos hidrogeoquímicos que pudieran complementar el elevado ICA encontrado, los valores concuerdan con lo reportado por CCPY (2012) en el que

encontró elevadas concentraciones de sólidos disueltos totales, sulfatos y cloruros en el pozo de abastecimiento de una localidad de esa región, con la posible influencia de aguas marinas, la asociación con aguas derivadas de retornos de riego y de aguas residuales.

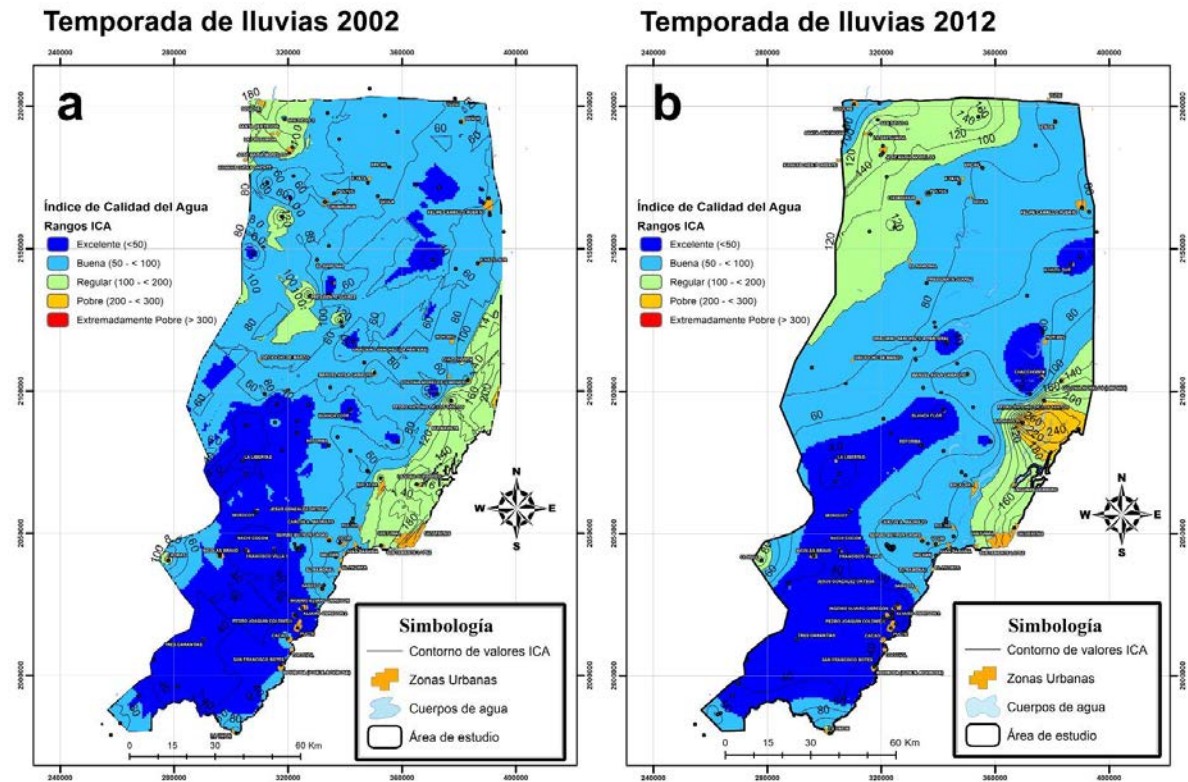


Figura 3.11. Índice de Calidad del Agua (a) 2002 y (b) 2012 de la zona de estudio. Los puntos en azul representan los sitios monitoreados. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

De manera general, el mapa de distribución del ICA mostró un patrón espacial cualitativamente similar para ambos periodos. La calidad del agua subterránea

disminuye desde el suroeste hacia el norte exceptuando la parte sur sur-oeste así como algunas zonas de la parte noreste del área de estudio en donde se encontró la zona más segura en términos de calidad de agua para consumo humano. En estas regiones casi todos los valores del ICA se encontraron en la categoría “excelente”. La disminución de la calidad se asocia directamente con el aumento gradual en las concentraciones de sulfatos, dureza total, cloruros y sodio.

CONCLUSIONES

Los constituyentes químicos que mostraron concentraciones que excedieron el límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994 fueron: los sólidos totales disueltos (22% en el periodo 2002, y 42% en el periodo 2012), el sodio (9.8%), los cloruros (9.9%) y la dureza total (60%).

El uso de los Sistemas de Información Geográfica en la elaboración de los mapas de distribución espacial de las concentraciones, permitieron observar que las menores concentraciones para los sólidos totales disueltos, cloruros, dureza total y sodio se localizaron en la planicie interna sur del área de estudio incrementándose sus concentraciones gradualmente hacia la zona noroeste. El mapa de las concentraciones de nitratos mostró una diferencia en la distribución espacial para los periodos 2002 y 2012.

El ICA permitió demostrar que la calidad química del agua subterránea con fines de abastecimiento es aceptable para la mayoría de los sitios estudiados. No obstante el análisis comparativo de los periodos 2002 y 2012 indica de manera

general una degradación en la calidad del agua subterránea con los máximos valores del ICA ubicados hacia la parte noreste del área de estudio que corresponde con zonas que presentaron un crecimiento de la población y de zonas agrícolas.

Este estudio demuestra claramente que el uso de métodos como el valor ICA podría ser de gran utilidad para evaluar la calidad de las aguas subterráneas en sistemas cársticos, proporcionando valiosas herramientas a los tomadores de decisiones a fin de comprender de forma integral el estado de la calidad del agua subterránea y tener la oportunidad de tomar decisiones adecuadas para un mejor uso en el futuro.

Por último, se sugiere identificar zonas alternas para abastecer agua en aquellas poblaciones donde reportan los valores más altos del ICA ya que sin duda se están suministrando aguas que sobrepasan los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de doctorado del primer autor en El Colegio de la Frontera Sur. Al arquitecto Humberto Vidal Russi e ingeniero Marco Jiménez García por su valioso apoyo y atinadas sugerencias en la revisión de este artículo. Los recursos para esta investigación fueron proporcionados por el Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán a través de la Comisión de Agua Potable y

Alcantarillado del Estado de Quintana Roo mediante el contrato CAPA-CCPY-SE-001/2012.

REFERENCIAS

Alcocer, J., Lugo, A., Sánchez, M., & Escobar, E. (1999). Contaminación del agua subterránea en la Península de Yucatán, México: Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente, UIICSE, 42-50.

Aly, A. A., Al-Omran, A., & Alharby, M. (2014). The water quality index and hydrochemical characterization of groundwater resources in Hafar Albatin, Saudi Arabia, Arab J Geosci, doi:10.1007/s12517-014-1463-2

Appelo, A. J., & Postma, D. (1996). Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.

Avannavar SM, Shrihari S (2008) Evaluation of water quality index for drinking purposes for river Netravathi, Mangalore, South India. Environ Monit Assess.

Backman B, Bodis D, Lahermo P, Rapant S, Tarvainen T (1998) Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. Environ Geol 36:55–64.

Basavaraddi, S., Kouser, H., & Puttaiah, E. (2012). Sodium toxicity in ground water and its hazardous effect on life –A study in Tiptur Town and its surrounding areas, Glo. Adv. Res. J. Microbiol, 1(9), 149-154.

Beddows, P., Smart, P., Whitaker, F., & Smith, S. (2002). Density stratified groundwater circulation on the Caribbean Coast of Yucatan peninsula, Mexico, en

Martin, J., Wicks, C., Sasowsky, I., (eds), Karst Waters Institute Special Publication 7: Hydrogeology and biology of post-paleozoic carbonate aquifers, 129-134.

Brown, R., McClelland, N., Deininger, R., & Tozer, R. (1970). A water quality index: do we dare? *Water Sewage Works*, (117), 339–343.

Burrough, P., & Mcdonnell, R. (1998). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment*, England: Oxford University Press.

Camargo, J., & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas*, 16(2), 98-110.

Castiglioni, S., Castellarin, A., & Montanari, A. (2009). Prediction of low-flow indices in ungauged basin through physiographical space-based interpolation, *J. Hydrol.*, 378, 272–280.

Cabrera, A., (1986). Hidrogeoquímica del agua subterránea en Acuíferos Cársticos, Un caso de estudio. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería; Mérida, Yucatán.

Catalán, L. (1981). *Química del agua*. Madrid, España: Fuenlabrada.

CAPA (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo). (2012a). Estudio geohidrológico y geofísico por resistividad eléctrica, para la evaluación del subsuelo con la finalidad de obtener un diagnóstico del problema

de la calidad química del agua en la zona de pozos de Jesús González Ortega, municipio de Othón P. Blanco; Estado de Quintana Roo, Informe Final.

CAPA (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo). (2012b). Estudio de monitoreo en varias localidades del Estado de Quintana Roo. Coordinación de Planeación, Informe Final.

Charvet, G. (2009). Exploration, modeling and management of groundwater resources in northern Quintana Roo, Mexico. Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Dinamarca, Dinamarca.

CNA (Comisión Nacional del Agua). (1997). Diagnóstico de la Región XII, Península de Yucatán; Gerencia Regional de la Península de Yucatán, Yucatán.

CNA (Comisión Nacional del Agua). (2001). Actualización geohidrológica del acuífero de la zona norte del Estado de Quintana Roo, (poligonal comprendida entre Cancún, Nuevo Xcan, Coba y Tulum), Subgerencia Técnica.

CNA (Comisión Nacional del Agua). (2006). Ampliación de la red piezométrica en la región costera norte del Estado de Quintana Roo, segunda parte: Informe Final, Subgerencia Técnica.

CNA (Comisión Nacional del Agua). (2007). Reactivación de la red piezométrica de la zona Costa Maya, Quintana Roo, Subgerencia Técnica Regional.

CNA (Comisión Nacional del Agua). (2009). Establecimiento de una red piezométrica de la zona cañera de Álvaro Obregón, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo, Subgerencia Técnica Regional.

CCPY (Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán). (2012). Evaluación de la calidad del agua subterránea en varias localidades de los Municipios de Othón P. Blanco, Bacalar y José María Morelos del Estado de Quintana Roo, Informe Final.

Custodio, E., & Llamas, M. (1976). Hidrología Subterránea. Barcelona, España: Omega.

Davis S., & De-Wiest, R. (1971). Hidrogeología. Barcelona, España: Ariel.

Freeze, R., & Cherry, J. (1979). Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Dinius, S. H. (1987) Design of an Index of Water Quality., Water Resources Bulletin, Vol. 23, No. 11, pp. 833-843.

García, F. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales, Ecosistemas, 13(1), 78-86.

Gondwe, B., Hong, S., Wdowski, S., Bauer-Gottwein, P. (2010). Hydrologic dynamics of the ground-water-dependent Sian Ka'an wetlands, Mexico, derived from InSAR and SAR data, Wetlands, 30(1), 1–13.

Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural resources evaluation. New York, EUA: Oxford University Press.

Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B., Charvet, G., & Marín, L. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico, *Hydrogeology Journal*, 19, 507-524.

Hausman, H. (2009). Responsible Development in Tulum, Mexico: Considering Water Quality and Subaqueous Cave Locations. Tesis de Maestría, Nicholas School of the Environment of Duke University.

Hem, J.D. (1986). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2254, 263.

Hernández, J. (2008). Efecto de la evolución geoquímica en la calidad del agua subterránea en la porción central de la zona media del estado de San Luis Potosí. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultades de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, 59-61.

Horton, R. (1965). An index number system for rating water quality, *J Water Pollut Control Fed*, 37, 300–305.

Hounslow, A. (1995). Source of major ions in waters. In *Water quality data, analyses and interpretation*. EUA: Lewis publishers.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Consultado 20-06-2014 en <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/default.aspx>.

Ishphording WC (1975) The physical geology of Yucatan. *Trans Gulf Coast Assoc Geol Soc*, 25, 231–262.

JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón). (2004). Estudio de manejo de saneamiento ambiental en la costa del Estado de Quintana Roo en los Estados Unidos Mexicanos, Informe final.

Ketata-Rokbani M, Gueddari M, Bouhlila R (2011) Use of geographical information system and Water Quality Index to assess groundwater quality in El Khairat Deep Aquifer (Enfidha, Tunisian Sahel). *Iran J Energy Environ* 2(2):133–144.

Lateef, K. (2011). Evaluation of groundwater quality for drinking purpose for Tikrit and Samarra cities using water quality index, *Eur J Sci Res*, 58(4), 472–481.

Lillo, J. (2007). Técnicas hidrogeoquímicas. Tesis de Maestría, Universidad Rey Juan Carlos, España.

López-Ramos, E. (1972). Estudio Geológico de la Península de Yucatán, Gerencia de Exploración Pemex, Informe final.

Manahan, S. (1991). Metal ions and calcium in water. In *Environmental chemistry* (5a ed.). EUA: Lewis publishers.

Marín, L., Perry, E., Essaid, H., & Steinich, B. (2001). Hydrogeological investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico, First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers Monitoring, Modeling, and Management, Essaouira, Morocco.

Marín, L., Perry, E, Essaid, H., & Steinich, B. (2004). Hydrogeological investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico. In Cheng A., Ouazar D. (eds) Coastal aquifer management: monitoring, modeling and case studies, CRC, 257–278.

Medina, M., Zaidi, M., Real, E., & Orozco, S. (2002). Prevalencia y factores de riesgo en Yucatán, México, para litiasis urinaria, *Salud Pública Méx*, 44(6), 541-545.

Mora, D., & Alfaro, N. (1999). Caracterización y distribución por cantones de la dureza del agua en las fuentes utilizadas para consumo humano en Costa Rica, *Rev. costarric. salud pública*, 8(15), 01-15.

Pacheco, J. (1985). Evaluación del Contenido de Nitratos del Agua Subterránea en una Región al Norte de la Península de Yucatán. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Pacheco, J., & Cabrera A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas, *Ingeniería*, 7(2), 47-54.

Pacheco, J., Cabrera, A., & Pérez, R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México, *Ingeniería*, 8(2), 165-179.

Perry, E., Velazquez-Oliman, G., & Marin, L., (2002). The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico, *Int. Geol. Rev*, 44, 191–221.

Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B. & Velázquez-Oliman. G. (2009). Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology, *Journal of Hydrology*, 367, 27–40.

Perry, E.; Velazquez-Oliman, G.; & Wagner, N. (2011). Preliminary investigation of groundwater and surface water geochemistry in Campeche and southern Quintana Roo. In *Water Resources in México: Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management and Policy*, EUA: Springer-Verlag.

Price, M. (2003). *Agua subterránea. México*: Limusa.

Ritter, W., & Chirnside, A. (1984). Impact of land use on ground–water quality. In *Southern Delaware. Ground Water*, 22, 38-48.

Sadat-Noori, S., Ebrahimi, K., & Liaghat, A. (2014). Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran, *Environ Earth Sci*, 71, 3827–3843.

Saeedi M, Abessi O, Sharifi F, Meraji H (2010) Development of groundwater quality index. *Environ Monit Assess* 163:327–335.

Sajil, P., & James, E. (2013). Development of Water Quality Index (WQI) model for the groundwater in Tirupur district, South India, *Chin.J.Geochem.*, 32, 261–268.

Scottish Development Department. (1975). Towards cleaner water. Edinburgh: HMSO, Report of a River Pollution Survey of Scotland.

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

UQROO (Universidad de Quintana Roo). (2002). Entorno Geográfico: Chetumal, México: Los Entornos.

Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Rajiv-Ganthi, R., Chidambaram, S., Anandhan, P., Manivannan R., & Vasudevan, S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment, Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India, Environ Monit Assess, 171, 595-609.

Velasco, H. (2012). Caracterización del agua subterránea por medio de índices de calidad en el departamento El Paraíso, Honduras. Tesis de Licenciatura, Departamento de Ambiente y Desarrollo, Zamorano, Honduras.

Velázquez, L., (1986). Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la Península de Yucatán, Ingeniería Hidráulica en México, 1(3), 21-29.

Ward, W., Weidie, A., Back, W. (1985). Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula, New Orleans Geological Society, 160.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN GENERAL.

Este capítulo retoma los aspectos importantes de cada artículo a manera de discusión. De igual forma, se presenta información no integrada en los artículos enviados para publicación.

Procesos geoquímicos dominantes

A partir de los resultados obtenidos a través de las técnicas hidroquímicas y estadísticas, se pueden plantear tres procesos dominantes presentes en el agua subterránea del área de estudio. El primero y de mayor importancia corresponde a la disolución de minerales de rocas carbonatadas, dolomías y evaporitas; el segundo, corresponde a los procesos de intercambio iónico y presencia de materiales arcillosos someros que pueden dar origen aguas sódicas y el tercero, corresponde a los procesos de mezcla de agua dulce y marina presentes sobre todo en las zonas externas planas y en aquellas cercanas a la costa.

Varias formaciones geológicas presentes en Quintana Roo son continuas con las del norte de la Península de Yucatán, aunque es más común el plegamiento en el sur. Las características geomórficas más importantes son el mayor relieve topográfico con presencia de algunas corrientes, terrenos húmedos y lagos, con cuencas marcadamente cerradas de diversos tamaños conocidos como poljes. La geología del sur de Quintana Roo es compleja y se ha estudiado muy poco (Schönian *et al.*, 2005 y 2008). Una unidad geológica amplia, que aparece en el mapa como una paleógena temprana (SGM, 2007) tiene una influencia importante sobre la geoquímica del agua subterránea ya que contiene depósitos de evaporitas de yeso y otros minerales relativamente solubles (Perry *et al.*, 2011).

A pesar de que los procesos hidrogeoquímicos locales del agua subterránea son similares a los que se tiene a nivel regional peninsular, el área de estudio guarda ciertas características per se que lo diferencian de esa contextualización. Por

ejemplo, para la porción norte oriental de la Península de Yucatán, Perry *et al.* (2002) y CNA (2004) reportaron que el agua contenida en el acuífero cárstico es originada principalmente por el agua de mar a partir de una fuerte intrusión salina y por la mezcla de agua dulce proveniente de la precipitación y del flujo subterráneo de la porción interna (disolución de minerales). Por esta razón, el contenido de cloruros es elevado y se encuentra cerca del límite permitido para consumo humano (250 mg/l). Además de que la presencia de magnesio y calcio puede encontrarse casi exclusivamente en la mezcla con agua de mar. En tanto los resultados de este estudio demuestran que en la zona de estudio pasa algo distinto; en las zonas internas el contenido de estos iones es debido en su gran mayoría a la disolución y precipitación de minerales principalmente carbonatos. Y únicamente en las porciones cercanas a la costa (Costa Maya), se considera que es producto de la mezcla con agua de mar.

De esta manera, mientras que en la porción norte de la Península la intrusión salina modificada por la exposición a las rocas de carbonato y evaporitas del sistema acuífero, subyace en gran parte de este territorio (Perry *et al.* 2011), en la porción sur la disolución de minerales de las rocas del acuífero es la principal fuente de iones en el agua subterránea. La mezcla con agua de mar sólo se puede constatar en zonas muy cercanas a la costa. Una posible razón es que el agua subterránea presente en el sur de Quintana Roo tiene un alto contenido de iones calcio y sulfato a partir de la disolución de yeso y cuando se mezcla con agua de mar, la mezcla no es capaz de disolver la roca caliza. Por esta razón, no es

factible el desarrollo de cavernas y otras manifestaciones cársticas que si son características de la costa noreste del Estado.

En lo que respecta a las calidades del agua regional y local, estudios geoquímicos realizados por varios autores en la zona noreste de la Península de Yucatán, han demostrado que el agua subterránea es agresiva con altas concentraciones en los iones mayoritarios y que se cuenta con una costa de tipo erosiva. Se ha reportado que tanto la calidad como el volumen y la dirección preferencial de los flujos de agua subterránea, presentan variaciones diurnas, estacionales, anuales e incluso, hipercíclicas (Villasuso-Pino, 2006; González-Hita y Gutiérrez-Ojeda, 2006). Adicionalmente, también hay evidencias reveladoras, de que en sistemas subterráneos cercanos a la costa, las aguas dulce y salina mantienen corrientes de diferente dirección e intensidad (Beddows, 2006), lo que indica que mientras que las aguas dulces someras de la parte continental fluyen hacia la costa, existe una contracorriente de agua salina hacia el interior de la Península.

Sin duda, la disolución y precipitación de minerales y la mezcla con agua salada son los procesos dominantes que caracterizan la calidad del agua subterránea de la zona de estudio y se manifiestan en la aportación notable de sales disueltas, determinando así los diferentes grados de salinidad. Dadas estas condiciones que imperan en esta región y tomando en cuenta que el acuífero es la fuente principal de agua dulce para la población es importante poner establecer estrategias de monitoreo que permitan vigilar la evolución sobre todo para entender como los cambios en el nivel del mar impactarán sobre la calidad del agua subterránea.

Aunque como ya se mencionó anteriormente que a diferencia de la zona norte del Estado sólo las porciones cercanas a la costa el agua contenida en el acuífero puede ser producto de la mezcla con agua de mar (intrusión salina) si es importante poner atención en sus efectos. La intrusión marina del agua subterránea constituye uno de los problemas más serios derivados del impacto del cambio climático, debido a que la mayoría de los acuíferos en esta región son abiertos. Este impacto tiene un alto nivel de certidumbre, toda vez que al ascenso progresivo del nivel del mar es una de las consecuencias del cambio climático que se da como confirmada (Barros-Mouriño & Llanusa-Ruiz 2001). Es de mencionar que un aumento de la cuña de intrusión salina podría implicar una reducción significativa de la entrega de agua subterránea, las reservas de agua subterráneas estarían seriamente afectada por su deterioro químico y la disminución del potencial hídrico por el déficit de lluvia.

La composición química de las muestras de agua reportadas en este estudio pueden agruparse en cuatro familias de aguas; la Cálcica-Bicarbonatada (Ca-HCO₃⁻) en mayor proporción en zonas donde prevalecen las calizas y que es indicativa de aguas de reciente infiltración correspondientes a zonas de recarga. Éstas se ubican en las porciones altas internas y a lo largo de las regiones aledañas a los cauces del río Hondo, así como en la zona plana de poljes en Morocoy, Álvaro Obregón y Francisco Villa. En segundo orden se encuentra la Mixta Cálcica Magnésica Clorurada (Mixta Ca-Mg-Cl) ubicada en áreas distantes, una hacia la parte alta central y otra hacia el noroccidente en los límites con el

municipio de Felipe Carrillo Puerto. En tercer orden la Cálcica Sulfatada (Ca-SO_4) asociada principalmente a materiales evaporíticos (yesos y anhidritas). Éstas se encuentran hacia la zona de la Unión, Ucúm y en las cercanías del municipio de Felipe Carrillo Puerto. Finalmente, la Sódica Clorurada (NaCl) se encuentra hacia las zonas externas costeras indicativo de mezcla con aguas marinas y en donde se piensa que pueda darse el proceso de intercambio iónico.

La relación que guardan entre sí las especies disueltas puede revelar el origen de los solutos, así como los procesos que generan la composición del agua. Entre los principales procesos que se presentan en la mayoría de los acuíferos se encuentran la disolución mineral a lo largo del flujo, el intercambio iónico, la precipitación y dilución química (Índices de Saturación), entre otros.

Para analizar los procesos de precipitación y dilución de los carbonatos presentes en el acuífero, se determinó el estado de saturación de las aguas con respecto a la Calcita, Dolomita y Aragonita; minerales que habitualmente están presentes en el subsuelo del sistema en estudio. Los Índices de Saturación determinan la distribución de las especies presentes en la solución, actividad termodinámica, así como el estado de saturación de la solución con respecto a las distintas fases minerales (Morán-Ramírez *et al.*, 2013). El IS está dado por la siguiente ecuación

$$SI = \log_{10} (IAP/Ksp)$$

Donde IAP es el producto de actividad iónica, Ksp es el producto de solubilidad a una temperatura dada (constante de equilibrio termodinámico ajustado a la temperatura de la muestra). Los IS se calcularon utilizando la interfaz PHREEQC

v.2.12.15 del programa AQUACHEM v. 2014.2 y se consideró una zona de equilibrio de 0 ± 0.5 (Log K_{mineral}) debido a la incertidumbre en la precisión de los datos (análisis químico, constantes de equilibrio del mineral y el cálculo de las actividades iónicas) (Deutsch, 1997). En este sentido, cuando existe sobresaturación ($IS > 0.5$) indica que el proceso es por precipitación de carbonatos. Por otro lado, cuando el IS está por debajo de -0.5 existe subsaturación se indica que el proceso es por disolución de carbonatos. Los resultados de los IS son los expuestos en la Tabla 4.1 (Anexo) y las gráficas correspondientes se muestran en la Figuras 4.1, 4.2 y 4.3.

La mayoría de las muestras presentaron equilibrio con respecto a la Calcita a excepción de los sitios Allende, Altos de Sevilla, David Gustavo Gutiérrez y Esteban Baca Calderón (claves O20, B04, B27 y 022) los cuales estuvieron sobresaturados respecto a este mineral indicando precipitación (Figura 4.1). El primer sitio se ubica en la parte central oriente del área de estudio y corresponde al Grupo 6 de los grupos identificados en el Análisis por Componentes (Figura 4.4). Los otros dos sitios se ubican al occidente y ambos pertenecen al Grupo 1 del AC. En este sentido, el Grupo 6 se distingue por presentar aguas de tipo mixta Ca-Mg-Cl y de tipo Ca-SO₄. El Grupo 1 tiene características con las mayores elevaciones topográficas, con aguas del tipo Ca-HCO₃ en su mayoría y en menor proporción tipo mixta Ca-Mg-Cl (Figura 4.5).

La Dolomita presentó equilibrio en un 75.5% de las muestras, el otro 24.5% de las muestras presentaron valores de sobresaturación y subsaturación (Figura 4.2).

Los sitios con sobresaturación fueron Allende, Altos de Sevilla, David Gustavo Gutierrez, Esteban Baca Calderón, Pedro Antonio Santos, San Pedro Peralta y Sergio Butrón Casas (claves O20, B04, B27, O22, B18, O33 Y O06) ubicados en su mayoría en la parte central oriente y occidente del área de estudio. Los sitios con subsaturación fueron Andrés Quintana Roo, Arroyo Negro, Chankah Veracruz, Dos Aguadas, Uh May y X Zazil Sur (claves F04, O31, F01, O02 F02 y F03) ubicados en su mayorías hacia la parte noroccidente y el sitio O31 presente en el extremo sur del área de estudio. Los sitios sobresaturados forman parte de los Grupos 1, 2, 5, 6 y 7 del AC (Figura 4.4). Dichos sitios se identificaron particularmente en el Grupo 4 y sólo el sitio con clave O31 se posicionó en el Grupo 3. Los Grupos 1, 2 y 3 contienen aguas de tipo Ca-HCO₃. Los Grupos 4 y 6 contienen aguas de tipo Ca-Mg-Cl y Ca-SO₄. El Grupo 5 aguas de tipo Ca-Mg-Cl y la Na-Cl y el Grupo 7 de tipo Na-Cl y la Ca-SO₄ (Figura 4.5). Las muestras que se sobresaturan de estos minerales puede ser debido a la infiltración del agua de lluvia, la cual se enriquece de estos minerales por la disolución de la caliza.

Por último, los resultados respecto a la Aragonita mostraron equilibrio en el 96.2% de los sitios, a diferencia de los sitios David Gustavo Gutierrez y Chankah Veracruz (claves B27 y F01) que presentaron valores de sobresaturación e subsaturación respectivamente. El sitio B27 forma parte del Grupo 1 mientras que el sitio F01 pertenece al Grupo 4 (Figura 4.4).

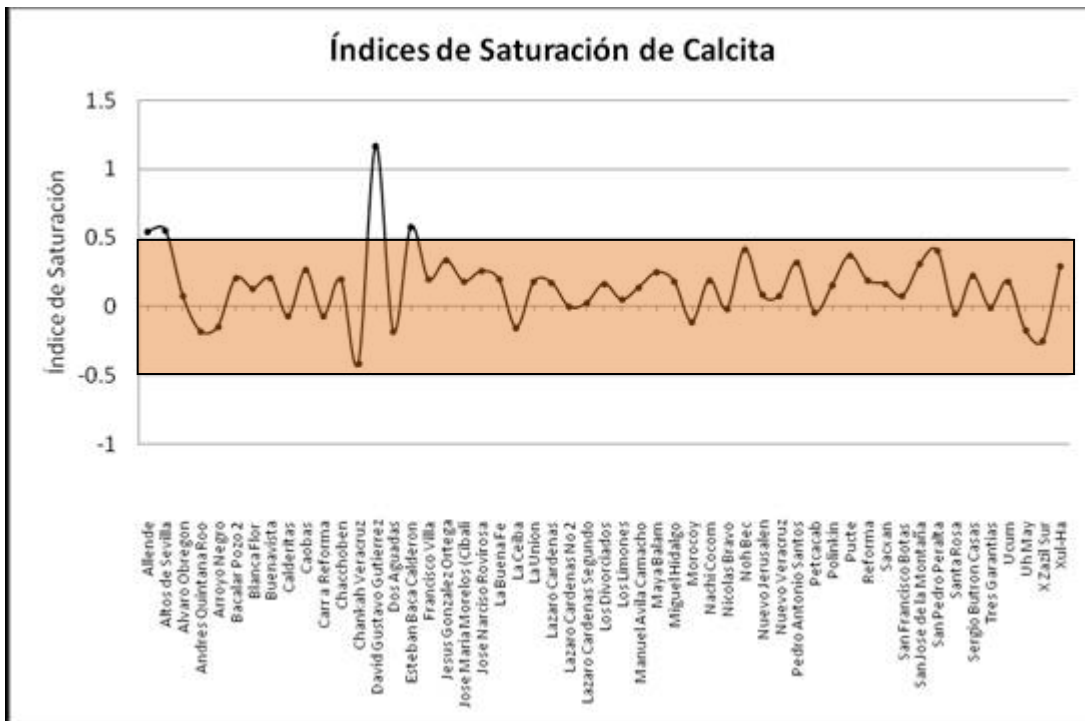


Figura 4.1. Índices de Saturación de la Calcita.

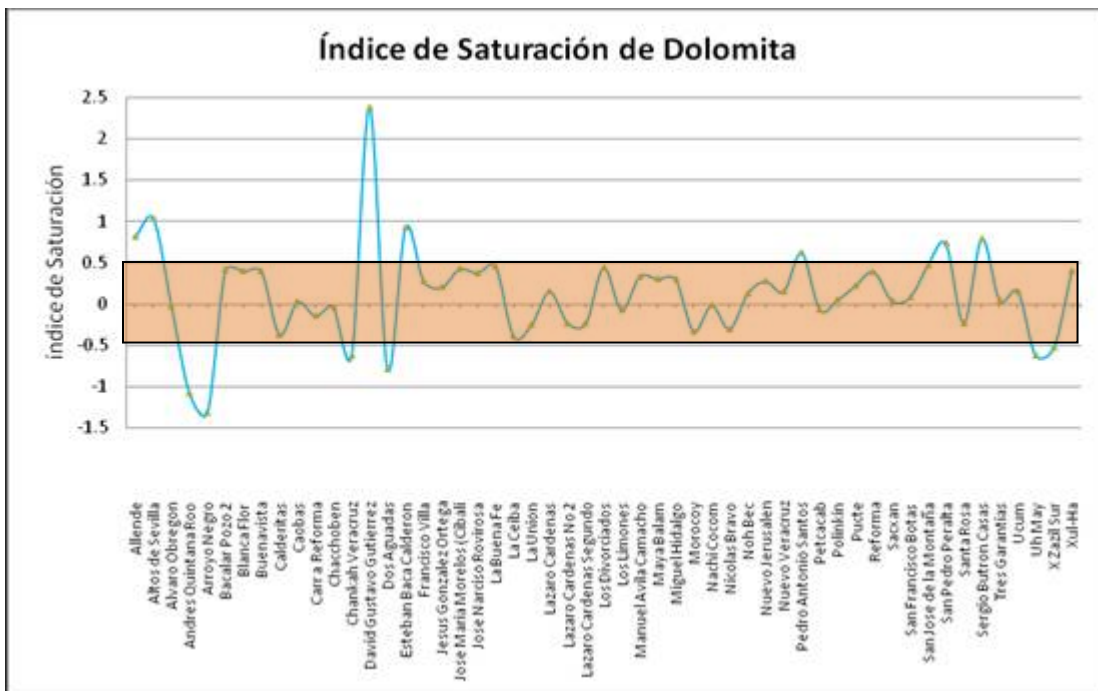


Figura 4.2. Índices de Saturación de la Dolomita.

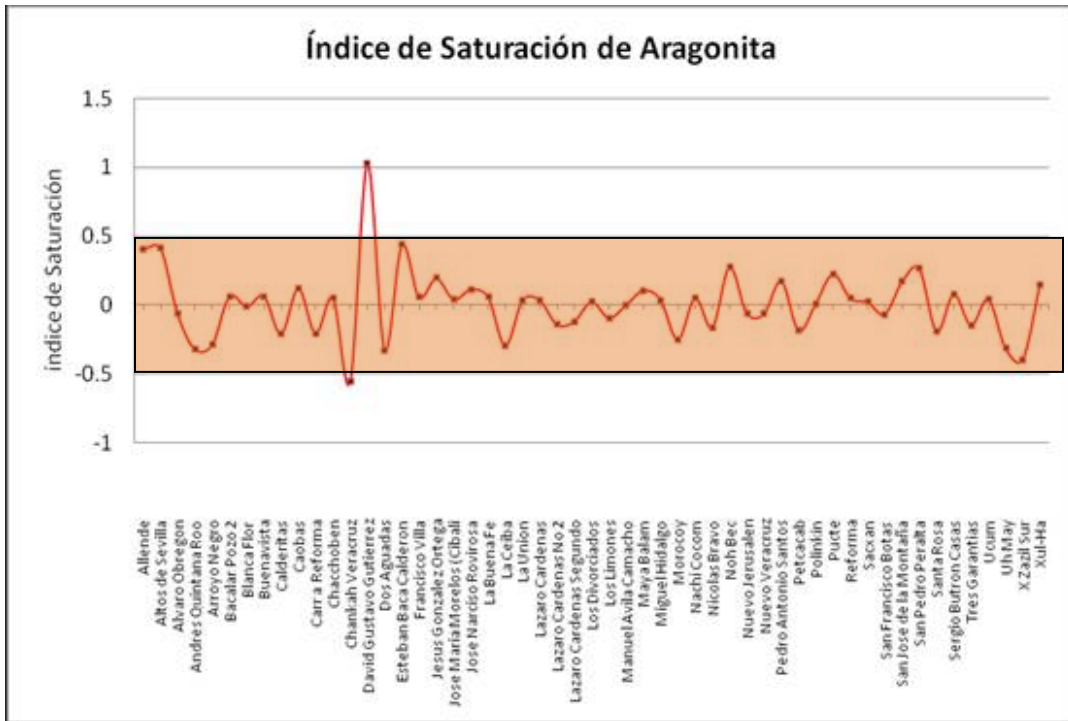


Figura 4.3. Índices de Saturación de la Aragonita.

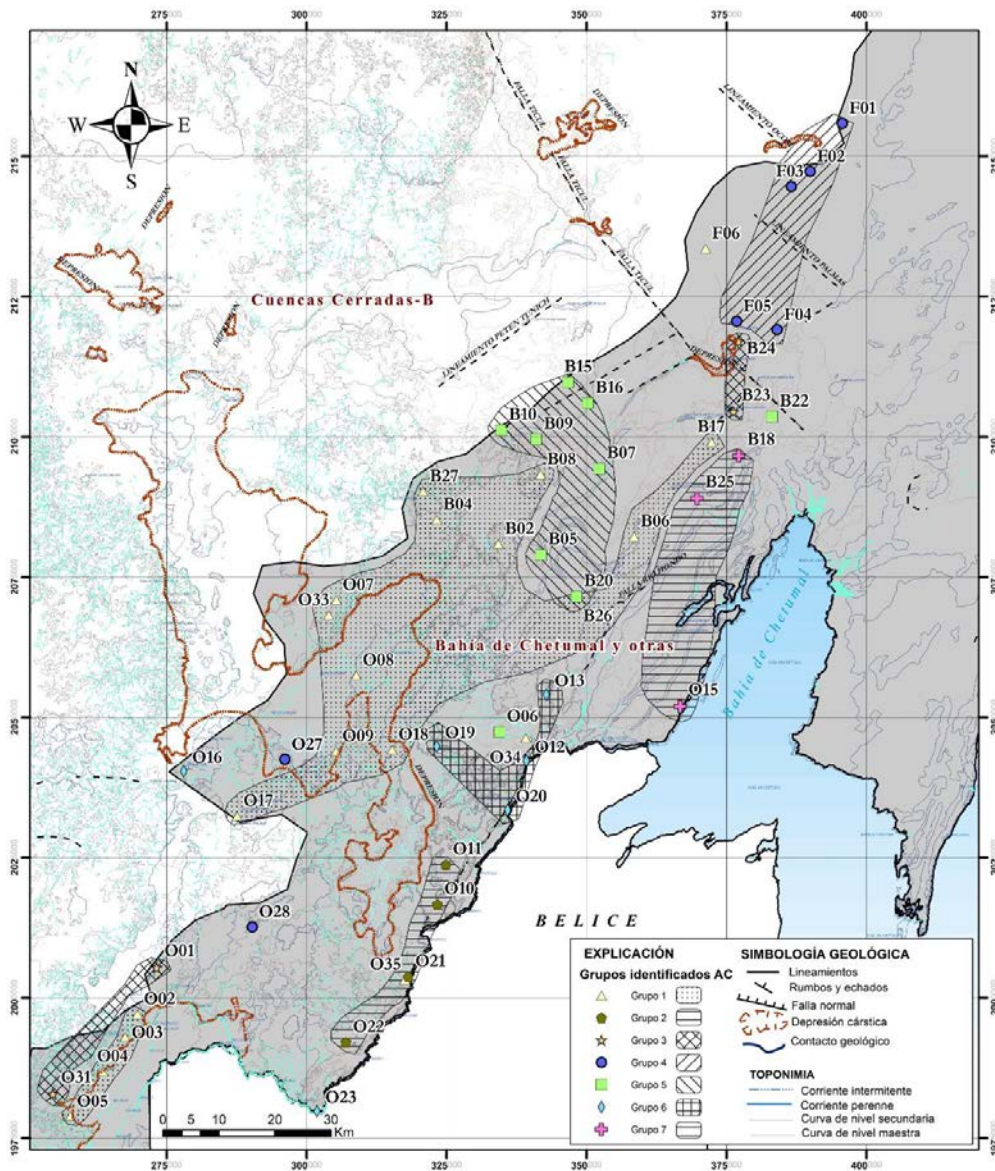


Figura 4.4. Mapa vista de los grupos identificados a partir del Análisis de Conglomerados. Modificado de SGM (2007). Los achurados representan los grupos reconocidos a través del área de estudio. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversa de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

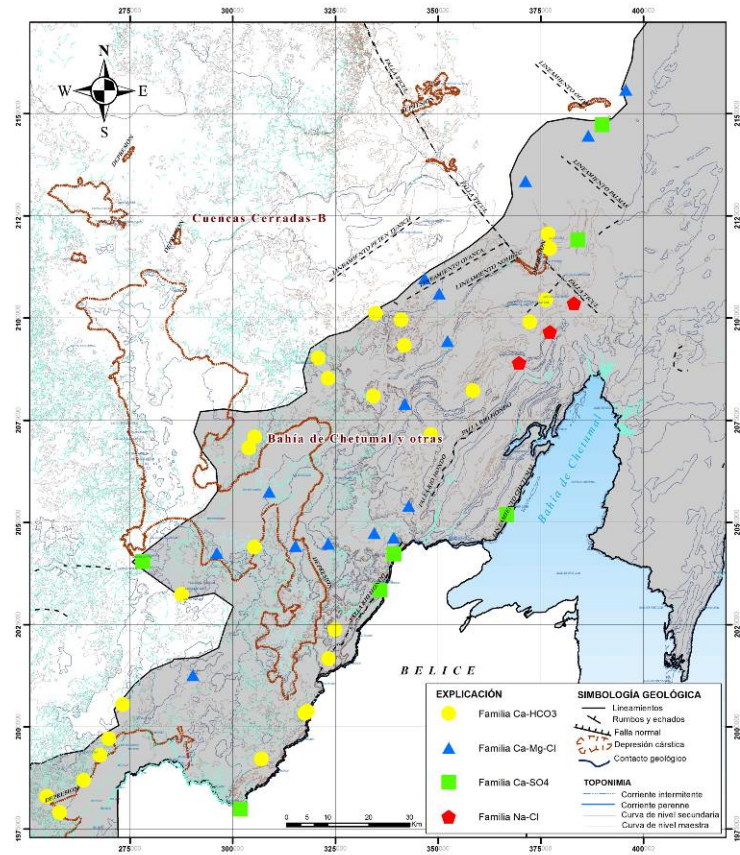
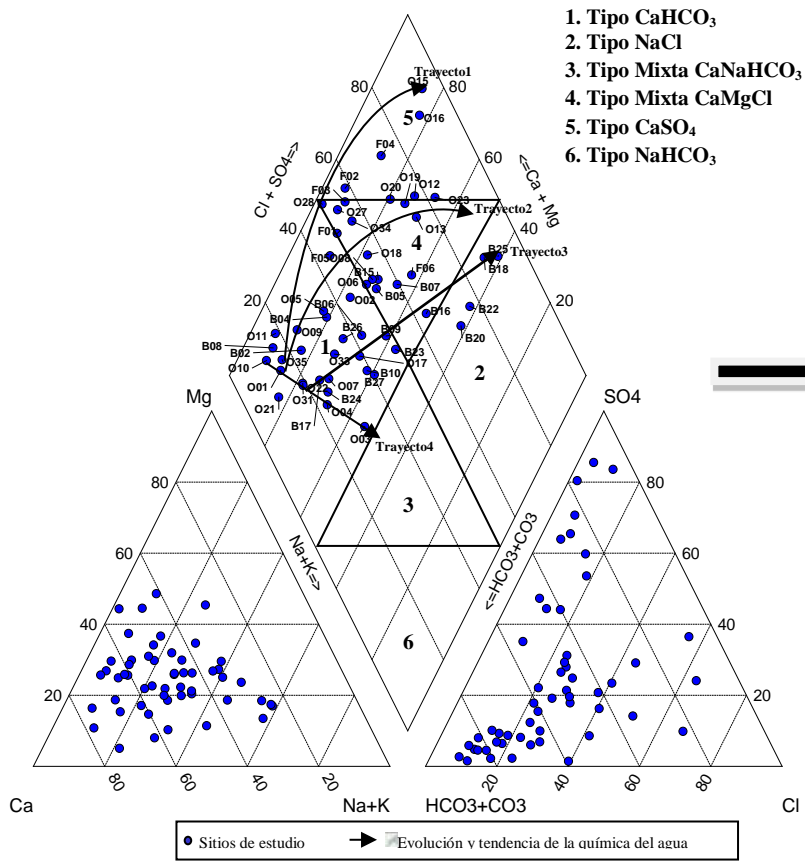


Figura 4.5. Ubicación geográfica de las familias de agua.

CONCLUSIONES

Este estudio ha determinado las principales fuentes de iones en una región geográfica amplia y con un proceso rápido de desarrollo. Los procesos geoquímicos más importantes en el acuífero de la zona sur del Estado de Quintana Roo están regidos por la disolución de minerales de rocas carbonatadas, dolomías y evaporitas y los procesos de mezcla de agua dulce y marina.

En el presente trabajo se han discutido en detalle las fuentes de iones en un número representativo de muestras analizadas llegando a la conclusión que la región de estudio se caracteriza por presentar una heterogeneidad en cuanto sus características hidroquímicas lo que da lugar a zonas contrastantes con aguas de mala calidad y pequeñas zonas de aguas dulces.

El Índice de Calidad del Agua, demuestra que en muchas poblaciones se está suministrando aguas que sobrepasan los límites permisibles en Sólidos Totales Disueltos, Dureza y Sulfatos. Sobre todo hacia la porción norte del área de estudio en el municipio de Felipe Carrillo Puerto a lo que han contribuido depósitos extensos de evaporitas Esta disolución de evaporitas también domina la geoquímica del agua subterránea a lo largo del río Hondo al sur de Quintana Roo.

La heterogeneidad típica de los sistemas cársticos se refleja en las variaciones del nivel estático. El patrón de flujo muestra una orientación de suroccidente a noreste y en la parte costera, una orientación de oeste a este lo cual define el patrón de descarga del acuífero de la región.

RECOMENDACIONES

Para tener un entendimiento del comportamiento hidrogeoquímico a una escala temporal, es recomendable mantener una continuidad en las mediciones para contrastar los resultados y conocer la variación interanual del sistema.

Asimismo, se recomienda establecer una red monitoreo piezométrico y de calidad del agua siguiendo las directrices de la Comisión Nacional del Agua. Para este caso se debería partir de un censo de aprovechamientos existentes en donde con base en datos básicos: características del pozo, profundidad del agua, conductividad eléctrica y temperatura, entre otros, se debe hacer una selección de los sitios que puedan representar las condiciones regionales o particulares de cada región.

Por último, dado que se observa que existen muchas zonas donde no se tiene dato del nivel estático, es conveniente incrementar el número de aprovechamientos a visitar para contar con una red de adecuada cobertura.

REFERENCIAS

Alcocer, J., Lugo A., Marín L., Escobar E. (1998) "Hydrochemistry of waters from five cenotes and evaluation of their suitability for drinking-water supplies, northeastern Yucatan, Mexico" en *Hydrogeology Journal*, v.6, pp. 293–301.

Alcocer, J. & E. Escobar (1996). "Limnological regionalization of Mexico". *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2, 55-69.

ASK (Amigos de Sian Ka'an) (2003). "Tratamiento de Aguas Residuales". Reporte preparado por Amigos de Sian Ka'an A. C. Construyendo las bases para la conservación del agua y su biodiversidad asociada en la Península de Yucatán". Informe Final.

Ávila, X. (2006). "Modelo hidrogeoquímico del agua subterránea en el Estado de Yucatán, México". Tesis de Maestría. Yucatán, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

Back, W., Hanshaw, B. (1970). "Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan". *Journal of Hydrology*, v.10, 330-368.

Batllore E., *et al.* (2006). "Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del Estado de Yucatán, México" en *Investigaciones Geográficas*, No. 59. , UNAM, D.F. México, pp. 74-92.

Barros-Mouriño O. & Llanusa-Ruiz H. (2001). "Impacto del cambio global en la dinámica de la intrusión marina". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, v. 12, N° 4, PP. 21-28.

Bauer-Gottwein P., Gondwe B., Charvet G., Marín L. (2011). "Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico". *Hydrogeology Journal*.

Beddows, P.A. (2002). "Where does the sewage go? The karst groundwater system of Municipalidad Solidaridad, Quintana Roo". *Assoc. for Mex. Cave Stud. Activities Newsl.* v.25, 47–52.

Beddows (2004). "Groundwater Hydrology of a Coastal Conduit Carbonate Aquifer: Caribbean Coast of the Yucatán Peninsula, México". PhD Thesis, University of Bristol, School of Geographical Sciences.

Beddows, P. (2006). "Hidrogeología e hidrodinámica de los sistemas de cuevas sumergidas en Quintana Roo". *Memorias del Foro Estatal de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico "El Sistema hidrológico de Quintana Roo"*. Comisión Nacional del agua, Gerencia Estatal de Quintana Roo, subgerencia de programas rurales y participación social. Chetumal, México, 48 p.

Beddows, P.A., Smart, P.L., Whitaker, F.F., 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*, v.346, 18–32.

Butterlin J., Bonet F. (1960). "Información básica para la interpretación geohidrológica de la Península de Yucatán". Secretaría de Recursos Hidráulicos, Mexico, D.F.

CCPY (Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán) (2012). “Evaluación de la calidad del agua subterránea en varias localidades de los Municipios de Othón P. Blanco, Bacalar y José María Morelos del Estado de Quintana Roo”. Informe Final.

CNA (Comisión Nacional del Agua) (2001). “Actualización geohidrológica del acuífero de la zona norte del Estado de Quintana Roo, (poligonal comprendida entre Cancún, Nuevo Xcan, Coba y Tulum)”. Subgerencia técnica.

CNA (Comisión Nacional del Agua) (2006). “Ampliación de la red piezométrica en la región costera norte del Estado de Quintana Roo, segunda parte”. Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia técnica, Informe Final, 256 pp.

CNA (Comisión Nacional del Agua) (2007). “Reactivación de la red piezométrica de la zona Costa Maya, Quintana Roo”. Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia técnica, Informe final, 142 pp.

CNA (Comisión Nacional del Agua) (2009). “Establecimiento de una red piezométrica de la zona cañera de Álvaro Obregón, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo”. Subgerencia técnica regional.

Cuevas, E., Pacheco J., Cabrera A., Coronado V., Vázquez J., Comas M. (2001). “Calidad química y bacteriológica del agua subterránea en el principal campo de pozos para el abastecimiento de Mérida, Yucatán, México”. Revista Ingeniería, v. 5 No. 3, México.

Custodio, E. & Llamas M. (1983). "Hidrología Subterránea". Índices hidrogeoquímicos. Segunda edición, Tomo 1, Barcelona, España, Grupo editorial Omega S.A., pp. 1024-1026.

Deutsch, W. (1997). "Groundwater geochemistry". Fundamentals and applications to contamination, Lewis publishers, United States.

FONATUR (Fondo Nacional de Fomento al Turismo (2004). "Estudio geohidrológico para conocer la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas, para el suministro de agua potable al proyecto turístico integral Costa Maya, ubicado en el Mpo. Othón P. Blanco, Estado de Quintana Roo". Informe Final.

Gondwe, B.R.N., Hong, S.-H., Wdowinski, S., Bauer-Gottwein, P., (2010). Hydrologic dynamics of the ground-water-dependent Sian Ka'an wetlands, Mexico, derived from InSAR and SAR data. *Wetlands* 30 (1), 1–13.

González-Hita, L. y C. Gutiérrez-Ojeda (2006). "Definición de las reglas de operación del acuífero costero de la Península de Yucatán". Memorias del Foro Estatal de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico "El Sistema hidrológico de Quintana Roo". Comisión Nacional del agua, Gerencia Estatal de Quintana Roo, subgerencia de programas rurales y participación social. Chetumal, México, 48 p.

Gutiérrez M., Cervantes A. (2008). "Analysis and evaluation of ground and surface water quality and groundwater flow in the northern aquifer of Quintana Roo, Mexico" en:

Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo: Editorial Diseño Gráfico S. A. de C. V., México.

Hem J. (1970). "Significance of properties and constituents reported in water analyses". En: Study and interpretation for the chemical characteristics of natural water, 2a Edición, Geological survey water-supply, United States.

Hounslow A. (1995). "Source of major ions in waters". En: Water quality data, analyses and interpretation, Lewis publishers, United States.

JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón), (2004). "Estudio de manejo de saneamiento ambiental en la costa del Estado de Quintana Roo en los Estados Unidos Mexicanos". Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Informe final, 370 pp.

Manahan S. (1991). "Metal ions and calcium in water". En: Environmental chemistry, Lewis publishers, 5ª Edición, United States.

Marín, L.E., (1990). "Field investigations and numerical simulation of ground-water flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico". PhD thesis, Dept. of Geol., North. Ill. Univ., USA.

Marín, L, Pacheco J. y R. Méndez (2004). "La Hidrogeología de la Península de Yucatán" en: El Futuro del Agua en México, pp.159-176.

Mazzotti, F.J., Fling, H.E., Merediz, G., Lazcano, M., Lasch, C., Barnes, T. (2005). "Conceptual ecological model of the Sian Ka'an Biosphere Reserve, Quintana Roo, Mexico". *Wetl.* 25 (4), 980–997.

Moore, Y.H., Stoessell, R.K., Easley, D.H., (1992). "Fresh-water/sea-water relationship within a ground-water flow system, northeastern coast of the Yucatan Peninsula". *Ground Water* 30 (3), 343–350.

Morán-Ramírez J., Ramos-Leal J. A., López-Álvarez B., Carranco-Lozada S., Santacruz-De León G. (2013). "Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, aplicando modelación inversa: Caso Huasteca Potosina". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. V. 65, (1), p. 71-82.

Lillo J. (2005). "Técnicas hidrogeoquímicas". Máster oficial en hidrología y gestión de recursos hídricos, Universidad Rey Juan Carlos, España.

López-Ramos E. (1972). "Estudio Geológico de la Península de Yucatán". Gerencia de Exploración Pemex.

Lugo-Hubp J., Aceves J., Espinasa R. (1992). "Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán". *Revista de Geología*, v. 10 (2), p. 143-150.

Peña-Hernández Y., Santacruz G., Charcas-Salazar H. (2012). "Calidad del agua en pozos de la red de monitoreo del acuífero del Valle de San Luis Potosí, México". *Aqua-LAC* 4, 1, 49 - 59.

Perry, E.C., Velazquez-Oliman, G., Marin, L., (2002). "The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico". *Int. Geol. Rev.* 44, 191–221.

Schönian, F., R. Tagle, D. Stöffler y T. Kenkmann (2005) "Geology of Southern Quintana Roo (Mexico) and the Chicxulub Ejecta Blanket", *Lunar and Planetary Science*, vol. xxxvi, p. 2389.

Schönian, F., R. Tagle, D. Stöffler y T. Kenkmann (2008). "On the Distribution of Impact Melt and Basement Clasts in the Chicxulub Ejecta Blanket, Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution iv", .Houston, Lunar and Planetary Institute.

Sánchez J. (2009). "Hidrogeoquímica del agua subterránea en el Anillo de Cenotes del Estado de Yucatán". Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán.

Sawyer C., McCarty P., Parkin G. (2001). "Análisis del agua y del agua residual". En: *Química para ingeniería ambiental*, McGrawHill, 4ª Edición United States.

Schmitter-Soto, J.J., Comín, F.A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L.E., Steinich, B. (2002). "Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico)". *Hydrobiologia*, 467, 215-228.

SGM (Servicio Geológico Mexicano) (2007). "Carta geológica de México, Escala 1:2,000,000". 6th edn., Pachuca, Mexico.

Suárez-Morales E. & E. Rivera-Arriaga (2000). "The aquatic fauna of karstic environments in the Yucatan Peninsula, Mexico: an updated overview", en Munawar M., S. G. Lawrence, I. F. Munawar & D. F. Malley (eds.). Aquatic ecosystems of Mexico. Status & Scope. The Netherlands: Backhuys Publishers, 151-164.

UQROO (Universidad de Quintana Roo) (2002). "Entorno Geográfico: Los Entornos". Chetumal, Q. Roo.

Perry, E. Velazquez-Olintan G., Wagner N. (2011). "Preliminary Investigation of Groundwater and Surface Water Geochemistry in Campeche and Southern Quintana Roo". Water Resources in Mexico, v.7 pp 87-97.

Velázquez, L. (1986). "Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la Península de Yucatán". Ingeniería Hidráulica en México, v.1(3): 21-29.

Villasuso-Pino, M. J. (2006). "Estudios geohidrológicos en los acuíferos cársticos costeros del norte de Quintana Roo". Memorias del Foro Estatal de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico "El Sistema hidrológico de Quintana Roo". Comisión Nacional del agua, Gerencia Estatal de Quintana Roo, subgerencia de programas rurales y participación social. Chetumal, México, 48 p.

Weidie, A.E. (1974). "Note on the regional geology of Yucatán peninsula" En: Villasuso J. y Méndez- Ramos (2000). A Conceptual Model of the Aquifer of the Yucatan peninsula. En "Population, Development, and Environment on the Yucatán península" Lutz W. and Prieto L. Editors.

ANEXOS

Tabla 4.1. Relación de índices de Saturación por sitio de estudio.

Nº Muestra	Sitio	TDS mg/l	CE uS/cm	IS (Aragonita)	IS (Calcita)	IS (Dolomita)
O20	Allende	1510	1520	0.40	0.55	0.82
B04	Altos de Sevilla	716	1127	0.41	0.56	1.04
O11	Alvaro Obregon	662	849	-0.06	0.08	-0.02
F04	Andrés Quintana Roo	2520	2530	-0.32	-0.18	-1.08
O31	Arroyo Negro	400	528	-0.29	-0.15	-1.31
B26	Bacalar Pozo 2	791	1217	0.06	0.20	0.41
B08	Blanca Flor	632	877	-0.01	0.13	0.40
B25	Buenavista	5030	6540	0.06	0.21	0.40
O15	Calderitas	3200	4290	-0.21	-0.07	-0.37
O16	Caobas	2810	2630	0.12	0.26	0.03
B20	Carretera a Reforma	1704	1780	-0.21	-0.07	-0.14
B23	Chacchoben	490	690	0.05	0.20	-0.04
F01	Chankah Veracruz	1685	1790	-0.56	-0.41	-0.62
B27	David Gustavo Gutiérrez	859	1321	1.03	1.17	2.39
O01	Dos Aguadas	331	439	-0.33	-0.18	-0.78
O22	Esteban Baca Calderón	745	910	0.44	0.58	0.93
O09	Francisco Villa	660	929	0.06	0.20	0.28
O19	Jesús González Ortega	1562	1590	0.20	0.34	0.20
O05	José María Morelos (Cibali	724	1173	0.04	0.18	0.43

N° Muestra	Sitio	TDS mg/l	CE uS/cm	IS (Aragonita)	IS (Calcita)	IS (Dolomita)
O35	José Narciso Rovirosa	756	970	0.11	0.26	0.38
B09	La Buena Fe	1168	1760	0.06	0.20	0.46
B05	La Ceiba	1012	1415	-0.30	-0.15	-0.39
O23	La Unión	2268	1890	0.04	0.18	-0.25
B17	Lázaro Cárdenas	648	886	0.03	0.18	0.15
O04	Lázaro Cárdenas No 2	756	980	-0.14	0.00	-0.23
O07	Lázaro Cárdenas Segundo	570	798	-0.12	0.02	-0.24
B15	Los Divorciados	1040	1530	0.02	0.17	0.44
B22	Los Limones	1620	2600	-0.09	0.05	-0.07
B16	Manuel Ávila Camacho	1576	2340	0.00	0.14	0.34
B07	Maya Balam	1198	1590	0.11	0.25	0.31
B06	Miguel Hidalgo	684	967	0.04	0.18	0.30
O08	Morocoy	668	952	-0.25	-0.11	-0.33
O18	Nachi Cocom	816	850	0.05	0.19	-0.01
O27	Nicolás Bravo	780	1050	-0.16	-0.02	-0.30
B24	Noh Bec	317	370	0.28	0.42	0.13
B10	Nuevo Jerusalén	956	1600	-0.06	0.08	0.28
O02	Nuevo Veracruz	815	1097	-0.07	0.08	0.15
B18	Pedro Antonio Santos	3180	5120	0.18	0.32	0.63
F06	Petcacab	1278	1290	-0.19	-0.04	-0.07
F05	Polinkin	1296	1370	0.01	0.15	0.05

N° Muestra	Sitio	TDS mg/l	CE uS/cm	IS (Aragonita)	IS (Calcita)	IS (Dolomita)
O10	Pucté	729	891	0.23	0.37	0.23
B02	Reforma	785	980	0.05	0.19	0.39
O12	Sacxan	1841	1980	0.02	0.16	0.05
O21	San Francisco Botas	726	870	-0.07	0.08	0.08
O17	San José de la Montaña	657	840	0.17	0.31	0.47
O33	San Pedro Peralta	635	819	0.26	0.40	0.74
O03	Santa Rosa	784	1118	-0.19	-0.05	-0.23
O06	Sergio Butrón Casas	1136	1680	0.08	0.22	0.79
O28	Tres Garantías	603	670	-0.15	-0.01	0.04
O34	Ucum	1178	1498	0.04	0.18	0.16
F02	Uh May	1029	1180	-0.31	-0.17	-0.63
F03	X Zazil Sur	1267	1340	-0.39	-0.25	-0.53
O13	Xul-Ha	1707	1870	0.15	0.29	0.40