



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA ZONA
METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉRIDA DURANTE EL
PERÍODO 2003-2013”**

TESIS

**PRESENTADA POR:
I.C. LUIS NOH MIRANDA**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
OPCIÓN AMBIENTAL**

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2019

Aunque este trabajo hubiere servido para el
EXAMEN DE GRADO y hubiere sido
aprobado por el H. SÍNODO, sólo el
AUTOR es responsable de las doctrinas
emitidas en él.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

RESUMEN

En la Península de Yucatán la disponibilidad del agua nunca ha estado bajo estrés, así lo han expuesto investigaciones académicas y gubernamentales que muestran que la cantidad de agua que precipita es mucho mayor que la que se demanda para sus usos domésticos, la agricultura y la industria. Es sabido que por las características cársticas de la península no solo el agua que precipita se infiltra con facilidad, sino que también todo lo que pueda ser transportado por el agua terminará en el acuífero; es por ello que una creciente preocupación, a la par de la satisfacción de las crecientes demandas, es la verificación de la calidad del agua subterránea.

En los últimos años el acuífero de Yucatán ha sido estudiado en varias ocasiones, algunas abarcando la totalidad de los municipios del estado; lo anterior con el objeto de determinar el estatus de la calidad, la identificación de posibles contaminantes, sus características para el arrastre de contaminantes y la identificación de posibles zonas de extracción entre otras razones.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la variación hidrogeoquímica y la calidad química del agua subterránea para consumo humano en la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM) para el período 2003-2013. Se determinó limitarla a la ZMM dada su importancia económica, su concentración de población y por la disposición de datos.

Para lograr el objetivo se utilizaron bases de datos disponibles en investigaciones realizadas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán dada su disponibilidad para acceder a estos, es por esta razón que se determinó limitar el período de estudio comprendido entre los años 2003 y 2013. Los parámetros elegidos fueron calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), sodio (Na^+), potasio (K^+), bicarbonatos (HCO_3^-), sulfatos (SO_4^{--}), cloruros (Cl^-) y nitratos (NO_3^-). Los datos fueron organizados en Excel para poder ser usados en otros *softwares* y para la presentación de las gráficas de los muestreos. Con el uso de ArcGis se procesó un mapa de la ZMM para ser usado en el programa Surfer, con Statgraphics se realizó el análisis estadístico y la obtención de tendencias por mínimos cuadrados; Surfer sirvió para poder procesar en mapas las concentraciones de los parámetros

elegidos en la ZMM mientras que en Aquachem se realizaron diagramas de Piper para poder identificar a las familias de aguas y así identificar los procesos hidrogeoquímicos imperantes y posibles cambios en este.

Los resultados sugieren que en el período sujeto al estudio los parámetros normados se mantienen en general dentro de los límites permisibles; sin embargo, se observaron valores superiores al límite permisible principalmente en los municipios de Progreso y Ucú; en los parámetros no normados, las concentraciones más altas también se encontraron en Progreso y Ucú; en los otros municipios de la ZMM se encontraron algunos valores arriba del límite permisible de manera aislada. Los gráficos obtenidos por Surfer muestran que la zona norte de la ZMM es la que reportó valores más altos en todos los parámetros estudiados. Los diagramas de Piper mostraron pocos cambios en las familias de aguas y las tendencias de los parámetros estudiados son positivas en varios de los municipios. Los parámetros asociados con la contaminación antropogénica mostraron tendencias positivas, aunque en términos generales se mantienen aún por debajo de los límites permisibles.

Palabras clave: agua subterránea, hidrogeoquímica, calidad del agua.

ABSTRACT

In the Yucatan Peninsula, water availability has never been under stress, as academic and governmental research has shown; the amount of water that precipitates is much greater than that demanded for domestic, agriculture and industrial uses. It is known that due to the karst characteristics of the peninsula, not only does the water that precipitates easily infiltrate, but also everything that can be transported by the water will end up in the aquifer; that is why a growing concern, along with the satisfaction of growing demands, is the verification of the quality of groundwater.

In recent years, the Yucatan aquifer has been studied several times, some covering all the municipalities of the state; the foregoing in order to determine the status of quality, the identification of possible contaminants, their characteristics for the migration of contaminants and the identification of possible extraction areas among other reasons.

The objective of this work was to evaluate the hydrogeochemical variation and the chemical quality of the groundwater for human consumption in the Metropolitan Area of Mérida (MAM) for the period 2003-2013. It was determined to limit it to the MAM given its economic importance, its population concentration and the availability of data.

To achieve the objective, databases from investigations conducted at the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Yucatan were used, given their availability to access them, it is for this reason that it was determined to limit the study period between 2003 and 2013. The parameters chosen were calcium (Ca^{++}), magnesium (Mg^{++}), sodium (Na^+), potassium (K^+), bicarbonates (HCO_3^-), sulfates (SO_4^{--}), chlorides (Cl^-) and nitrates (NO_3^-). The data were organized in Excel files to be used in other softwares and to present the plots of the sampling campaigns. With the use of ArcGis, a map of the MAM was processed to be used in the Surfer program, with Statgraphics the statistical analysis was carried out and trends obtained by least squares; Surfer served to process the concentrations of the

parameters chosen in the MAM on maps, while in Aquachem Piper diagrams were made to identify the water families and thus identify the prevailing hydrogeochemical processes and possible changes in this.

The results suggest that in the period studied the regulated parameters are generally maintained within the permissible limits; however, values above the permissible limit were observed mainly in the municipalities of Progreso and Ucú; in the non-regulated parameters, the highest concentrations were also found in Progreso and Ucú; in the other municipalities of the MAM some isolated values were found above the permissible limit. The graphs obtained by Surfer show that the northern zone of the MAM is the one that reported higher values in all the parameters studied. Piper diagrams showed few changes in water families and the trends of the parameters studied are positive in several of the municipalities. The parameters associated with anthropogenic contamination showed positive trends, although in general terms they are still below the permissible limits.

Keywords: groundwater, hydrogeochemistry, water quality.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	OBJETIVOS.....	3
	Objetivo general.....	3
	Objetivos específicos.....	3
III.	MARCO TEÓRICO.....	4
	3.1 El agua en el mundo	4
	3.2 El agua en México	6
	3.3 El agua en la Península de Yucatán.....	7
	3.4 El agua en el estado de Yucatán	9
	3.5 La vulnerabilidad de las aguas subterráneas	10
	3.6 La calidad del agua subterránea	11
	3.7 La evaluación de la calidad del agua subterránea.....	12
	3.8 Índices hidrogeoquímicos.....	14
	3.9 Parámetros regulados para el consumo de agua	15
	3.10 La zona metropolitana de Mérida	15
	3.11 El crecimiento de la urbanización en la ZMM	16
	3.12 Crecimiento demográfico en la ZMM	16
	3.13 El agua en la zona metropolitana de Mérida	17
IV.	METODOLOGÍA.....	21
	4.1 Zona de estudio.....	21
	4.2 Obtención de los datos.....	24
	4.3 Técnicas de análisis	26
	4.4 Análisis de los datos	27
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	28
	5. 1 Cationes	28

5.2 Aniones	38
5.3 Distribución espacial de los solutos	47
5.4 Evolución temporal	65
5.5 Índices hidrogeoquímicos.....	68
5.6 Familias de aguas	71
5.7 Discusión	72
VI. CONCLUSIONES.....	73
VII. REFERENCIAS.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros permisibles según la NOM-127-SSA1-1994.	15
Tabla 2. Pozos elegidos de los que se obtuvieron datos.	25
Tabla 3. Técnicas de análisis.	26
Tabla 4. Resumen estadístico de las concentraciones del ión sodio.	28
Tabla 5. Resumen estadístico de las concentraciones del ion potasio.	30
Tabla 6. Resumen estadístico de las concentraciones del ion calcio.	32
Tabla 7. Resultado estadístico de las concentraciones del ion magnesio y comparación con la norma.	34
Tabla 8. Resumen estadístico de las concentraciones de dureza en la ZMM.	36
Tabla 9. Resultado estadístico de las concentraciones del ion cloruro en la ZMM.	38
Tabla 10. Resumen estadístico de las concentraciones del ion bicarbonato.	40
Tabla 11. Resumen estadístico de sulfatos en la ZMM.	42
Tabla 12. Resumen estadístico de las concentraciones del ion nitrato.	44
Tabla 13. Tendencias a través de mínimos cuadrados.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Familias de aguas en la Península de Yucatán.	8
Figura 2. Municipios que integran la Zona Metropolitana de Mérida.	21
Figura 3. Estructura geológica de la Península de Yucatán.	23
Figura 4. Concentraciones ion sodio en la ZMM.	29
Figura 5. Concentraciones de potasio en la ZMM.	31
Figura 6. Concentraciones de calcio en la ZMM.	33
Figura 7. Concentraciones de magnesio total en la ZMM.	35
Figura 8. Concentraciones de dureza total en la ZMM.	37
Figura 9. Concentraciones de cloruros en la ZMM.	39
Figura 10. Concentraciones de bicarbonatos en la ZMM.	41
Figura 11. Concentraciones de sulfatos en la ZMM.	43
Figura 12. Concentraciones de nitratos en la ZMM.	45
Figura 13. Distribución espacial del ion sodio en la ZMM.	48
Figura 14. Distribución espacial del ion potasio en la ZMM.	50
Figura 15. Distribución espacial del ion calcio en la ZMM.	52
Figura 16. Distribución espacial del ion magnesio en la ZMM.	54
Figura 17. Distribución espacial de la dureza total en la ZMM.	56
Figura 18. Distribución espacial del ion cloruro en la ZMM.	58
Figura 19. Distribución espacial del ion bicarbonato en la ZMM.	60
Figura 20. Distribución espacial del ion sulfato en la ZMM.	62
Figura 21. Distribución espacial del ion nitrato en la ZMM.	64
Figura 22. Evolución temporal de Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} en (a) Conkal, (b) Kanasín, (c) Umán (d) Ucú, (e) Mérida y (f) Progreso	65
Figura 23. Relación $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$	68
Figura 24. Relación $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$	69
Figura 25. Relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$	70
Figura 26. Diagramas de Piper (a) Conkal (b) Kanasín (c) Mérida (d) Progreso (e) Umán y (e) Ucú.	71

I. INTRODUCCIÓN

Los problemas relativos al agua son considerados una prioridad dada la importancia que tiene este recurso en la supervivencia del hombre. La disponibilidad y calidad del agua de una región son clave para el desarrollo económico, por lo que el abastecimiento del agua, siempre ha sido un tema de interés desde tiempos ancestrales. Sin embargo, en las últimas décadas la preocupación a nivel mundial sobre el acceso a agua de calidad ha ido en aumento.

El abastecimiento de agua potable en el estado de Yucatán es de origen subterráneo, y se obtiene a través de pozos construidos específicamente para tal fin (Perry *et al.* 2008). Tal es el caso del desarrollo de la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM) conformada por los municipios de Mérida, Ucú, Umán, Kanasín, Conkal y Progreso (SEDUMA 2013), en la que habitan más de un millón de personas (INEGI 2011b). El acelerado incremento de la población en la ZMM, aunado a la demanda del recurso hídrico para su uso en labores domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias, entre otras, ha provocado la contaminación de crecientes volúmenes de agua que, sin recibir tratamiento, son depositados en los cuerpos receptores de agua, provocando una grave afectación al medio ambiente (SEDUMA 2014).

Debido a esto, es necesario evaluar la calidad química del agua mediante los análisis de los iones mayoritarios, a través del tiempo y del espacio para el entendimiento de los procesos fisicoquímicos que controlan la composición química del agua subterránea. Los principales iones y parámetros utilizados son: calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), sodio (Na^+), potasio (K^+), bicarbonatos (HCO_3^-), sulfatos (SO_4^{--}), cloruros (Cl^-) y nitratos (NO_3^-); y como parámetros de campo, la conductividad eléctrica, la temperatura, el contenido de oxígeno disuelto y el pH.

El agua subterránea de origen cárstico en el Estado de Yucatán ha sido objeto de análisis espaciales en diversos estudios, incluida la ZMM. El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad química del agua subterránea y su variación espacial en la ZMM mediante la recopilación de los parámetros químicos obtenidos en muestreos

realizados entre los años 2003 y 2013; el análisis de las tendencias temporales y espaciales de los datos dentro del período antes mencionado, así como de las principales actividades humanas en la ZMM, con el fin de establecer posibles relaciones. Finalmente comparar estos parámetros con la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994), para determinar su aptitud para el consumo humano.

II. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la variación hidrogeoquímica y la calidad química del agua subterránea para consumo humano en la Zona Metropolitana de Mérida Yucatán (ZMM), para el periodo 2003-2013.

Objetivos específicos

-Analizar el comportamiento hidrogeoquímico (origen y fenómenos modificadores) del agua subterránea en el período de 2003-2013.

-Analizar las actividades humanas que se desarrollan en el área (agricultura, ganadería y disposición de residuos) de la ZMM y sus posibles relaciones con los componentes químicos mayoritarios (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{--} , Cl^- y NO_3^-) en el agua subterránea.

-Comparar los parámetros químicos con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

III. MARCO TEÓRICO

El agua es indispensable, no tiene sustituto y no se conoce forma de vida que prescindiera de ella (CEMDA 2006) en consecuencia es la base de la supervivencia del ser humano, además el agua interviene en menor o mayor grado en las actividades humanas y en todo lo que el ser humano usa y necesita en su vida diaria, desde los alimentos que necesita para su subsistencia hasta muebles, ropa y electrónicos, en términos prácticos no hay proceso de producción que directa o indirectamente no tenga relación con el agua. Debido a la importancia que el agua tiene para el hombre es vital garantizar su abastecimiento, por lo que es necesario entender cómo se forman los cuerpos de agua y qué factores intervienen en la formación de estos. Por lo que resulta de gran importancia tener fuentes que garanticen en cantidad y calidad el suministro de agua; más del 50 % de la población mundial depende del agua subterránea y en muchos casos es la única fuente de agua para consumo (UNESCO 2009). El estado de Yucatán es uno de esos casos donde el agua subterránea es su principal fuente de abastecimiento (Torres *et al.* 2014).

3.1 El agua en el mundo

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 billones de hm^3 , 97.5 % del agua del mundo es agua salada y sólo el 2.5 %, es decir, 35 billones de hm^3 es agua dulce; de esta cantidad casi el 70 % no está disponible para consumo humano porque se encuentra en glaciares, nieve y hielo por lo que la cantidad de agua que técnicamente está disponible para consumo humano es sólo una pequeña porción; menos del 1 % del total de agua de la tierra, se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o vuelve imposible su utilización efectiva (CONAGUA 2014). La disponibilidad del agua puede ser errática y hay una variabilidad de la disponibilidad

entre las zonas áridas y húmedas del planeta (UNESCO 2015). La mayoría de los recursos de agua dulce del planeta se concentran en sólo seis países: Brasil, Rusia, Canadá, EE.UU., China e India que poseen poco más del 40 % de los ríos del mundo, en contraste, cerca del 75 % de la población humana se concentra en países y regiones donde sólo existe el 20 % de las disponibilidades de agua (Toledo 2002).

Las aguas subterráneas constituyen el 97 % del agua dulce terrestre frente al 0.015 % del agua superficial embalsable. El 33 % de la población mundial, sobretodo la rural depende de ella, pero está amenazada por la contaminación de los acuíferos y por la mala utilización de los pozos existentes. La sobreexplotación de éstos provoca el descenso de la capa freática y hace imperioso excavar más hondo, incrementando el costo de la extracción del agua lo que supone perjudica primero a los más pobres. Además, cuando esto sucede en zonas costeras el agua del mar penetra y saliniza los acuíferos subterráneos (Graf 2007).

Mientras que en el Siglo XX la población mundial se triplicó, la demanda de agua se sextuplicó (CONAGUA 2014). Las demandas de agua en el mundo se le pueden atribuir a cinco principales factores: el crecimiento poblacional, el desarrollo industrial, la expansión de la irrigación en la agricultura, la urbanización masiva y el aumento de los estándares de vida; por ejemplo la extracción de agua en el mundo pasó de un estimado de 580 km³/año en 1900 a 3,700 km³/año en el 2000, en ese mismo período la superficie de tierras irrigadas pasó de 50 a 267 millones de hectáreas (Gleick 2000), no es de sorprender entonces que el 70 % del agua extraída de ríos, lagos y acuíferos sea usada por la agricultura (FAO 2011).

La huella hídrica (cantidad que agua que se utiliza directa o indirectamente) a nivel mundial de cada ser humano es en promedio 1,240 m³ de agua por año; sin embargo, las diferencias entre los países son muy grandes. Por ejemplo, en México la huella hídrica es de 1,441 m³ de agua por persona al año, mientras que, en los Estados Unidos, uno de los países con mayor huella hídrica, se utilizan 2,483 m³, en tanto que en China es de 702 m³ (CONAGUA 2014).

Uno de los grandes problemas es la disponibilidad del agua; el agua es escasa para 1,100 millones de personas que no tienen acceso a agua potable a las que se agregan otros 2,400 millones de personas que no tienen acceso a un saneamiento adecuado (Graf 2007).

Además de la disponibilidad del agua, un agua de buena calidad es importante para la salud humana, el desarrollo ha incrementado las presiones sobre los acuíferos llevando al deterioro de los acuíferos superficiales y subterráneos incrementando los requerimientos del tratamiento de aguas para el consumo humano, la contaminación y pérdida de la calidad del agua es el principal problema de los países en desarrollo (UNESCO 2009).

3.2 El agua en México

México recibe aproximadamente 1,489,000 millones de m³ de agua en forma de precipitación al año. De esta agua, se estima que el 71.6 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.2 % escurre por los ríos o arroyos, y el 6.2 % restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA 2014). Para México el agua renovable se calcula en 471.5 kilómetros cúbicos al año. La distribución del agua renovable en México es muy variable; por ejemplo, en la península de Baja California, de clima seco, es 33 veces menor que en las cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta, los más caudalosos de México. En el año 2013 el agua renovable per cápita por habitante era de 3,982 metros cúbicos por habitante, aunque se anticipa una disminución hacia el 2030 en el que este valor sería de 3,430 m³ por habitante (CONAGUA 2014). Ante estos valores de disponibilidad México es considerado un país de baja disponibilidad natural (Sosa-Rodríguez 2012).

Las aguas superficiales representan el 83.3 % del volumen total de agua disponible en México. Aunque las aguas superficiales concentran la mayor proporción de agua disponible, la principal fuente de abastecimiento para el consumo humano con fines

domésticos proviene de las aguas subterráneas, las cuales suministran el 64 % del caudal total consumido por este sector (Sosa-Rodríguez 2012).

En México se usan alrededor de 81.65 millones de metros cúbicos anuales de agua, de este volumen 75.72 % es para uso agrícola, 14.65 % es para el abastecimiento público, 4.09 % es para la industria autoabastecida y un 5.55 % es para la generación de electricidad (CONAGUA 2014).

La problemática de la disponibilidad de agua para el abastecimiento humano incluye la preocupación cada vez mayor, tanto para las autoridades como para la sociedad en general, de la calidad del agua (Berez *et al.* 2010). En México los problemas de calidad del agua son considerados como severos y tienen un fuerte rezago en su atención comparados con los relativos a la prestación de servicios a la población toda vez que las políticas gubernamentales están más enfocados a atender los rezagos en el acceso al agua. Los recursos hídricos del país están enfrentados a graves problemas de contaminación, la calidad del agua está por debajo de los límites permisibles para la salud humana, tanto en las aguas superficiales como en las subterráneas (FUSDA 2008).

3.3 El agua en la Península de Yucatán

La Península de Yucatán, localizada en el sureste de México, se compone por los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche, toda esta región es una plataforma formada por rocas calcáreas y evaporitas; la mayor parte es una superficie cárstica (Alcocer *et al.* 1999) caracterizada principalmente por rocas carbonatadas con existencia de cavernas, cenotes y conductos de disolución, lo cual ocasiona una gran permeabilidad, esto favorece una rápida infiltración que propicia el arrastre de los contaminantes hacia el acuífero; asimismo, presenta una carstificación extensiva que conlleva a la ausencia de corrientes superficiales (Cabrera *et al.* 2002), excepto en la zona costera donde hay presentes humedales, lagunas costeras y ambientes palustres y lacustres (Sánchez *et al.* 2005).

Prácticamente toda el agua se infiltra pasando a los acuíferos, siendo el agua subterránea la principal fuente de agua dulce como recurso para actividades humanas (Ordoñez y García 2010).

Gracias a la abundante precipitación pluvial y a las peculiares características topográficas y geológicas de la Península, el volumen renovable del acuífero es muy superior a las demandas generadas en todos los usos, incluso las esperadas a mediano y largo plazos. Se estima que el agua renovable es de 29,645 hm³ por año. El agua renovable per cápita es de 7,294 m³/hab/año, valor muy superior al de 1,700 m³ que se considera como estrés hídrico, por lo que en esta región existe suficiencia de disponibilidad hídrica per cápita (CONAGUA 2012). La recarga natural de agua en la Península de Yucatán es de 21,813.4 millones de metros cúbicos al año considerando que la descarga natural es de 14,542.2 millones de metros cúbicos y de un volumen concesionado de 1,511.98 millones de metros cúbicos, hay una disponibilidad de 5,759.22 millones de metros cúbicos por lo que la oferta supera por mucho a la demanda (CONAGUA 2015).

En la Península de Yucatán existen de manera general tres familias de aguas (Figura 1), la cálcico-sulfatada en el sur, la sódica-clorurada en la costa, y la cálcico-carbonatada en la mayor parte de la península, las dos primeras no son aptas para el consumo humano por las características de sus sales, y la cálcico-carbonatada representa la principal fuente de agua para los diferentes usos de la región (CONAGUA 2012).

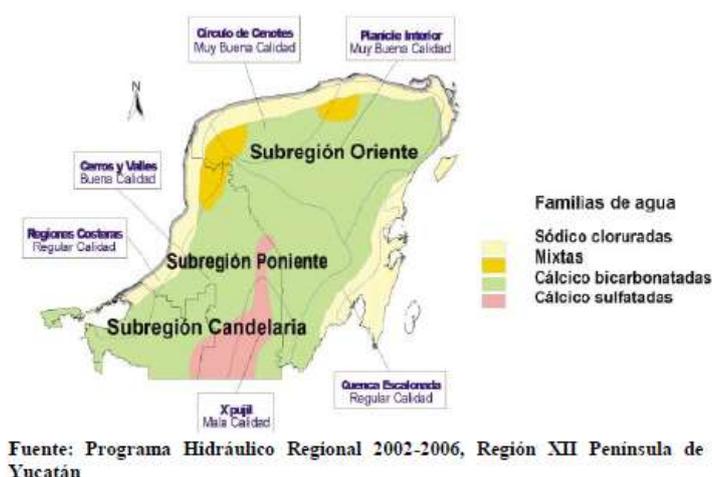


Figura 1. Familias de aguas en la Península de Yucatán.

En la Península de Yucatán el agua subterránea circula de las zonas de alta precipitación hacia las costas donde la descarga natural del acuífero ocurre en una serie de manantiales a través de la zona costera, suministrando agua a pantanos y lagunas, y en el océano (Villasuso y Méndez 2000).

3.4 El agua en el estado de Yucatán

Yucatán es uno de los pocos estados de la República Mexicana que no tiene problemas de abastecimiento de agua, sin embargo, no existen cuerpos superficiales, salvo cuerpos de agua temporales, esto debido a las características del subsuelo cárstico, por lo que la principal fuente de abastecimiento de agua potable es el agua subterránea, receptora, a su vez, del agua de desecho que se genera en el estado. El acuífero de la Península de Yucatán es considerado como libre a excepción de una franja estrecha paralela a lo largo de la costa. El agua subterránea se mueve desde las zonas de mayor precipitación, ubicadas al sur del estado, hacia las costas (Durán y Méndez 2010). El acuífero en la planicie norte y sureste alcanza profundidades de entre los 30 y 70 m, misma que se encuentra sobre una capa de agua salina (Villasuso y Méndez 2000).

A pesar de que las demandas de agua en la Península de Yucatán están más que cubiertas hay algunos problemas reconocidos en cuanto a la calidad como es el caso de la intrusión salina que ha obligado a las autoridades a restringir en algunos casos los abastecimientos permisibles en las costas. La gran disponibilidad de agua se ve afectada por los problemas de calidad: la permeabilidad del subsuelo hace que el acuífero sea más vulnerable a la contaminación propiciada por la disposición de descargas de aguas residuales y fosas sépticas, aguas pluviales y otros factores. El principal problema sobre el recurso hídrico que se presenta en el estado es el incremento de la contaminación del acuífero (Durán y Méndez 2010).

3.5 La vulnerabilidad de las aguas subterráneas

En las aguas subterráneas, la degradación de la calidad se advierte con frecuencia cuando el proceso contaminante ha afectado a amplias zonas del acuífero (Varela 1993). El carst posee una gran capacidad de infiltración, lo que lo hace vulnerable a la contaminación por infiltración (Aguilar *et al.* 2013) y la mayor parte de Península de Yucatán se caracteriza por ser de una superficie cárstica (Alcocer *et al.* 1999). En un medio cárstico la rapidez del flujo en el interior del sistema favorece la transmisión de los contaminantes y es escasa la capacidad de autodepuración debido al limitado intercambio iónico en comparación con los medios porosos (Facundo *et al.* 2005).

Los acuíferos cársticos son los de mayor exposición a contaminantes y su contaminación es un problema ambiental grave a nivel mundial (Aguilar *et al.* 2013). Su constitución geológica determina su alta vulnerabilidad a la contaminación, ya que se conforma por calizas fracturadas, con conductos y oquedades de disolución, muy poroso y permeable y, por ende, los contaminantes penetran fácilmente y en forma casi inmediata al manto freático, sin permitir que se lleven a cabo procesos de atenuación como reacciones fisicoquímicas, antes de su ingreso al acuífero (DOF 2013). El acuífero de la Península de Yucatán al ser mayormente cárstico presenta características fisiográficas, geomórficas, geológicas, estructurales, hidrogeoquímicas y geohídricas que lo hacen vulnerable a la recepción de contaminantes, debido a su exposición natural, arrastrados desde la superficie por las precipitaciones, lo que implica una potencial pérdida en la calidad del agua subterránea.

En el estado de Yucatán dada su naturaleza cárstica, se han identificado que las descargas de agua contaminada hacia las aguas subterráneas y su transporte hacia la zona costera, está generando problemas sanitarios (Batllori *et al.* 2005).

El riesgo a la contaminación del acuífero calculado a través de la metodología DRASTIC determinó que la vulnerabilidad del acuífero del estado es muy alta en los municipios comprendidos dentro de la región hidrogeológica “Semicírculo de Cenotes” y extremo en los municipios del norte de dicha región hidrogeológica así

como en la zona costera. La peligrosidad tuvo la clasificación de muy alto para los municipios de Mérida y alto para el municipio de Progreso (Torres *et al.* 2014).

3.6 La calidad del agua subterránea

La calidad del agua es un atributo definido socialmente en función del uso que se le da al líquido; cada uso requiere un determinado estándar de calidad, razón por la cual para evaluar la calidad del agua es necesario considerar el contexto del uso probable que tendrá, ésta se expresa mediante un conjunto de valores relativos a parámetros físicos, químicos y biológicos, de los que se han establecido límites admisibles (Varela 1993).

La calidad del agua es afectada por diversos factores como el cambio de uso del suelo, la producción industrial y agrícola, el tratamiento que se le da antes de ser vertida nuevamente a los cuerpos de agua de los que depende su purificación, etc. (Custodio y Llamas 1983b). Es bien sabido el papel del agua como disolvente universal, en el caso del agua subterránea, en su flujo adquiere propiedades de las rocas con las que entra en contacto, del ambiente que lo rodea y de todos los elementos presentes por donde fluye (Nagaraju *et al.* 2014). Bajo la influencia de procesos antropogénicos, en regiones industriales o agrícolas la química del agua subterránea puede cambiar sustancialmente (Guo y Wang 2004), por lo que se debe hacer hincapié en la diferencia entre agua de mala calidad natural y agua contaminada. La primera está condicionada por procesos y reacciones químicas que se llevan a cabo en el material geológico a lo largo de la trayectoria de flujo del agua subterránea; mientras que la segunda, es debido a la incorporación de especies químicas a consecuencia de actividades humanas (Hernández 2008).

La calidad de las aguas subterráneas se expresa mediante un conjunto de valores relativos a parámetros físicos, químicos y biológicos, de los que se han establecido límites admisibles o tolerables en función del uso previo del recurso. Debe entenderse la calidad como un reflejo de la evolución hidroquímica en un punto del acuífero y en un momento determinado (Pernía-Llera *et al.* 1993).

La calidad química se expresa en función de iones mayoritarios o macroconstituyentes, cuya concentración agregada representa en general más del 90 % del contenido iónico total. Los parámetros descriptivos de la calidad natural son los siguientes: temperatura, pH, conductividad; aniones: cloruros, sulfatos, bicarbonatos, nitratos, nitritos; cationes: sodio, potasio, calcio, magnesio, amonio; hierro y manganeso totales; sílice, oxígeno disuelto y anhídrido carbónico disuelto (Varela 1993). El conocimiento de la calidad del agua subterránea se vuelve un componente crucial para su manejo integral (Batisani 2012).

3.7 La evaluación de la calidad del agua subterránea

La evaluación de la evolución del agua subterránea se considera de gran importancia para un mejor entendimiento de las características de la calidad de agua y la aplicación de técnicas de estadística multivariada, han mejorado la identificación de posibles factores que influyen en la calidad del agua subterránea. Estas técnicas ofrecen una herramienta invaluable para el entendimiento y manejo sustentable de las fuentes de agua. Estudios donde se han empleado las técnicas de estadística multivariada han exitosamente asistido en la caracterización y evaluación de la calidad de las fuentes de agua (Nagaraju *et al.* 2014).

Las mediciones de los constituyentes fisicoquímicos de las aguas subterráneas permiten observar la calidad y distribución e incluso el origen del agua, los fenómenos de intrusión salina y el tipo de rocas a través de las cuales circula (Pernía-Llera *et al.* 1993). Dentro de la evolución iónica temporal se pueden diferenciar aquellos iones cuyo origen es interno de los que tienen una procedencia esencialmente externa al sistema (Pulido y Cerón 1991).

A nivel mundial se han realizado numerosos estudios, en los cuales se identifican los impactos generados al agua subterránea debido al proceso de urbanización. La mayoría de estos estudios, se centran en la medición de parámetros de calidad, medición de los niveles de agua subterránea y, en algunos otros estudios, en la medición de concentraciones de ciertos contaminantes presentes en el agua

subterránea, los cuales son frecuentemente producto del uso de agroquímicos y de las descargas de aguas residuales de origen urbano e industrial (Del campo 2009).

El estudio del comportamiento de determinados parámetros puede proporcionar información sobre el origen de los mismos; estudios han demostrado que altas concentraciones de Na^+ y Cl^- en el agua subterránea pueden ser atribuidas a las actividades humanas. Es bien conocido que el Na^+ y el Cl^- son derivados de los fertilizantes agrícolas, desechos animales y aguas residuales municipales e industriales (Nagaraju *et al.* 2014) aunque también puede deberse a procesos de origen natural como lo es la intrusión marina (Pacheco *et al.* 2004). La contaminación por nitratos (NO_3^-) se ha convertido en una de las principales causas de deterioro del agua subterránea; la contaminación por NO_3^- es la más difundida geográficamente y vinculada con la mayor parte de las actividades humanas; en los centros urbanos carentes de sistemas de tratamiento para aguas residuales, los NO_3^- derivan de la degradación de la materia orgánica mayormente de origen fecal (Auge 2008).

Mediante los cambios en las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) y Ca^{++} , Cl^- y Na^+ Leung *et al.* (2004) comprobaron la influencia del sistema de drenaje y las descargas de aguas residuales en el agua subterránea en las zonas urbanas de un área costera de Hong Kong. En Attica, Grecia Bathrellos *et al.* (2007) atribuyeron las elevadas concentraciones de NO_3^- a la utilización de fertilizantes y el aporte de las zonas urbanas ya que esta región ha experimentado una elevada urbanización y un crecimiento no controlado de pequeñas industrias que han contribuido a la contaminación.

En México, se han llevado a cabo estudios para la evaluación temporal de la contaminación del agua subterránea con diferentes enfoques. González (2009) relacionó incrementos en algunos parámetros en el agua subterránea con las actividades agrícolas y con las actividades minero metalúrgicas en el norte del estado de San Luis Potosí. Algunos parámetros rebasaban los límites permisibles como el caso del nitrato cuyo origen fue atribuido a la actividad pecuaria, mientras que concentraciones de arsénico por encima de los límites fueron atribuidos a la

actividad minero metalúrgica que se desarrolla en la zona, también identificó una excesiva extracción del agua subterránea.

Osorio (2009) realizó el análisis de nitratos en el estado de Yucatán entre 2003 y 2008 destacó que existió un incremento significativo por nitratos pasando de un 10.38 a 23.58 % los municipios cuyas concentraciones no cumplieron con la Norma (NOM-127-SSA1-1994), destaca además que la contaminación fecal puede asociarse con un origen humano en el 24 % de los municipios mientras que en un 10 % de los municipios a un origen animal, en lo que respecta a la ZMM observó decrementos en las concentraciones de nitratos en Mérida y Kanasín, nulos cambios en Progreso pero incrementos en los demás municipios.

3.8 Índices hidrogeoquímicos

Los índices hidrogeoquímicos representan la relación entre los iones disueltos en el agua cuyo estudio permite, en cierto modo, dilucidar el terreno del que procede el agua, predecir la acción de fenómenos modificadores o indicar una característica específica de la misma (Custodio y Llamas 1983a).

RELACIÓN Mg^{++}/Ca^{++}

La relación Mg^{++}/Ca^{++} permite identificar fenómenos de: a) precipitación de $CaCO_3$ (valores mayores a 0.5 pero menores a 1); b) contaminación marina (valores elevados de esta relación y valores mayores a 8.5 meq/L de cloruros y c) disolución de caliza (valores menores a 0.5) (Custodio y Llamas 1983a).

RELACIÓN Cl^-/HCO_3^-

Esta relación es útil para seguir el proceso de concentración de sales en el sentido de flujo subterráneo y para caracterizar la intrusión salina, tiene normalmente un valor entre 0.1 y 5 y en el agua de mar entre 20 y 50. Esta relación es mayor si los cloruros provienen de las zonas de regadío, a las zonas donde los cloruros proceden por intrusión marina.

RELACIÓN $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$

En aguas algo salinas, el contenido en ion SO_4^{2-} tiende a hacerse constante y entonces tiene un interés similar al $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$.

3.9 Parámetros regulados para el consumo de agua

En México la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional. En esta se contienen los límites permisibles para algunos constituyentes químicos.

Tabla 1. Parámetros permisibles según la NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Límite permisible (mg/l)
Cloruros	250
Sodio	200
Sulfatos	400
Nitratos	45

En esta misma norma se establece que el límite de la dureza en el agua es de 500 mg/l, para obtener la dureza se requiere de los iones calcio y magnesio.

3.10 La zona metropolitana de Mérida

La zona metropolitana de Mérida (ZMM) es el territorio integrado por los municipios de Conkal, Kanasín, Mérida, Ucu y Umán; sin embargo, por el papel histórico, su importancia económica y sobre todo su conurbación funcional con Mérida, el municipio de Progreso ha sido incorporado a la ZMM; la ZMM se define como el ámbito inmediato de influencia socio-económica y físico-espacial de la zona urbana de Mérida, por lo que constituye un espacio de carácter estratégico para el ordenamiento urbano de la región (SEDUMA 2014). En el año 2010 su población

fue de 1,027,004 habitantes (INEGI 2011a). La ZMM puede afectar la calidad del agua subterránea (Torres *et al.* 2014).

3.11 El crecimiento de la urbanización en la ZMM

En México se dio el fenómeno generalizado de crecimiento poblacional urbano acelerado a partir de la década de 1970, siendo esta población la que empezó a dominar en relación a la población rural, lo cual conllevó a su vez la generación de más viviendas en el medio urbano causando la expansión física de las ciudades y la proliferación de éstas. La ciudad de Mérida no escapa a tal fenómeno, experimentando un crecimiento poblacional acelerado a partir de la misma década, debido a la crisis henequenera (López 2008).

En la ZMM los espacios urbanos, zonas que presentan una mezcla de materiales construidos y vegetación, registraron un incremento de 61.87 % al pasar de 18,016.71 has en el año 2000 a 29,163.25 has en el año 2014; en ese mismo período las áreas urbano naturales, que son áreas con una mezcla de algunos materiales construidos, pero sobre todo la vegetación es en forma de hierbas o césped y en las que las superficies impermeables representan menos del 20 % de la cobertura total, tuvieron un incremento de 50.34 % al pasar de 2,351.32 a 3,535.01 has. En cuanto a los suelos agrícolas éstos registraron una disminución de 19.25 % al pasar de 21,446.53 ha a 17,318.83 ha (SEDUMA 2014).

3.12 Crecimiento demográfico en la ZMM

La Zona Metropolitana de Mérida es el centro más dinámico de la entidad yucateca ya que alberga la capital estatal y concentra el 52.52 % de la población total del estado de Yucatán. Durante las últimas décadas, ha experimentado acelerados ritmos de crecimiento que han contribuido significativamente a su configuración urbana dispersa y desordenada. De 1990 a 2010, se incorporaron 359 mil 692 habitantes, acumulando en 2010 una población total de 1 millón 27 mil 4 habitantes. El escenario poblacional estimado por el CONAPO a 2030, muestra un incremento cercano a 290 mil nuevos habitantes en dos décadas (2010-2030), con lo cual la

ZMM alcanzará una población total de más de 1.3 millones de habitantes. El mayor incremento se presentará entre 2015 y 2020 (71 mil 280 habitantes), prevaleciendo la mayor presión demográfica en los municipios metropolitanos de Mérida, Kanasín y Umán (SEDUMA 2014).

3.13 El agua en la zona metropolitana de Mérida

En Yucatán, la principal fuente de abastecimiento de agua potable es el agua subterránea, que es también receptora de las aguas de desecho que se generan en el estado, haciendo que el problema principal del acuífero sea su vulnerabilidad a la contaminación (Alcaraz 2010).

Alcaraz (2010) enlista las siguientes fuentes de contaminación que contribuyen al deterioro de la calidad del agua subterránea:

- Bancos de materiales pétreos que afloran el manto freático o “sascaberas”, utilizados como sumideros o tiraderos de basura

Ha sido utilizado como materia prima para la producción de agregados para la industria de la construcción, así lo demuestra la existencia de varios bancos de material abandonados después de ser explotados hasta algunos metros por debajo del nivel freático, convirtiéndose así en centros de acopio de basura.

- Fecalismo al aire libre en el medio rural

Práctica común en la zona rural, debido a que la mayoría de la población no cuenta con baño para realizar sus necesidades fisiológicas, ocasionando así que las realicen en los patios traseros, produciendo contaminación bacteriológica principalmente por coliformes fecales, coliformes totales y nitratos.

En Yucatán, más del 40 % de casos de muerte en niños menores a 6 años han sido atribuidas a las enfermedades gastrointestinales causadas por bacterias patógenas transportadas por el agua subterránea.

Infiltración en pozos pluviales

Debido a que en el estado no se cuenta con drenaje pluvial, los centros urbanos desalojan sus aguas sin tratamiento alguno por medio de pozos ubicados en los cruces de las calles (con profundidad entre 12 y 18 metros), los cuales en época de

lluvias captan todos los residuos vertidos en las mismas, ocasionando que el subsuelo sea sometido a una fuerte carga de contaminantes, sobre todo en la ciudad de Mérida.

- Carencia tratamiento para las aguas residuales de la industria o insuficiente

No se cuenta con sistema de drenaje en la mayoría de las zonas urbanas; lo que significa que las aguas residuales de uso doméstico, industrial y comercial son descargadas directamente al acuífero sin algún tratamiento previo o, en ocasiones, con tratamiento primario.

En ocasiones, existen industrias que utilizan pozos someros o cenotes para verter sus residuos sin tratar; este problema está ligado también a la mezcla de los diversos tipos de contaminantes vertidos, que acaban formando otros contaminantes secundarios más difíciles de eliminar.

- Fosas sépticas con baja eficiencia con descargas al acuífero

Debido a la falta de un sistema de drenaje y de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, se utilizan como método de tratamiento las fosas sépticas, muchas de éstas con baja eficiencia, ya que descargan sus aguas de tratamiento a los pozos areneros, algunos de los cuales se encuentran a menos de un metro por encima del nivel freático.

- Disposición inadecuada de residuos sólidos

Muchos municipios utilizan para la disposición final de residuos sólidos basureros municipales a cielo abierto, los cuales muchas veces están ubicados en sitios inadecuados como dunas costeras, humedales etc.

No existe control alguno de los residuos sólidos dispuestos, por lo que cuando se presenta la época de lluvias, representan un gran problema para el acuífero.

- Aplicación de fertilizantes y plaguicidas no autorizados en el medio rural, fugas en gasolineras, residuos de peleterías y tiraderos de aceites

El uso inadecuado de productos agroquímicos y plaguicidas en la agricultura, ha resultado ser un gran problema.

Un segundo aspecto de la contaminación por labores agrícolas tiene origen en los regadíos, por concentración de sales en el agua de riego que se infiltra; aumenta su importancia cuando se trata de regadíos con aguas subterráneas en zonas mal

drenadas o con escasa recarga natural, donde al cabo de un tiempo, puede llegarse a utilizar un agua no apta para los cultivos establecidos.

- Afectaciones por el paso de huracanes

El paso de huracanes provoca daños en infraestructuras dedicadas a granjas porcícolas y avícolas, caída de árboles, postes, además de la provocación de inundaciones.

Estos efectos ocasionan la muerte de muchos animales de granjas, los cuales son enterrados en zonas aledañas a los poblados provocando que afecte al agua subterránea.

- Intrusión marina en pozos costeros por diseño inapropiado y mala operación

La intrusión marina se presenta en la franja costera, en las porciones en donde el nivel estático se encuentra a poca profundidad, la cuña de “agua dulce” disminuye o desaparece.

La intrusión de agua marina ocurre durante la época de menos precipitación; al combinarse la ausencia de recarga con la explotación de los acuíferos, permitiendo el avance de la intrusión marina hasta unos 15 kilómetros tierra adentro, se debe a la gran cantidad de pozos pequeños ubicados en el lugar.

El abastecimiento de agua potable en la Zona Metropolitana de Mérida, se realiza a través de cuatro zonas de captación localizadas en el municipio de Mérida, cada una con su respectiva planta potabilizadora, 23 cárcamos de rebombeo y 50 sistemas independientes alcanzando una cobertura general de 98 % de la ciudad de Mérida, según información de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán. Las plantas potabilizadoras, mejor conocidas como Mérida I, Mérida II, Mérida III y Mérida IV, se conforman en total por 77 pozos; en el municipio de Progreso hay un campo de extracción y un número indeterminado de pozos en sus localidades menores. Su sistema de agua potable y alcantarillado, tiene la concesión para explotar y aprovechar aguas nacionales del subsuelo que amparan 23 pozos públicos urbanos localizados en el municipio de Mérida en las localidades de: Temozón Norte (10 pozos); Sierra Papacal (10 pozos) y Hacienda Tamanché (3 pozos) En Umán, el abastecimiento de agua se realiza a través de tres pozos de extracción con turbinas verticales. Para el rebombeo se cuenta con dos cárcamos

que distribuyen el líquido hacia otro cárcamo localizados en San Lorenzo. Para el resto de los municipios que conforman la región se sabe que cada localidad cuenta con pozos de abastecimiento público. Adicionalmente, en las comunidades rurales (donde no existe red pública), es tradicional extraer agua a través de pozos generalmente localizados en los traspatios de las viviendas (SEDUMA 2014).

Respecto al tratamiento de las aguas residuales se presentan cifras contrastantes, según INEGI (2011) el porcentaje de hogares que cuentan con drenaje en la ZMM son diferentes: Ucu 66.1 %, Umán 74.9 %, Conkal 84.1 %, Kanasín 88.2 %, Mérida 94.3 % y Progreso 97.4 %. Sin embargo, en la ciudad de Mérida 107,065 viviendas disponen sus aguas residuales mediante fosas sépticas, esto representa un 40 % del total de 267,663 viviendas registradas. Cabe señalar, que de acuerdo a la fuente del organismo operador (JAPAY), solamente 28,187 viviendas disponen de sistema de tratamiento colectivo, donde las aguas residuales son colectadas a través de alcantarillado sanitario y destinadas para su depuración a una planta de tratamiento. Estas viviendas están en su mayoría ubicadas en nuevos desarrollos habitacionales (SEDUMA 2013).

IV. METODOLOGÍA

4.1 Zona de estudio

La Zona Metropolitana de Mérida se encuentra al noreste del estado de Yucatán y está conformada por los municipios de Conkal, Kanasín, Mérida, Progreso, Ucú y Umán (Figura 2); La ZMM solo tiene como frontera natural el Golfo de México en el municipio de Progreso y carece de montañas o ríos que limiten la expansión de la mancha urbana.

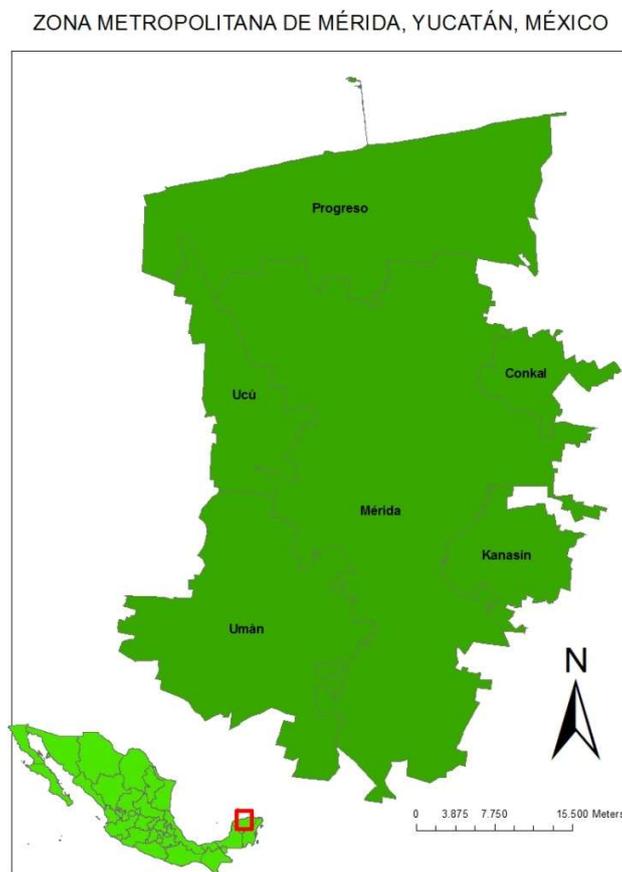


Figura 2. Municipios que integran la Zona Metropolitana de Mérida.

CLIMA

En Yucatán existe una temporada lluviosa bien definida que abarca de mayo a octubre, el mes más lluvioso es septiembre con una precipitación superior a 200 mm, señalando la influencia ciclónica. Dos regímenes pluviométricos imperan en la Península de Yucatán: el de verano y el intermedio. La precipitación media estatal es de 1,062 mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a octubre (INEGI 2011a).

La Península de Yucatán tiene un clima tropical húmedo. La temperatura media anual es de 26 °C que se mantiene bastante estable a lo largo de todo el año, siendo los meses más cálidos julio y agosto, y los más fríos diciembre y enero. La combinación de la elevada temperatura junto con la abundante vegetación da como resultado una evapotranspiración del orden del 85 % de la precipitación. El 15 % restante de la precipitación se infiltra y pasa a formar parte de las aguas subterráneas (Villasuso y Méndez 2000).

HIDROLOGÍA

La Península de Yucatán, donde se encuentra la ZMM, es conocida por la ausencia de ríos y cuerpos de agua superficiales, excepto en la zona costera donde hay presentes humedales, lagunas costeras y ambientes palustres y lacustres. El relieve casi llano, la falta de suelo y el fracturamiento de la roca son los principales factores responsables de la ausencia de ríos en Yucatán; como consecuencia, parte de la lluvia recarga el acuífero por medio de la infiltración, a través del fracturamiento del caliche (Sánchez *et al.* 2005).

En la Península se distinguen dos acuíferos regionales de carácter cárstico correspondiente uno a la región oriental septentrional y el otro a la porción sur centro denominados “acuífero Mioceno” y “acuífero Eocénico” respectivamente (Velázquez 1986), por lo que la ZMM está en el acuífero Miocénico, con alta permeabilidad y transmisibilidad, poca carga hidráulica, nivel freático estable y una dirección de flujo radial desde el centro de la península hacia las costas.

GEOLOGÍA

La Figura 3 muestra la estructura geológica diferencial encontrada en un transecto que va desde Campeche, al sur del estado, hasta el puerto de Progreso y que atraviesa por el centro de la ZMM, donde se alternan las margas, lutitas y calcarenitas, con la caliza coquinoïdal, para terminar en la costa con la caliza de moluscos. Se pueden definir cinco unidades geomorfológicas en la zona de estudio: la planicie estructural elevada que prácticamente cubre la mayor extensión; la planicie estructural baja localizada en la parte noroeste del municipio por las localidades de Chalmuch, Susulá, Cheuman y San Antonio Hool; una superficie de inclinación muy débil localizada en la parte suroeste del municipio por San José Tzal, Texán Cámara, la superficie de inclinación débil localizada al norte de municipio por Dzidzilché y la superficie de elevación menor ubicada al oeste (Villasuso y Méndez 2000).

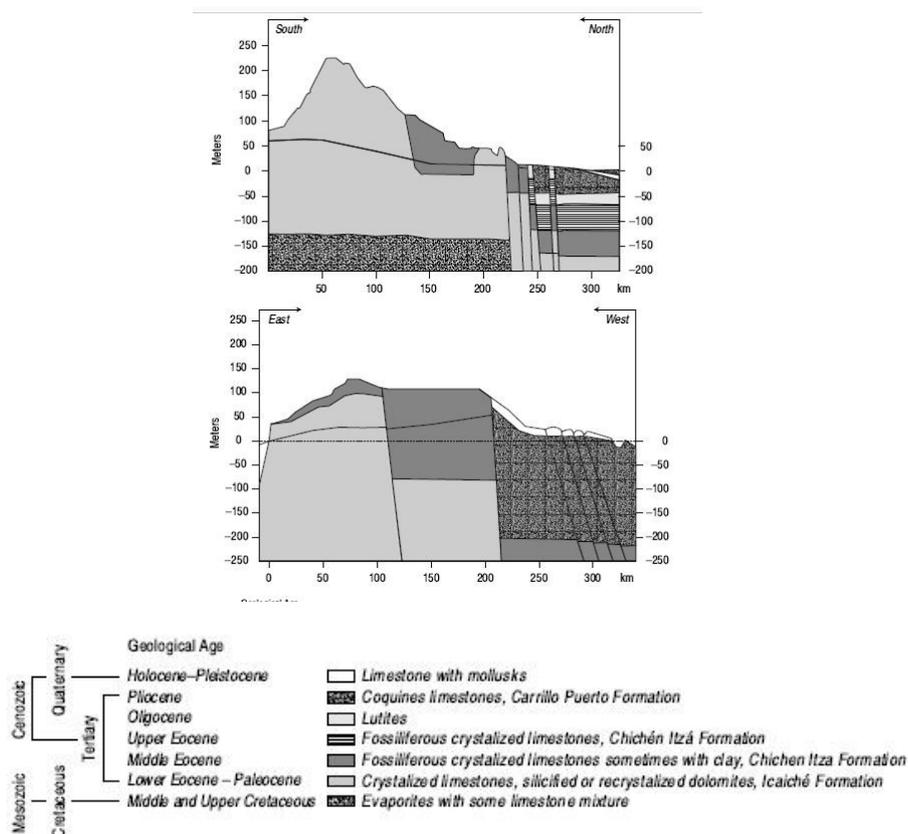


Figura 3. Estructura geológica de la Península de Yucatán.

4.2 Obtención de los datos

Se recopiló la información de los datos recabados en diversos proyectos realizados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán dentro del período de este trabajo. Los datos que se usaron corresponden a los parámetros de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$, Cl^- y NO_3^- , obtenidos, junto con los demás parámetros de campo habituales en los muestreos de agua subterránea, en pozos de abastecimiento público realizados entre 2003 y 2013 en los municipios de la ZMM. Los pozos de los cuales se tomaron datos se muestran en la Tabla 2.

Los datos del año 2003 se recabaron mediante el proyecto financiado por el Fondo Mixto CONACYT Gobierno de Yucatán Clave 2002-COI-8721 “Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los pozos de extracción de agua potable y evaluación de la infraestructura física de los sistemas de abastecimiento de las cabeceras municipales del estado de Yucatán” estos muestreos se llevaron a cabo entre julio y noviembre de dicho año.

Los datos correspondientes al año 2007 se obtuvieron durante el mes de Julio como parte de los proyectos YUC-2005-C04-21317 “Contaminación del acuífero por descargas de desechos porcícolas y avícolas” YUC-2005-C04-21281 “Diagnóstico de los residuos peligrosos en la entidad.”

Las muestras del año 2009 se obtuvieron entre octubre y diciembre; en el año 2010 se obtuvieron en un primer período comprendido entre abril y ju

nio, posteriormente entre octubre y diciembre mientras que los datos del año 2011 fueron recabados entre mayo y junio, este grupo de datos se obtuvo como parte del proyecto “Reserva hidrogeológica para el abastecimiento de agua con calidad para la zona metropolitana de la ciudad de Mérida, Yucatán” Clave 108520.

Tabla 2. Pozos elegidos de los que se obtuvieron datos.

MUNICIPIO	POZO	COORDENADAS	
		LATITUD	LONGITUD
Conkal	Conkal	21.0677	-89.52165
Kanasin	Kanasín	20.9325167	-89.5530667
Mérida	Mérida I	20.8384833	-89.59955
	Mérida I	20.8372333	-89.5933
	Mérida I	20.83335	-89.60125
	Mérida I	20.8294667	-89.60925
	Mérida I	20.8271333	-89.5971167
	Mérida I	20.8219333	-89.59895
	Mérida I	20.8195833	-89.5868833
	Mérida II	20.8842333	-89.6923333
	Mérida II	20.8734167	-89.6961833
	Mérida II	20.8704667	-89.69265
	Mérida III	20.97045	-89.5078
	Mérida III	20.9708167	-89.5031
	Mérida III	20.9712667	-89.4982167
	Chuburna	21.0151944	-89.626
	Morelos Fovissste	20.9427222	-89.6044722
	Pensiones	21.006858	-89.648546
	Plan de Ayala	20.9106111	-89.62025
	42 Sur	20.9495278	-89.6128611
Xoclan	20.9741944	-89.6641111	
Progreso	Chicxulub Puerto5	21.2304	-89.56515
	Flamboyanes	21.2095	-89.6638
	San Ignacio	21.1604167	-89.65295
	Sierra Papakal 3	21.1275667	-89.7432167
	Sierra Papakal 5	21.1318833	-89.7418167
	Temozon 9	21.0623833	-89.6198
	Temozon 10	21.0607833	-89.6284333
Ucú	Ucú	21.0310833	-89.7465667
Umán	Umán	20.8724833	-89.72675

Los registros de 2012 se recabaron entre julio y septiembre como parte del proyecto “Evaluación de la calidad del agua subterránea que subyace a la ciudad de Mérida y su impacto en la zona costera norte” Clave 148167. Los datos de 2013 fueron recabados como parte del proyecto “Protección de zonas periféricas y áreas de

influencia de los pozos de extracción para el abastecimiento actual de la Zona Metropolitana" Clave 131955.

Durante los muestreos se determinó la ubicación geográfica de los pozos mediante un geoposicionador satelital (GPS). La toma de muestras se realizó en tuberías que contenían agua subterránea; es decir, antes de la cloración. Para tal efecto, se ponía la bomba en operación, dejando fluir el agua durante dos minutos, con la finalidad de obtener una muestra representativa.

4.3 Técnicas de análisis

En los muestreos realizados en 2003, el control de calidad de las mediciones de campo se realizó de acuerdo a las técnicas descritas en el *Standard Methods* (APHA *et al.*, 1989) y en los manuales de operación de los equipos. En los muestreos realizados durante el año 2007, 2009, 2010, 2011 y 2012 se analizaron con las técnicas descritas en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA-AWWA-WPCF 2005); cabe destacar que las técnicas de análisis no presentaron cambios respecto de una edición a otra.

Las técnicas empleadas para el análisis de los parámetros químicos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Técnicas de análisis.

Análisis	Técnica de determinación
Calcio (Ca^{++})	Volumétrico
Magnesio (Mg^{++})	
Bicarbonatos (HCO_3^-)	
Cloruros (Cl^-)	
Sulfatos (SO_4^-)	Espectofotométrico
Nitratos (NO_3^-)	
Sodio (Na^+)	Absorción atómica
Potasio (K^+)	

Los análisis se realizaron dentro del tiempo establecido y como medida de control y aseguramiento analítico las determinaciones químicas para cada muestra se realizaron por triplicado y se realizó el balance de cargas aceptando hasta un 10 % del error.

4.4 Análisis de los datos

A través de Excel la información fue concentrada y adecuada para los propósitos de este trabajo y para usarse en los programas Aquachem y ArcGis.

Mediante la estadística descriptiva se obtuvieron estadísticos importantes mínimos y máximos, la media, la desviación estándar y el coeficiente de correlación.

Para estudiar la evolución temporal de los iones en Excel se graficaron contra el tiempo las concentraciones de cada parámetro. Mediante los diagramas de Piper se analizaron las tendencias en los comportamientos químicos del agua subterránea para identificar posibles cambios en los procesos de interacción del agua subterránea.

En ArcGis se realizaron mapas de isolíneas para plasmar las concentraciones para analizar las características y patrones de distribución de cada muestreo. Los datos se procesaron en los módulos del *software* para cada parámetro y poder plasmarlo en un mapa de la ZMM.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5. 1 Cationes

SODIO

Como se puede ver en la Tabla 4 las concentraciones de este ion fluctuaron entre los 50.58 y los 418.88 mg/l; en prácticamente todos los años muestreados se observaron concentraciones por arriba de la NOM-127-SSA1-1994. En algunos pozos en San Ignacio es donde se registraron los valores máximos en los últimos 4 muestreos mientras que en la planta Mérida II se registraron los valores mínimos; el límite máximo de sodio para aguas naturales en México según la norma antes mencionada establece 200 mg/l para uso y consumo humano.

Tabla 4. Resumen estadístico de las concentraciones del ión sodio.

AÑO	MIN	MAX	MEDIA	DESV. EST.
2003	91.50	262.33	130.77	42.79
2007	59.15	407.95	103.55	73.49
2009	60.28	377.70	116.89	76.51
2010	54.49	399.11	111.86	77.35
2010 (1)	50.58	418.88	102.51	79.52
2011	49.66	411.98	102.98	83.81
2012	73.66	408.60	128.37	74.30
2013	63.81	399.24	119.99	73.19

En la Figura 4 se observan pozos en los municipios de Progreso(Sierra Papakal y San Ignacio) y Ucú registraron valores por arriba de lo establecido por la norma; en el caso de Ucú si bien se mantuvo por arriba de la norma se observa una disminución de las concentraciones.

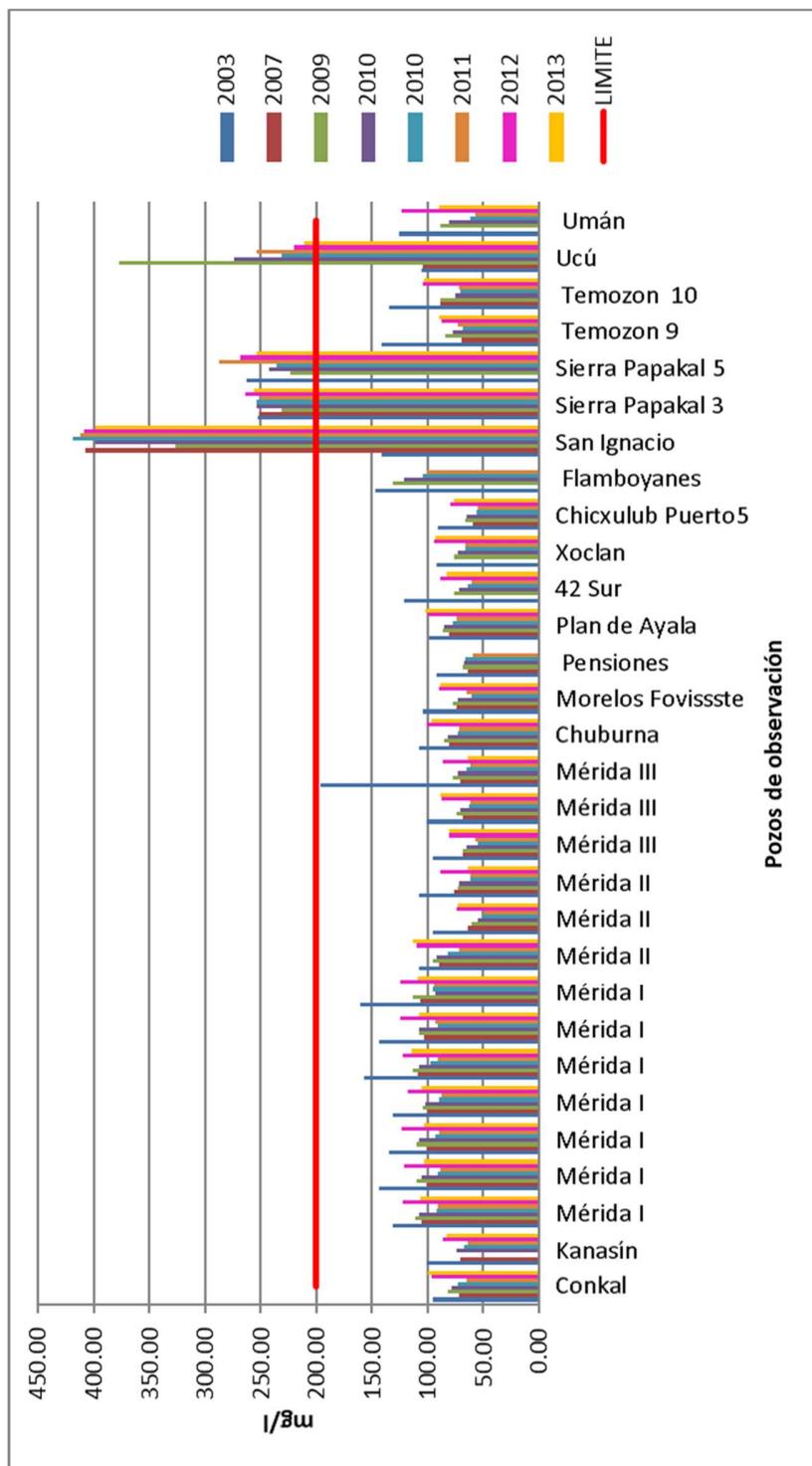


Figura 4. Concentraciones ion sodio en la ZMM.

POTASIO

Las concentraciones de este ion fluctuaron entre 2.65 y 18.77 mg/l; en aguas subterráneas se suelen encontrar concentraciones menores a 10 mg/l, aunque en todos los muestreos se observaron concentraciones arriba de este valor. Según el resumen de la Tabla 5, los valores mínimos observados se registraron en la Mérida II mientras que los máximos en Ucú, Flamboyanes y San Ignacio en el municipio de Progreso.

Tabla 5. Resumen estadístico de las concentraciones del ion potasio.

AÑO	MIN	MAX	MEDIA	DESV. EST.
2003	4.23	13.14	6.94	2.53
2007	3.00	17.90	5.30	3.56
2009	2.75	17.64	5.66	3.88
2010	2.74	18.77	5.71	4.03
2010 (1)	3.52	16.81	6.56	3.94
2011	3.13	19.55	7.12	4.30
2012	2.65	14.23	5.64	2.61
2013	3.30	14.75	5.67	2.86

En la Figura 5 se observa que en la ZMM las concentraciones en los pozos de los municipios de Progreso (Sierra Papakal y San Ignacio) y Ucú presentaron valores por encima de 10 mg/l; sin embargo, la norma mexicana no contiene un límite para este ion.

Según la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) la intoxicación o efectos negativos a la salud por consumo de potasio contenidos en el agua de consumo son sumamente raros debido a que el potasio es rápidamente excretado, salvo casos de daños en el riñón preexistentes en el individuo. Si bien se han registrado fatalidades a causa de dosis altas de potasio, y que se ha estudiado la relación de la toxicidad del potasio en relación con altas dosis los datos obtenidos no son considerados adecuados para derivar en un límite máximo de potasio en el agua (WHO,2009).

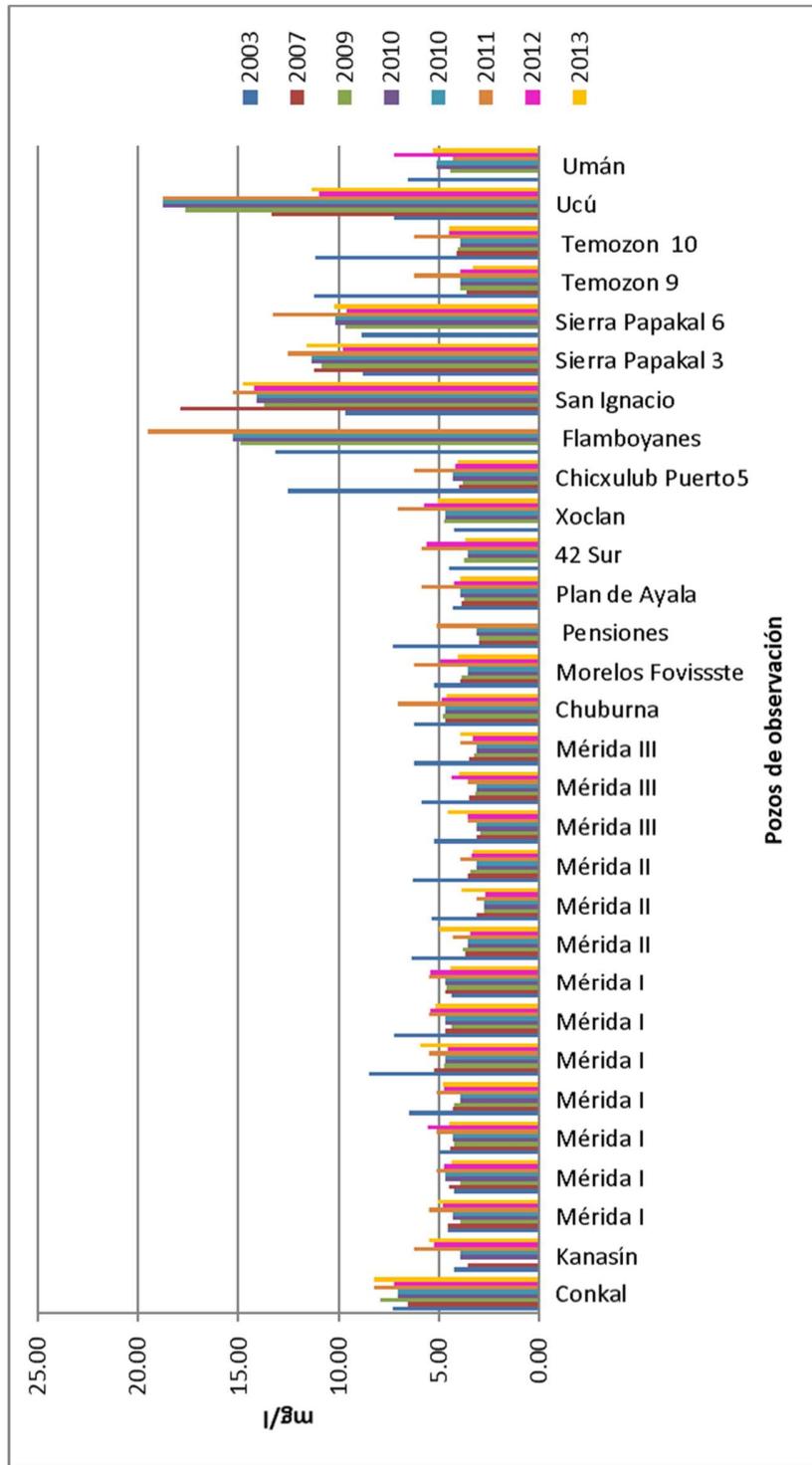


Figura 5. Concentraciones de potasio en la ZMM.

CALCIO

Las concentraciones del ion calcio para aguas subterráneas suele oscilar entre 10 y 250 mg/l, según se observa en la Tabla 6 el valor mínimo fue de 39.60 mientras que el valor máximo fue de 187.14 mg/l, por lo que las concentraciones están dentro de los parámetros usuales para aguas subterráneas; de las concentraciones máximas en cinco de los siete muestreos estas se registraron en San Ignacio (Progreso).

Tabla 6. Resumen estadístico de las concentraciones del ion calcio.

AÑO	MÍN	MÁX	MEDIA	DESVI. EST.
2003	60.80	134.64	116.93	16.22
2007	39.60	126.54	92.68	14.05
2009	110.54	152.73	120.48	8.78
2010	45.26	187.14	106.91	30.51
2010 1	98.12	170.54	126.97	16.18
2011	115.26	148.51	124.17	7.11
2012	107.39	173.97	126.47	13.53
2013	108.34	142.47	123.09	8.66

En la Figura 6 se observan las concentraciones del ion calcio, estas no fueron tan dispersas y las concentraciones más altas se encontraron en los pozos del municipio de Progreso (San Ignacio y Sierra Papakal).

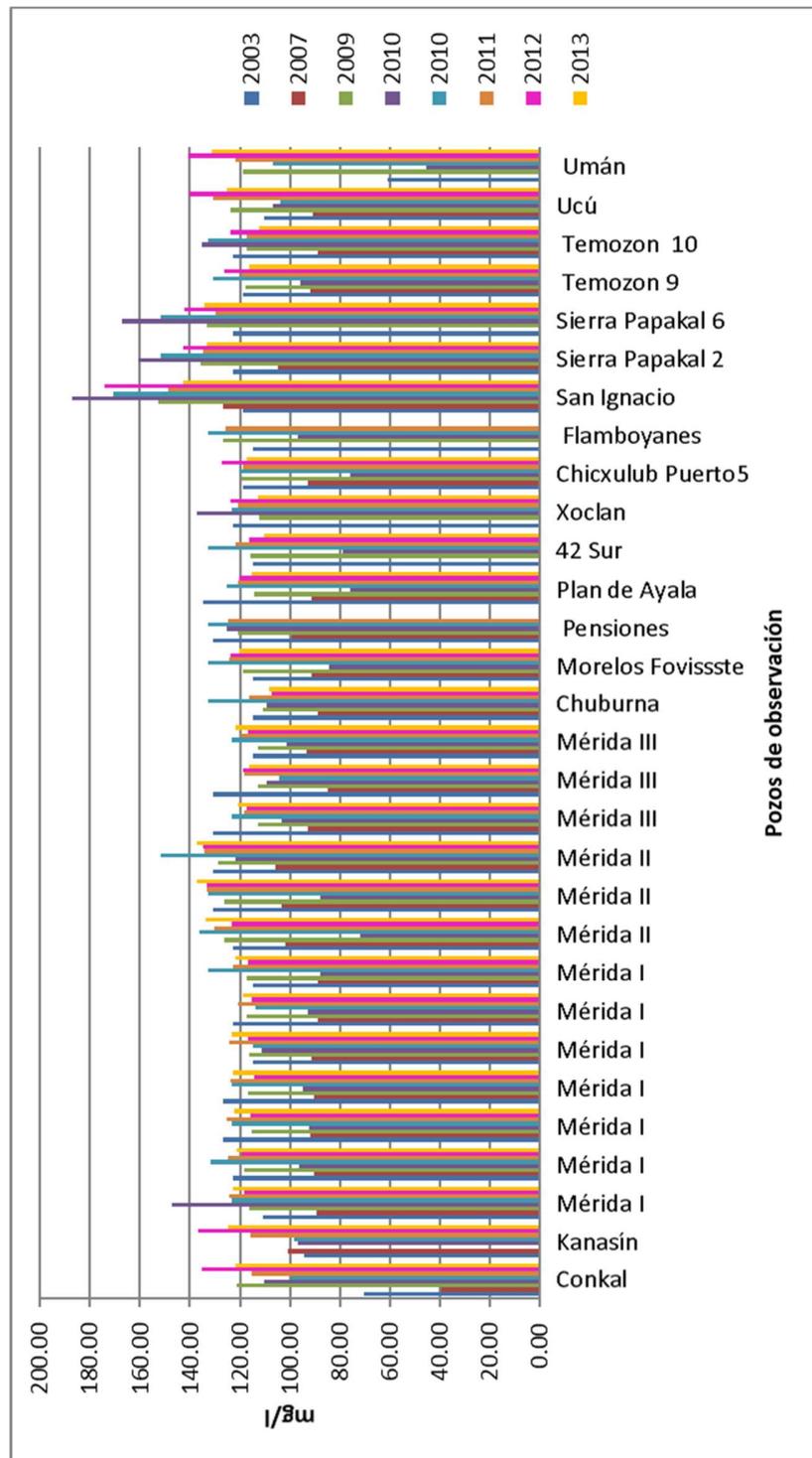


Figura 6. Concentraciones de calcio en la ZMM.

MAGNESIO

Las concentraciones de magnesio en aguas naturales suelen estar por debajo de 40 mg/l aunque no hay un límite legal establecido, las concentraciones observadas en la ZMM estuvieron por arriba de 40 mg/l en la planta Mérida I y en los municipios de Progreso y Ucú como se puede ver en la Tabla 7, se refiere que en medios calcáreos pocas veces se rebasan los 100 mg/l, ninguna de las concentraciones en la ZMM rebasó este valor como se puede ver en la figura 7.

Tabla 7. Resultado estadístico de las concentraciones del ion magnesio y comparación con la norma.

AÑO	MIN	MAX	MEDIA	DESV. EST.
2003	18.15	64.70	37.96	11.27
2007	13.25	43.55	29.40	15.00
2009	25.16	75.97	42.31	11.11
2010	2.14	48.46	26.78	13.99
2010	11.30	67.80	36.56	13.51
2011	16.77	63.67	35.59	10.39
2012	17.61	65.68	34.87	10.51

En la figura 7 se muestran las concentraciones de magnesio, los valores más altos se reportaron en los pozos de la planta Mérida I en el municipio de Mérida y en los pozos de San Ignacio y Sierra Papaka, estos en el municipio de Progreso.

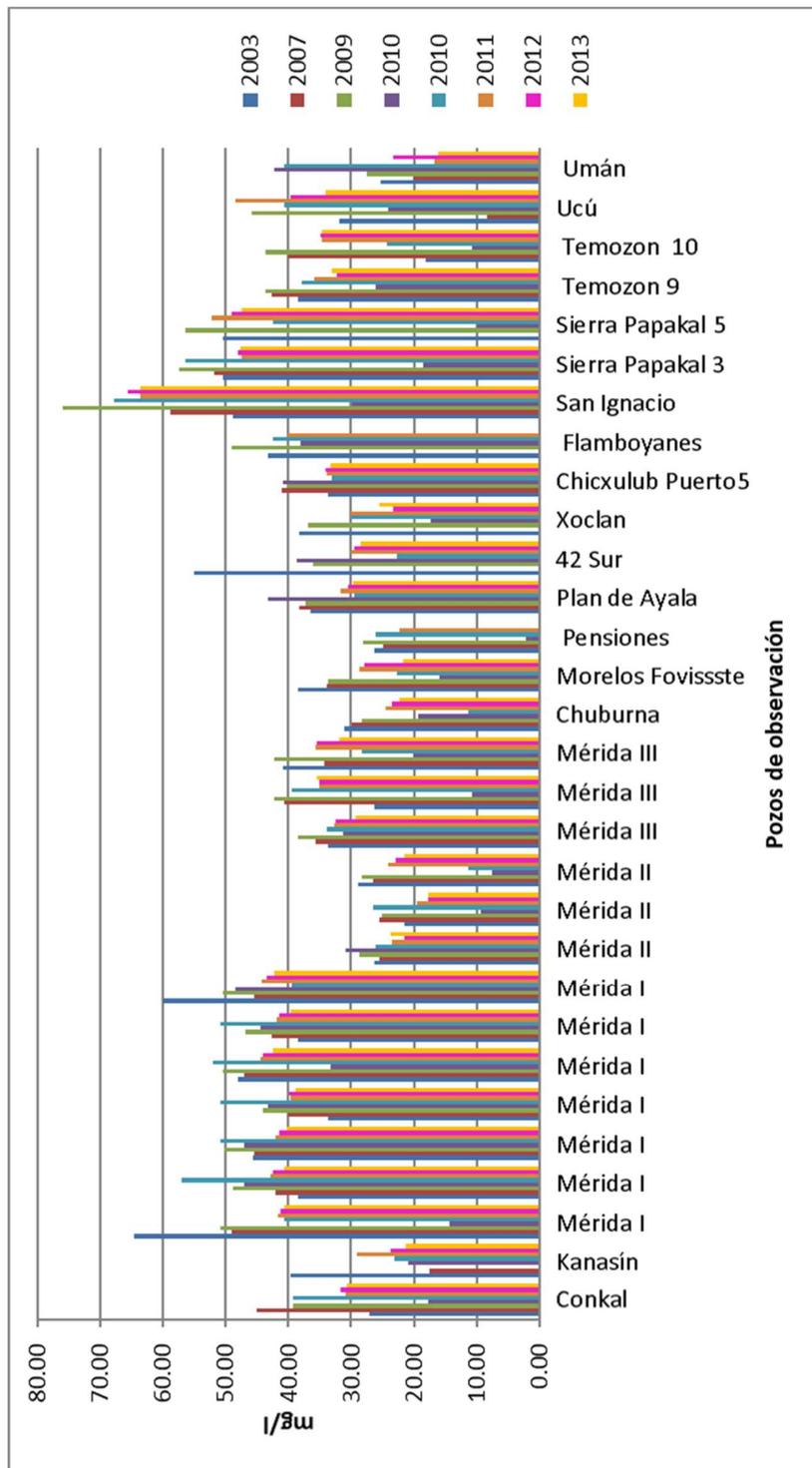


Figura 7. Concentraciones de magnesio total en la ZMM.

DUREZA

La dureza total en la ZMM presenta valores altos dado al medio cárstico donde esta se encuentra, previamente Pacheco *et al* (2004) y Alcaraz (2010) habían reportado valores superiores a los de la norma. Como se ve en la Tabla 8 en todos los muestreos se encontraron valores que superaron el valor establecido en la norma.

Tabla 8. Resumen estadístico de las concentraciones de dureza total en la ZMM.

	MÍN	MÁX	MEDIA	DESV. EST.
2003	255.70	543.46	448.54	62.79
2007	260.99	558.26	385.20	56.90
2009	393.01	694.47	475.31	59.97
2010	258.12	591.04	377.47	67.40
2010 1	340.31	705.36	467.86	71.82
2011	373.98	633.28	456.86	52.91
2012	365.47	705.21	459.66	63.67
2013	362.83	618.02	445.06	52.54

En Figura 8 se observan las concentraciones de dureza total en pozos de la ZMM, se aprecia que es común que se tengan valores arriba de 300 mg/l; de forma aislada se observan valores arriba del límite permisible en pozos de Mérida y Ucú, pero en casi todos los muestreos los pozos de San Ignacio y Sierra Papakal, que pertenecen al municipio de Progreso se observaron valores arriba del límite permisible.

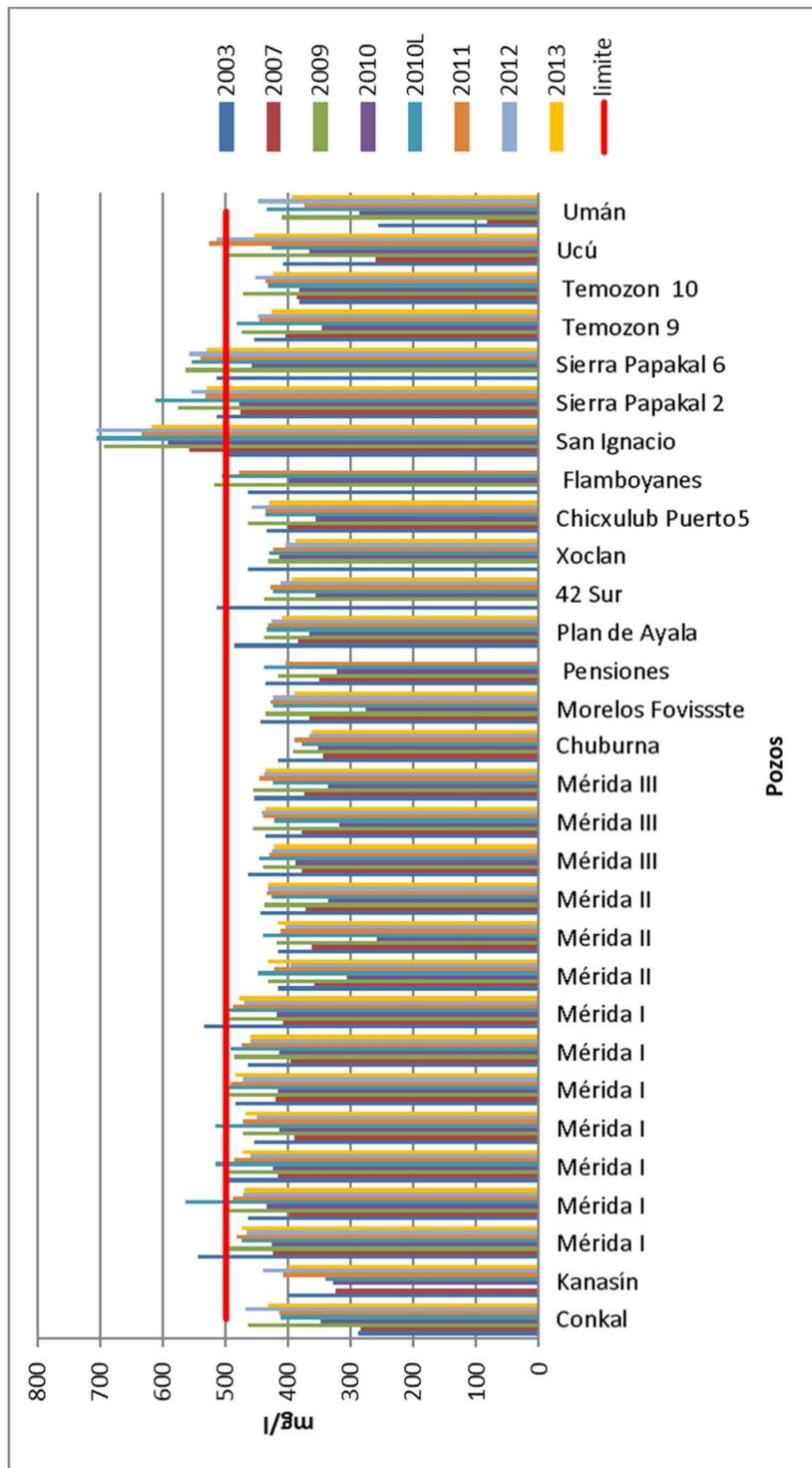


Figura 8. Concentraciones de dureza total en la ZMM.

5.2 Aniones

CLORUROS

Las concentraciones según se aprecian en la Tabla 9 de este ion varían desde 41.49 mg/l hasta por encima de 700 mg/l. En casi todos los muestreos se observaron valores por arriba del límite establecido en la norma; las máximas concentraciones se reportaron en San Ignacio, municipio de Progreso; por otra parte en promedio la ZMM aún se mantiene por debajo del límite permisible, aunque dentro del período estudiado se observan incrementos en algunos pozos.

Tabla 9. Resultado estadístico de las concentraciones del ion cloruro en la ZMM.

AÑO	MÍN	MÁX	MEDIA	DESV. EST.
2003	68.97	419.73	198.26	62.71
2007	41.49	223.34	149.82	54.29
2009	120.98	764.98	233.35	142.77
2010	128.69	552.21	229.50	100.04
2010 1	133.29	738.42	233.02	128,97
2011	120.88	755.09	233.66	141.92
2012	117.66	725.48	227.02	137.70
2013	120.94	721.72	221.76	126.72

En la Figura 9 se pueden observar las concentraciones del ion cloruro en la ZMM donde destacan pozos de la planta Mérida I, en el municipio de Mérida con valores superiores al límite permisible entre los años 2003 y 2013 pero de igual forma superiores a los 200 mg/l en todos los muestreos; en pozos del municipio de Progreso (Sierra Papakal y San Ignacio) y Ucú se observaron valores superiores al permisible en todo el periodo.

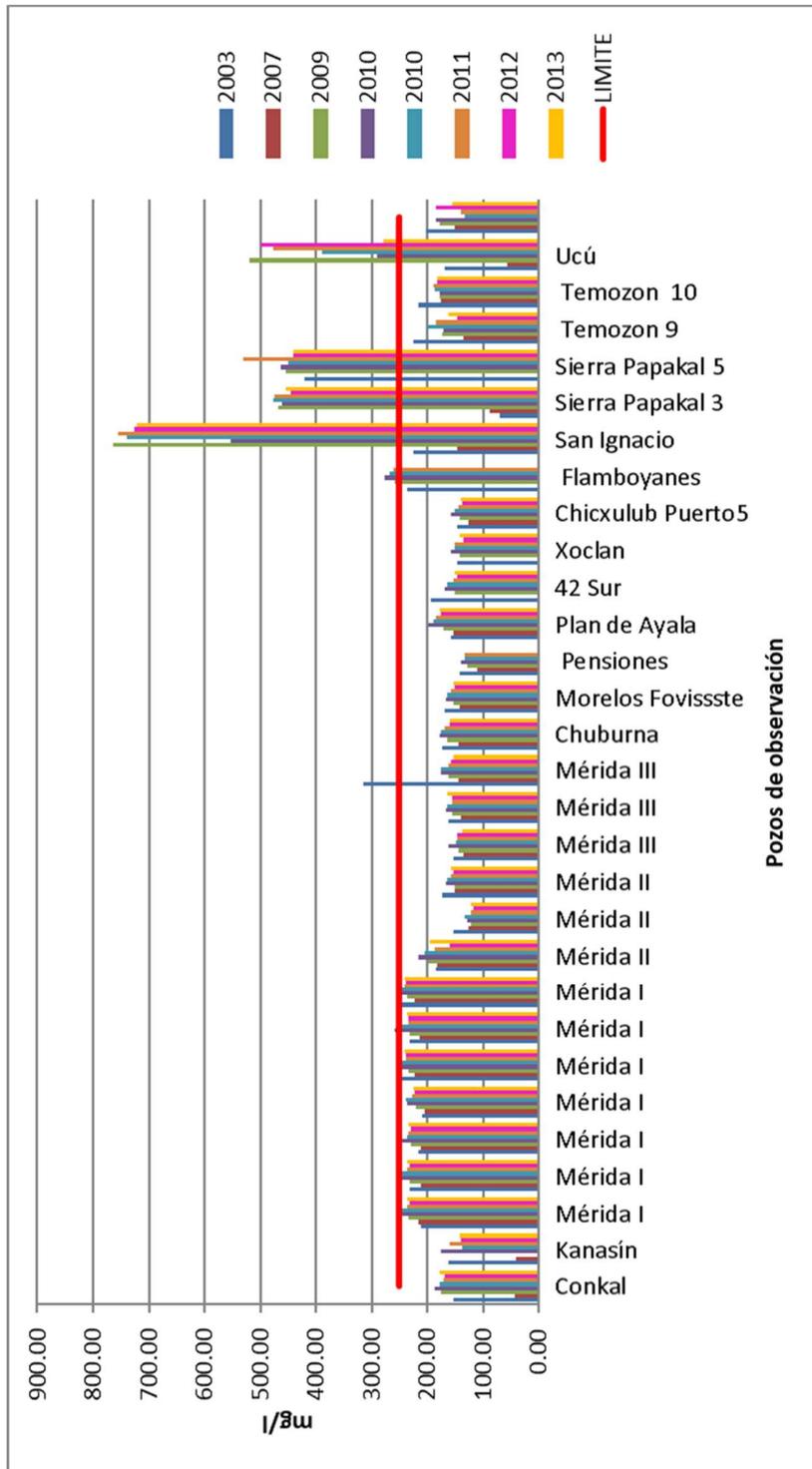


Figura 9. Concentraciones de cloruros en la ZMM.

BICARBONATOS

Este ion suele tener concentraciones entre 50 y 400 mg/l en aguas subterráneas; como se aprecia en la Tabla 10 se observan concentraciones en general altas en toda la ZMM variando entre 202.83 y 520.51 mg/l; en promedio se superaron los 400 mg/l en la mayor parte de los muestreos, aunque no hay un límite establecido por la norma.

Tabla 10. Resumen estadístico de las concentraciones del ion bicarbonato.

AÑO	MÍN	MÁX	MEDIA	DESV. EST.
2003	323.30	500.54	445.46	41.30
2007	363.46	463.60	433.87	24.70
2009	357.41	468.08	418.86	26.02
2010	202.83	520.51	419.59	65.90
2010 1	331.34	428.97	394.86	23.32
2011	361.85	461.92	421.44	25.51
2012	364.16	458.14	428.50	22.40
2013	360.02	449.72	419.78	22.11

En la Figura 10 se puede observar que las concentraciones del ion bicarbonato no muestran una tendencia o bien que en algún punto específico destaque por sus altas concentraciones.

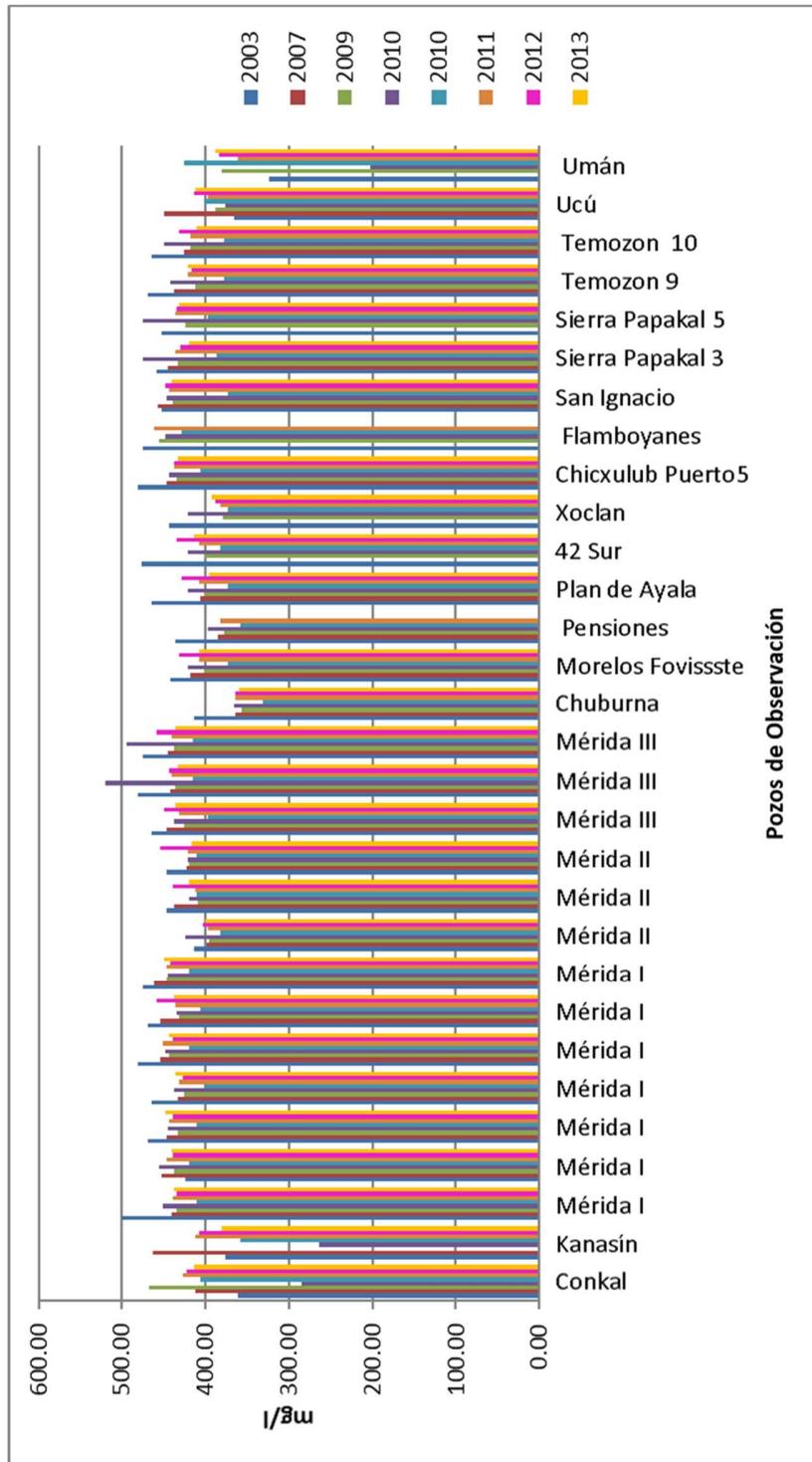


Figura 10. Concentraciones de bicarbonatos en la ZMM.

SULFATOS

Según el resumen de la Tabla 11 las concentraciones de este ion en promedio se mantienen muy abajo del límite permisible que es de 50 mg/l, las máximas concentraciones se reportaron en Sierra Papakal y San Ignacio en el municipio de Progreso

Tabla 11. Resumen estadístico de sulfatos en la ZMM.

	MÍN	MÁX.	MEDIA	DESV. EST.
2003	15.89	403.99	38.57	69.54
2007	23.62	103.20	39.99	16.58
2009	7.57	101.37	28.27	22.64
2010	6.73	204.65	31.55	38.74
2010 1	23.06	124.90	59.62	21.43
2011	16.33	129.71	35.65	23.02
2012	22.29	138.74	40.92	25.02
2013	18.96	93.31	35.47	15.99

En la Figura 11 se observan que las concentraciones se mantienen por debajo de 50 mg/l en la mayoría de los pozos de la ZMM; los pozos ubicados en el municipio de Progreso (Sierra Papakal y San Ignacio) muestran las mayores concentraciones, pero todas se mantienen por debajo del límite permisible.

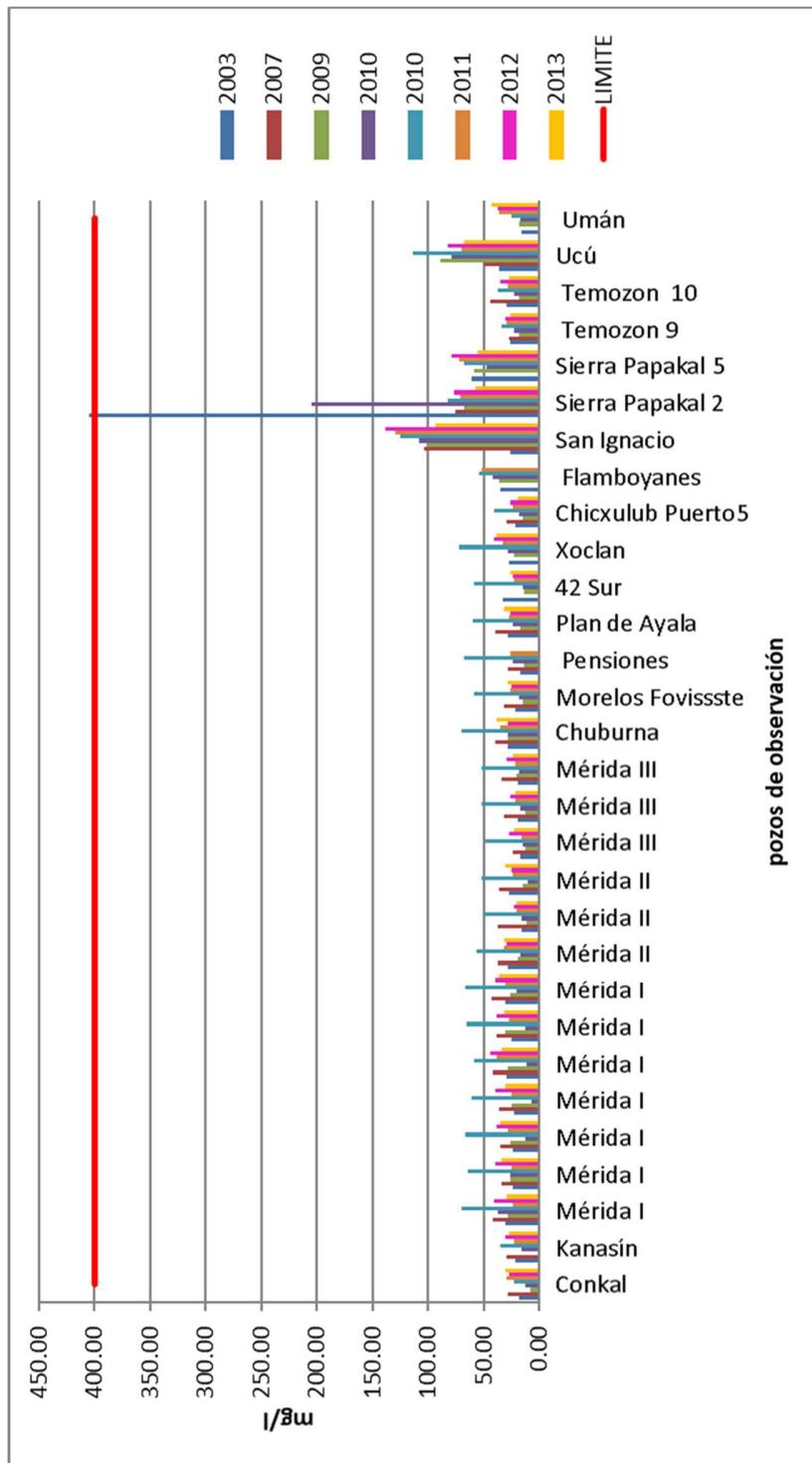


Figura 11. Concentraciones de sulfatos en la ZMM.

NITRATOS.

Este ion es altamente asociado con la contaminación por aguas residuales entre otros orígenes, según el resumen en la Tabla 12 las concentraciones en promedio en la ZMM se mantienen por debajo del límite permisible.

Tabla 12. Resumen estadístico de las concentraciones del ion nitrato.

	MIN	MAX	MEDIA	DESV. EST.
2003	9.98	39.44	18.67	6.65
2007	16.13	50.38	24.14	9.67
2009	11.27	54.86	21.64	9.41
2010	10.54	38.44	21.60	7.19
2010 1	11.16	83.08	27.52	17.47
2011	13.02	72.54	27.19	14.10
2012	15.75	61.94	25.10	11.66
2013	15.64	60.05	25.65	10.67

En la Figura 12 se puede ver que con excepción de Conkal y Progreso hay reportes de pozos que superan el límite permisible, en el caso de Mérida algunos pozos intraurbanos superan dicho valor como lo son los de Xoclán y Pensiones.

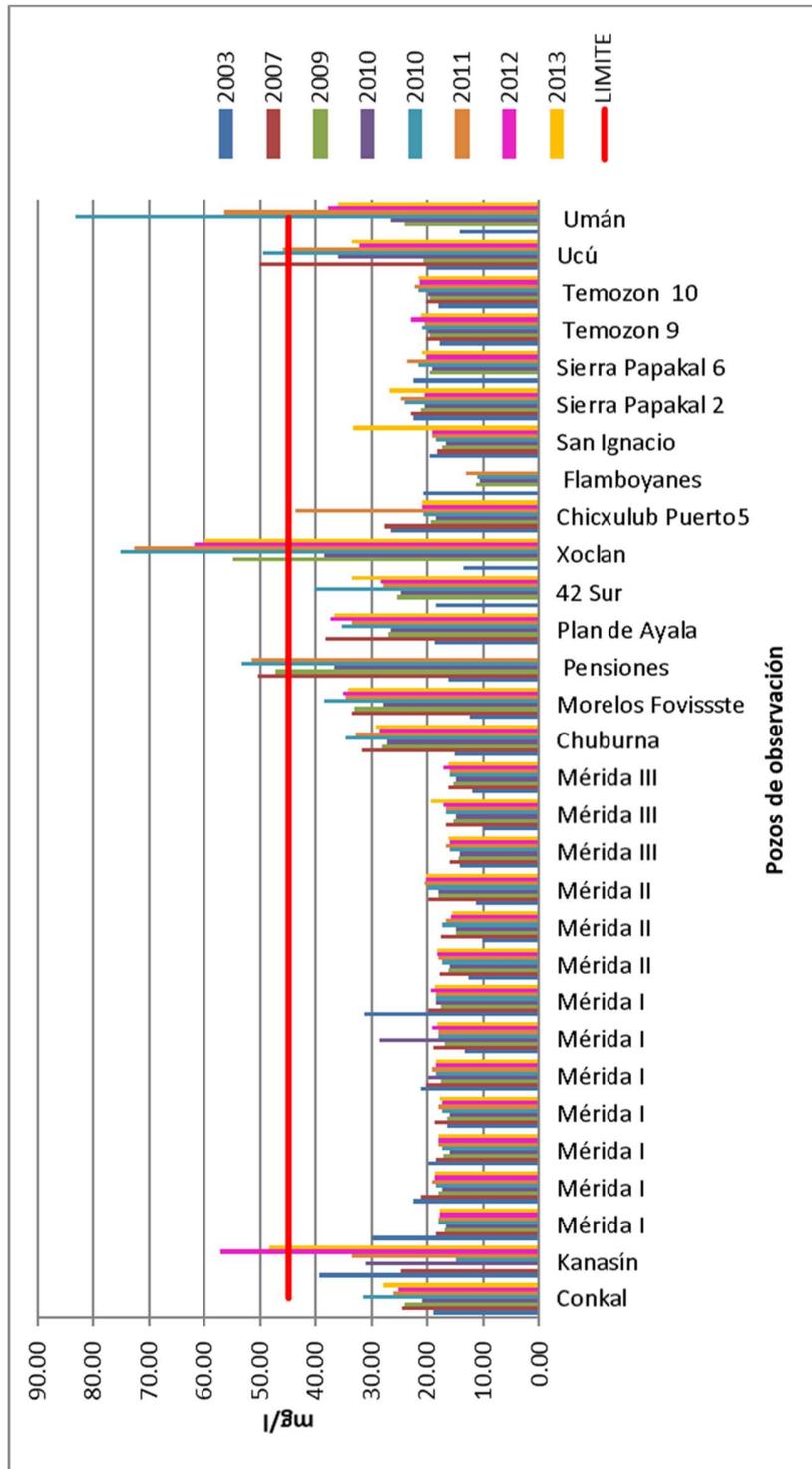
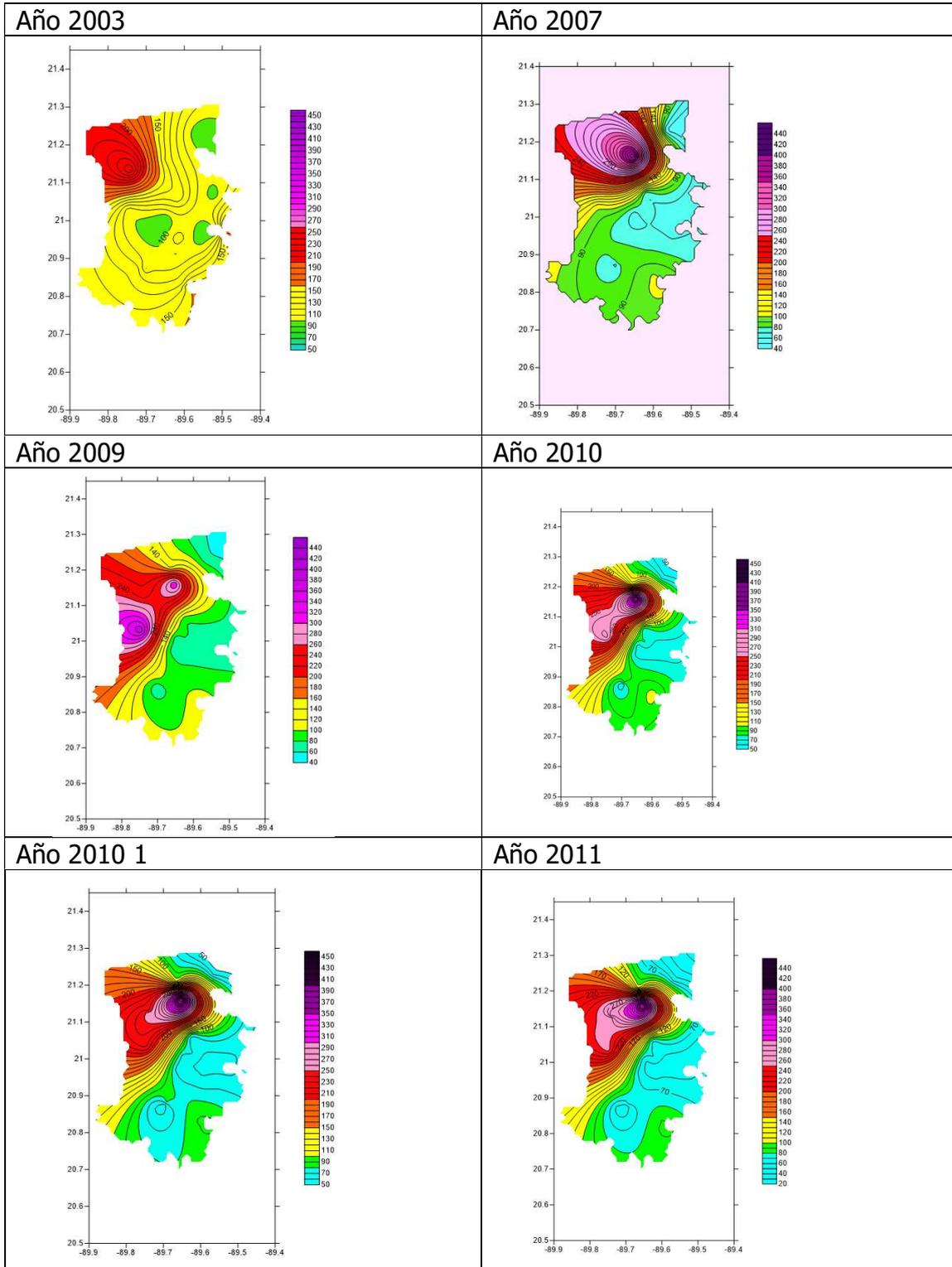


Figura 12. Concentraciones de nitratos en la ZMM.

En cuanto a los valores en promedio de los iones se puede destacar que todos estos se mantienen debajo de los límites contenidos en la NOM-127-SSA1-1994; sin embargo, en prácticamente todos los muestreos se obtuvieron valores que superaron los límites permisibles, excepto en los sulfatos, se observa que los puntos de observación ubicados en San Ignacio, Sierra Papakal, Flamboyanes (municipio de Progreso) y Ucú presentaron los valores más altos en cada muestreo y por arriba de los límites permisibles.

5.3 Distribución espacial de los solutos SODIO



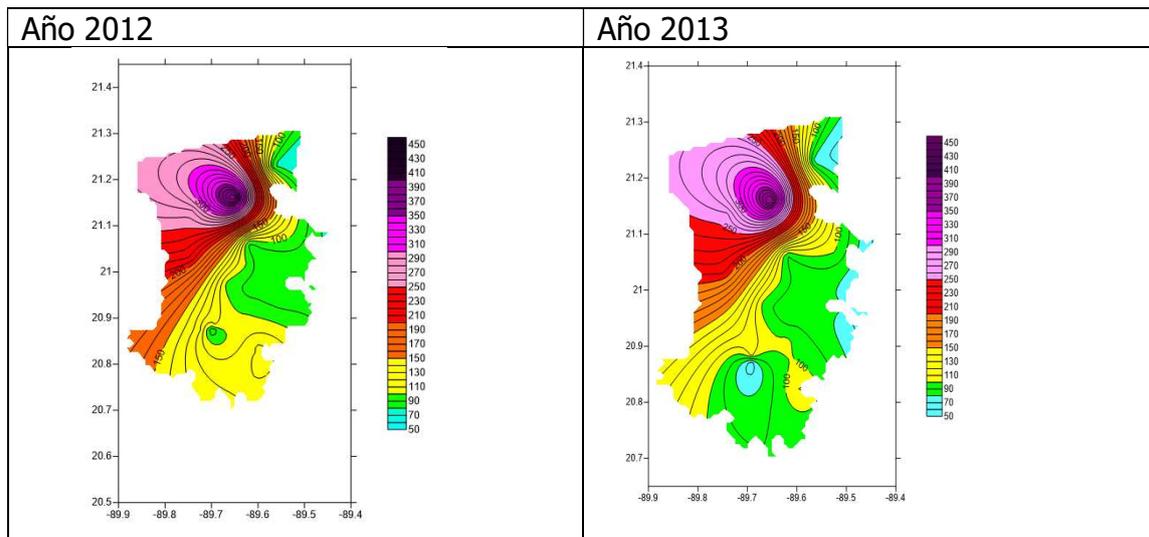
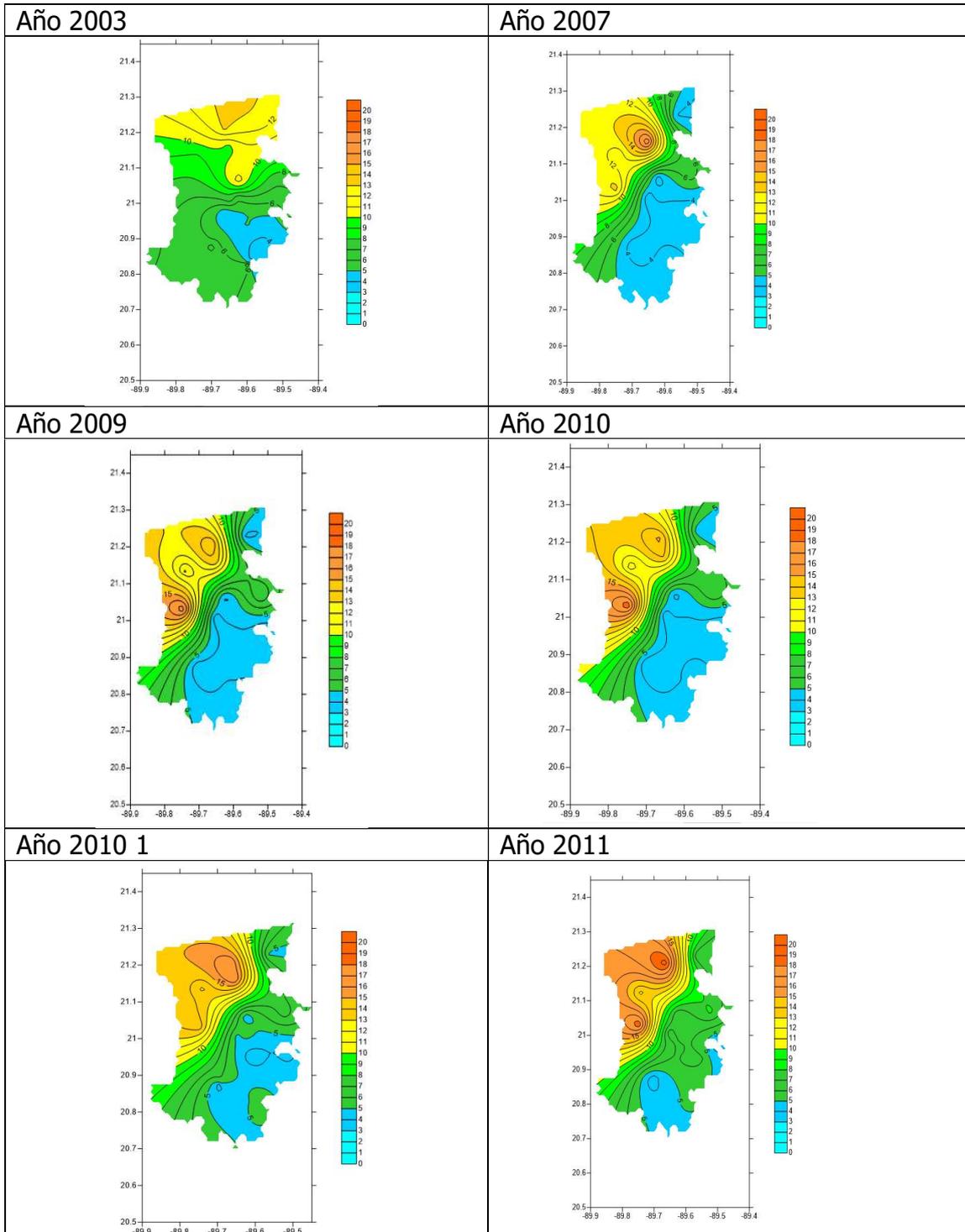


Figura 13. Distribución espacial del ion sodio en la ZMM.

Como se aprecia en la Figura 13 se encontraron valores por arriba del límite permisible establecido en la norma hacia la zona norte y noroeste de la zona metropolitana.

POTASIO



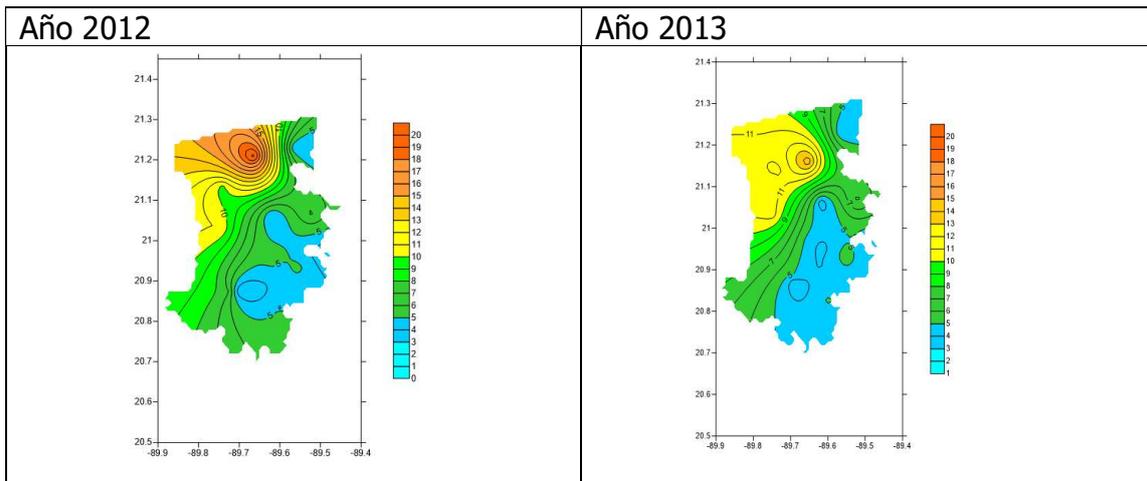
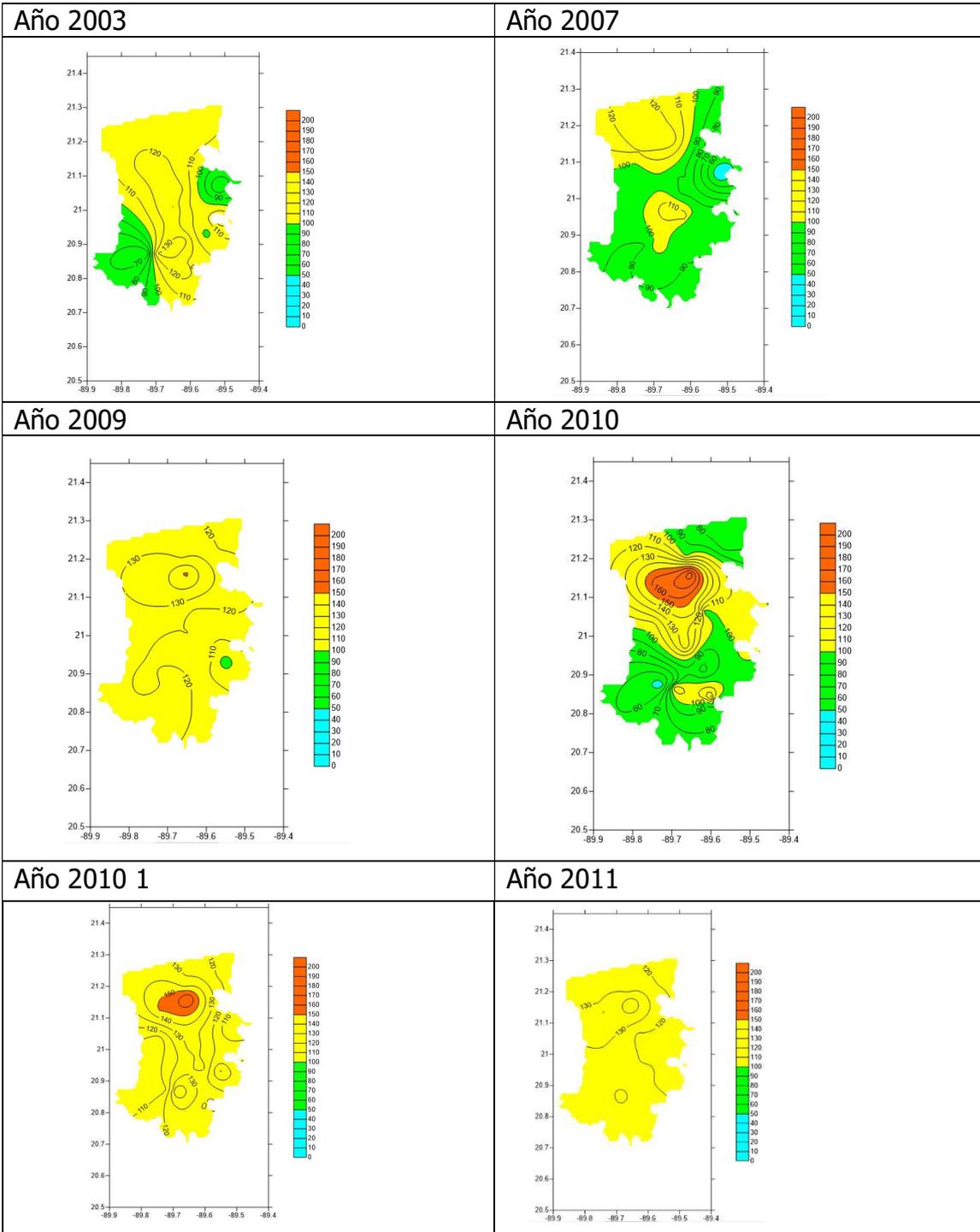


Figura 14. Distribución espacial del ion potasio en la ZMM.

El potasio no tiene valores máximos permisibles en la norma mexicana, no obstante, como se mencionó previamente valores por arriba de 10 mg/l pueden ser considerados altos para las aguas naturales; de nueva cuenta las zonas norte y noroeste muestran los valores más altos.

CALCIO



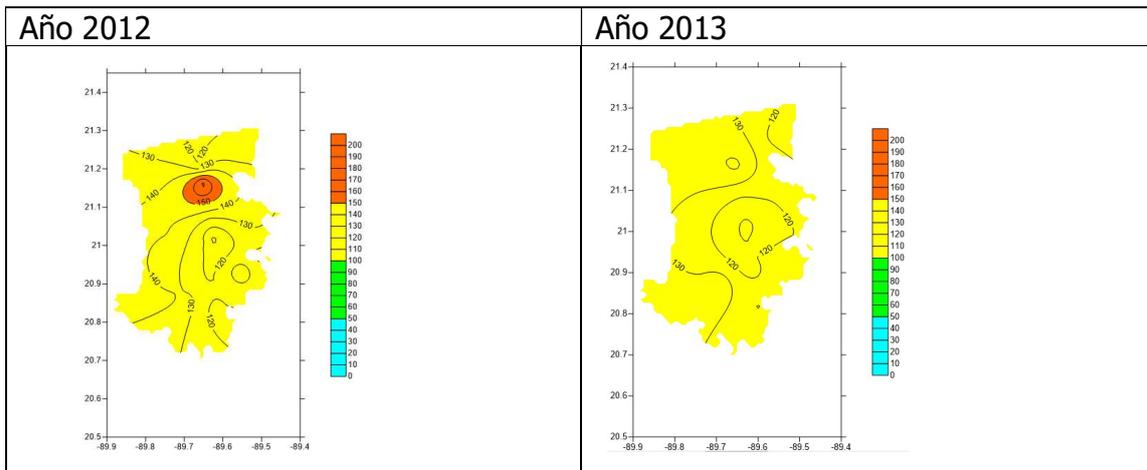
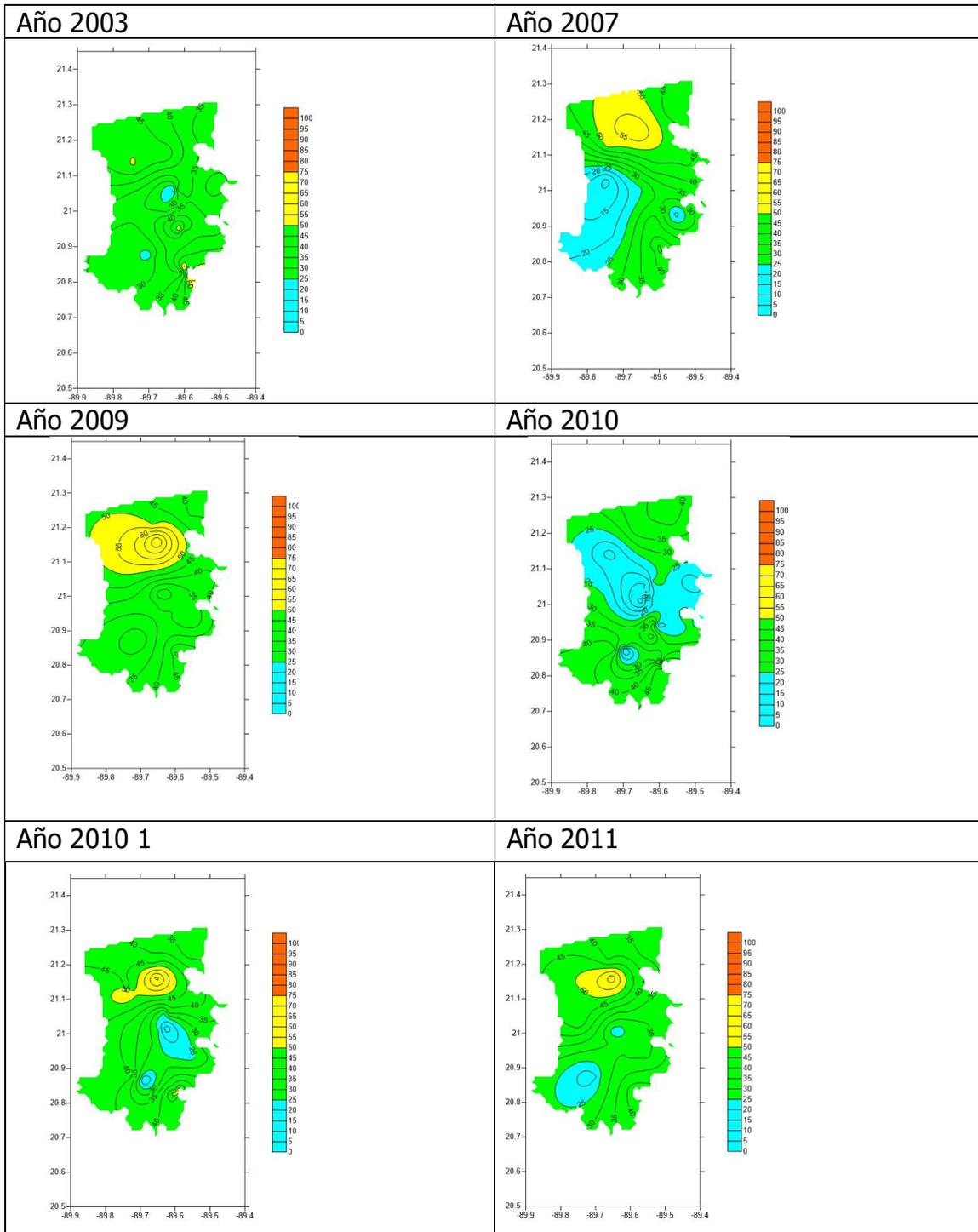


Figura 15. Distribución espacial del ion calcio en la ZMM.

En las gráficas correspondientes al calcio se aprecia que sus concentraciones en la ZMM mostraron una disminución en sus concentraciones en los años 2007 y 2010 pero en los posteriores muestreos se reportaron concentraciones superiores a los 100 mg/l.

MAGNESIO



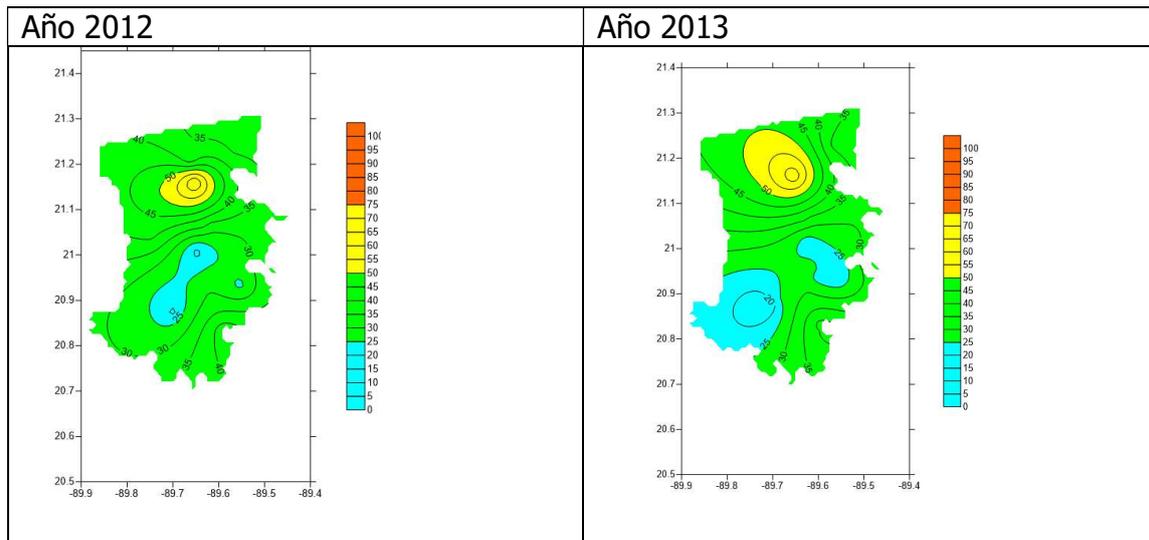
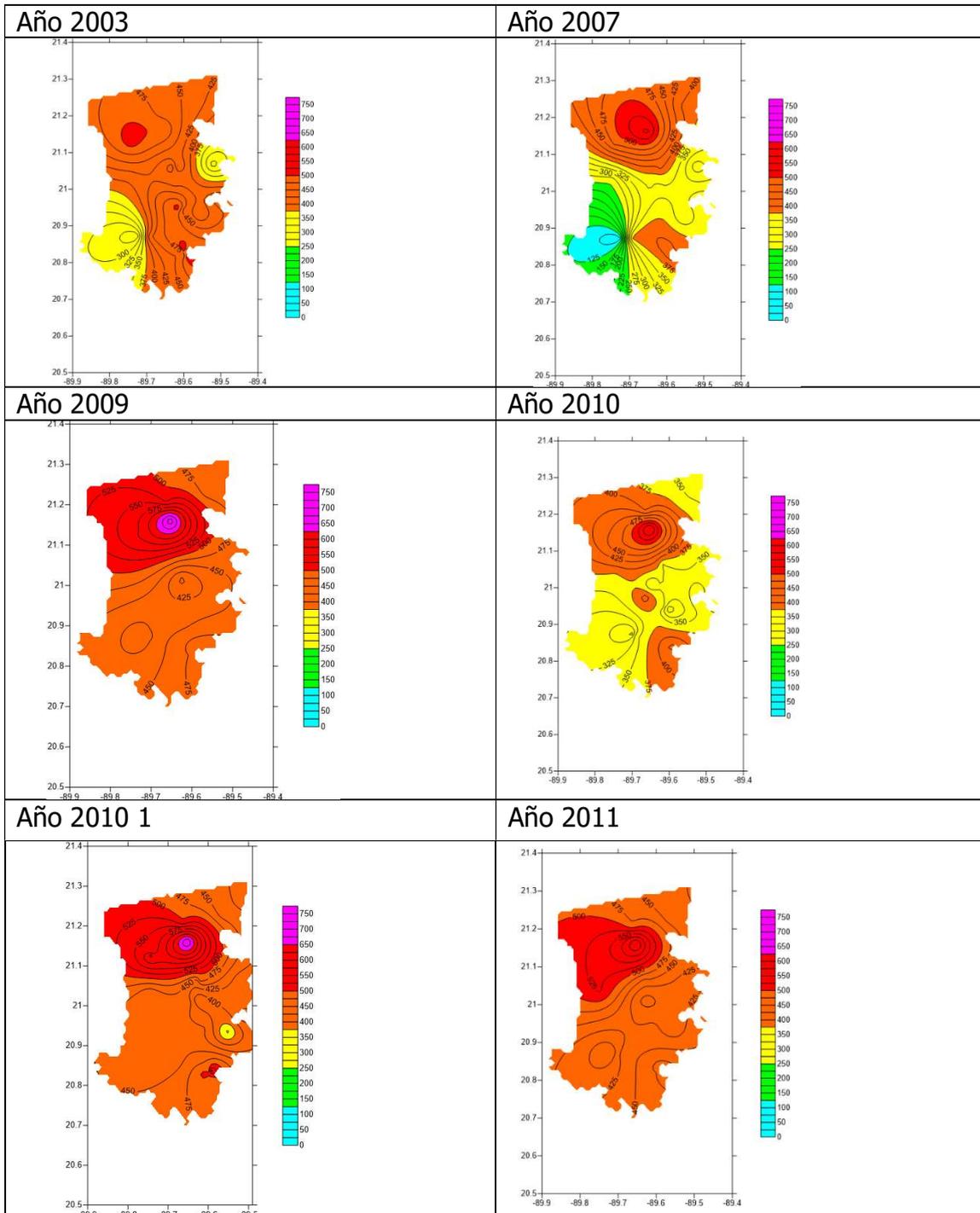


Figura 16. Distribución espacial del ion magnesio en la ZMM.

En la Figura 16 se aprecia en los colores amarillos las concentraciones más elevadas, estas corresponden al municipio de Progreso.

DUREZA



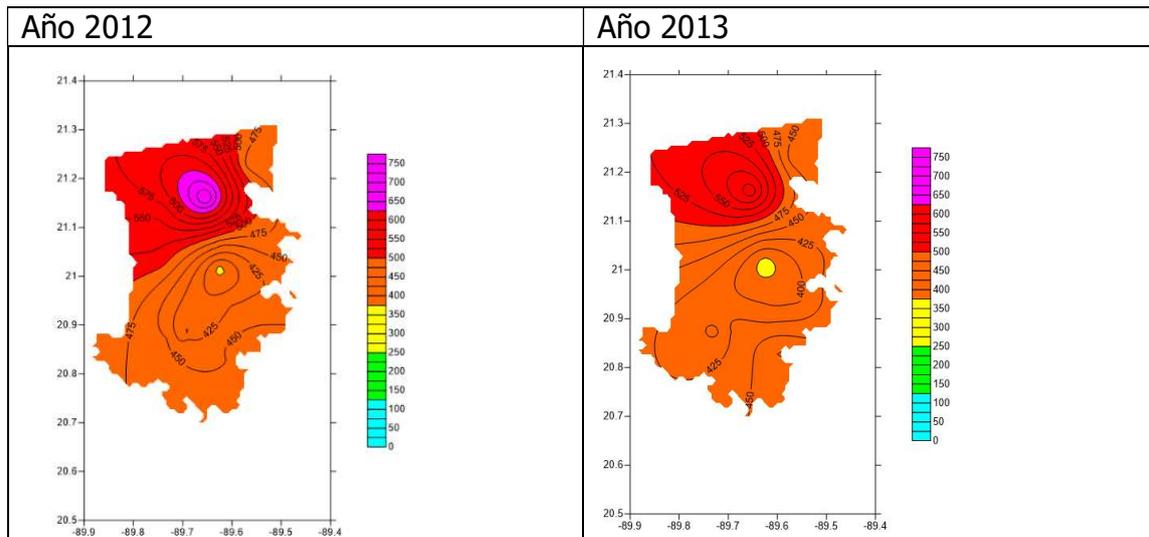
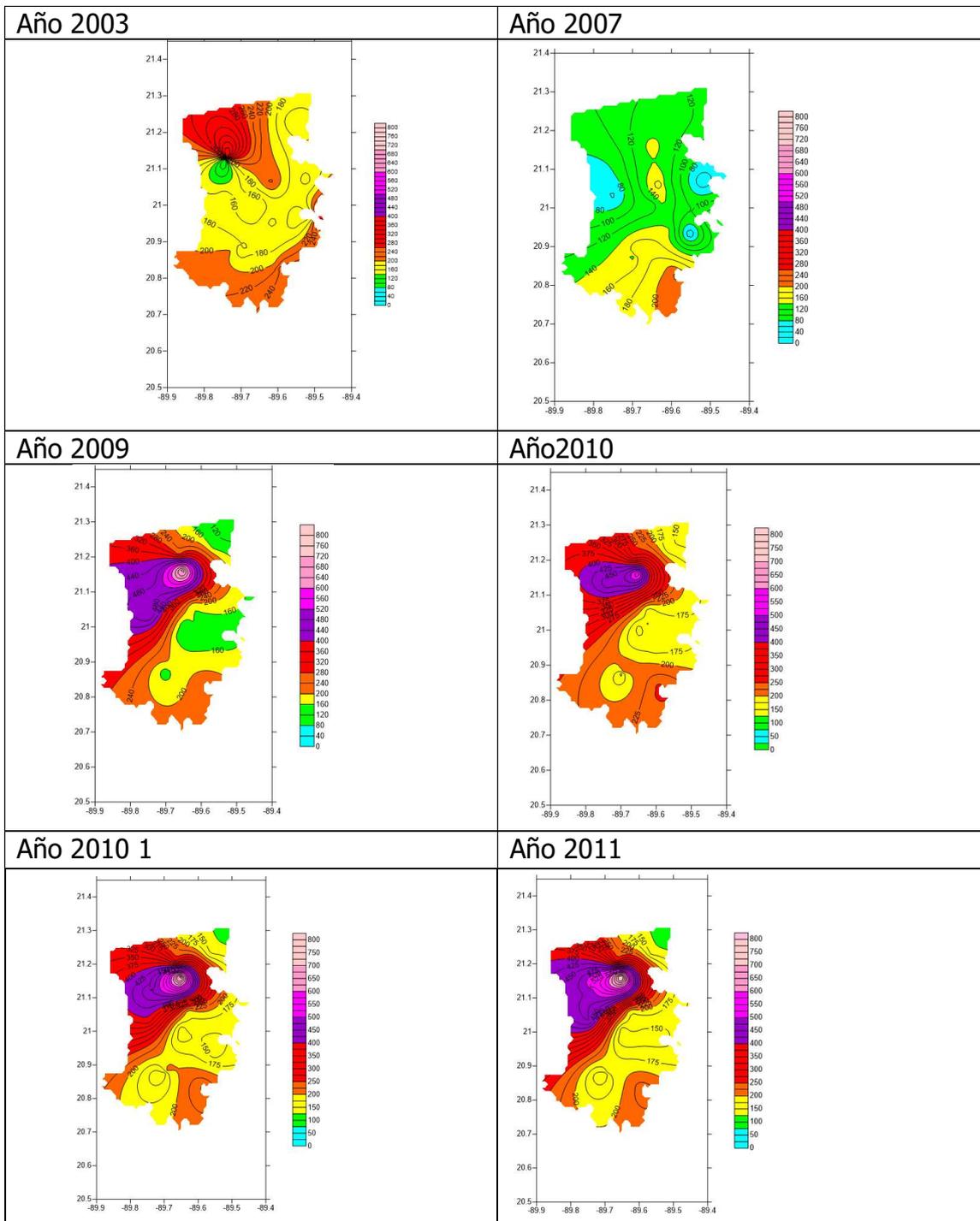


Figura 17. Distribución espacial de la dureza total en la ZMM.

Nuevamente las zonas norte y noroeste de la ZMM mantienen valores por arriba del límite permisible.

CLOURUROS



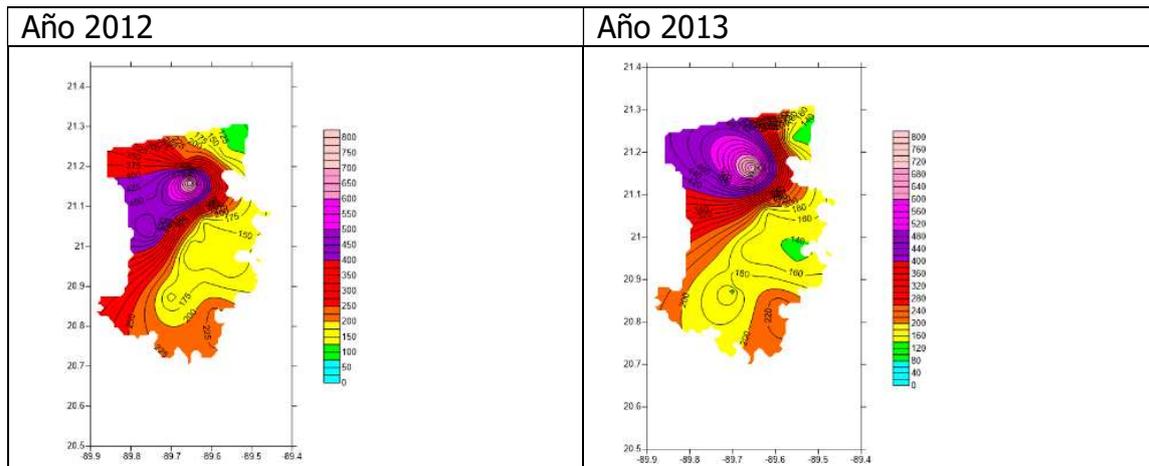
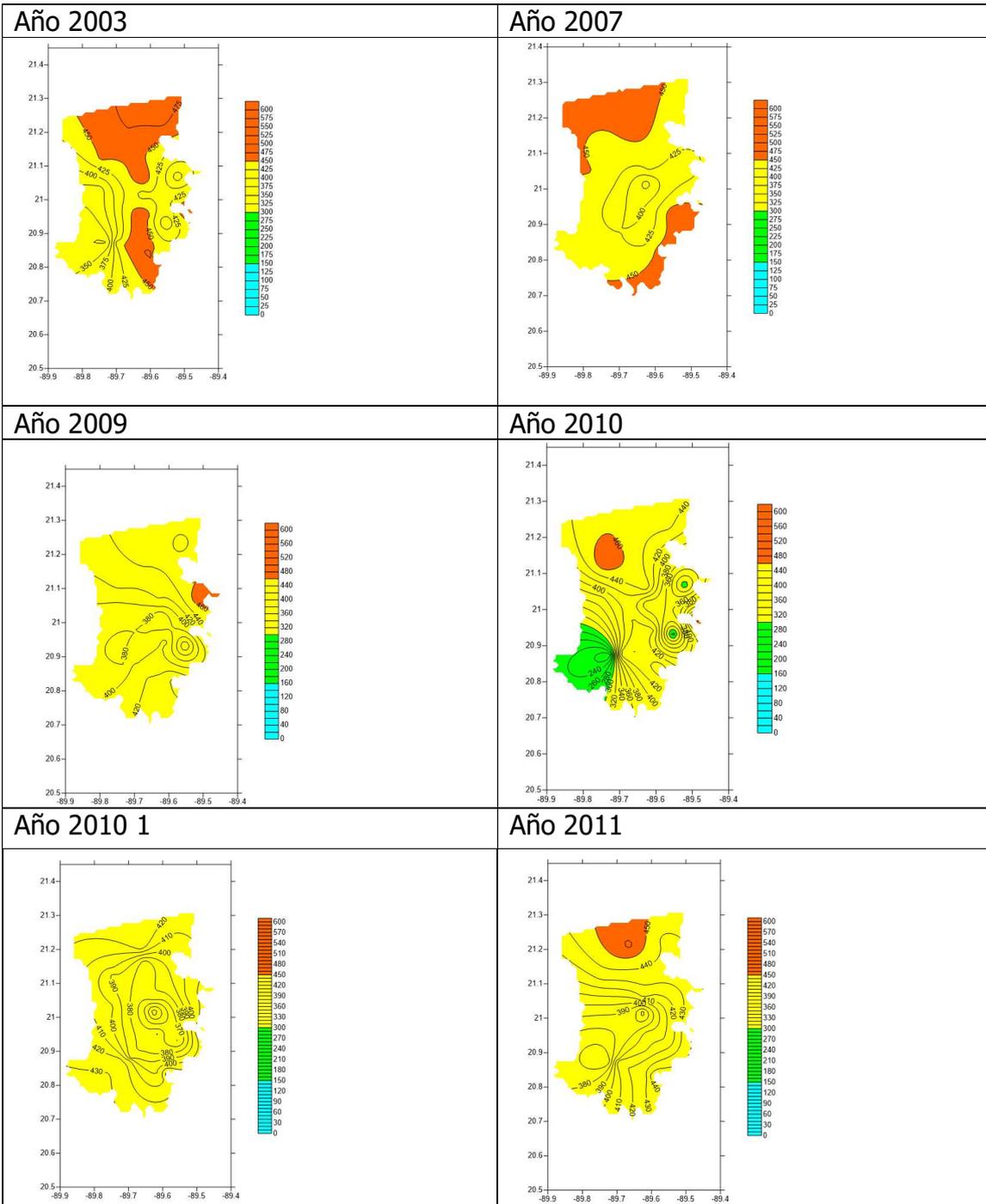


Figura 18. Distribución espacial del ion cloruro en la ZMM.

Los cloruros mostraron concentraciones arriba de los límites permisibles al norte de la ZMM.

BICARBONATO



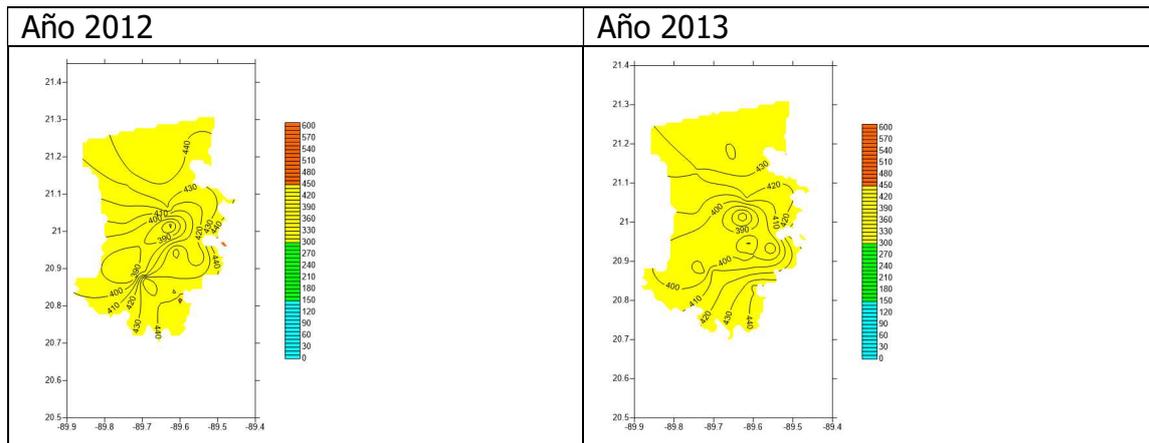
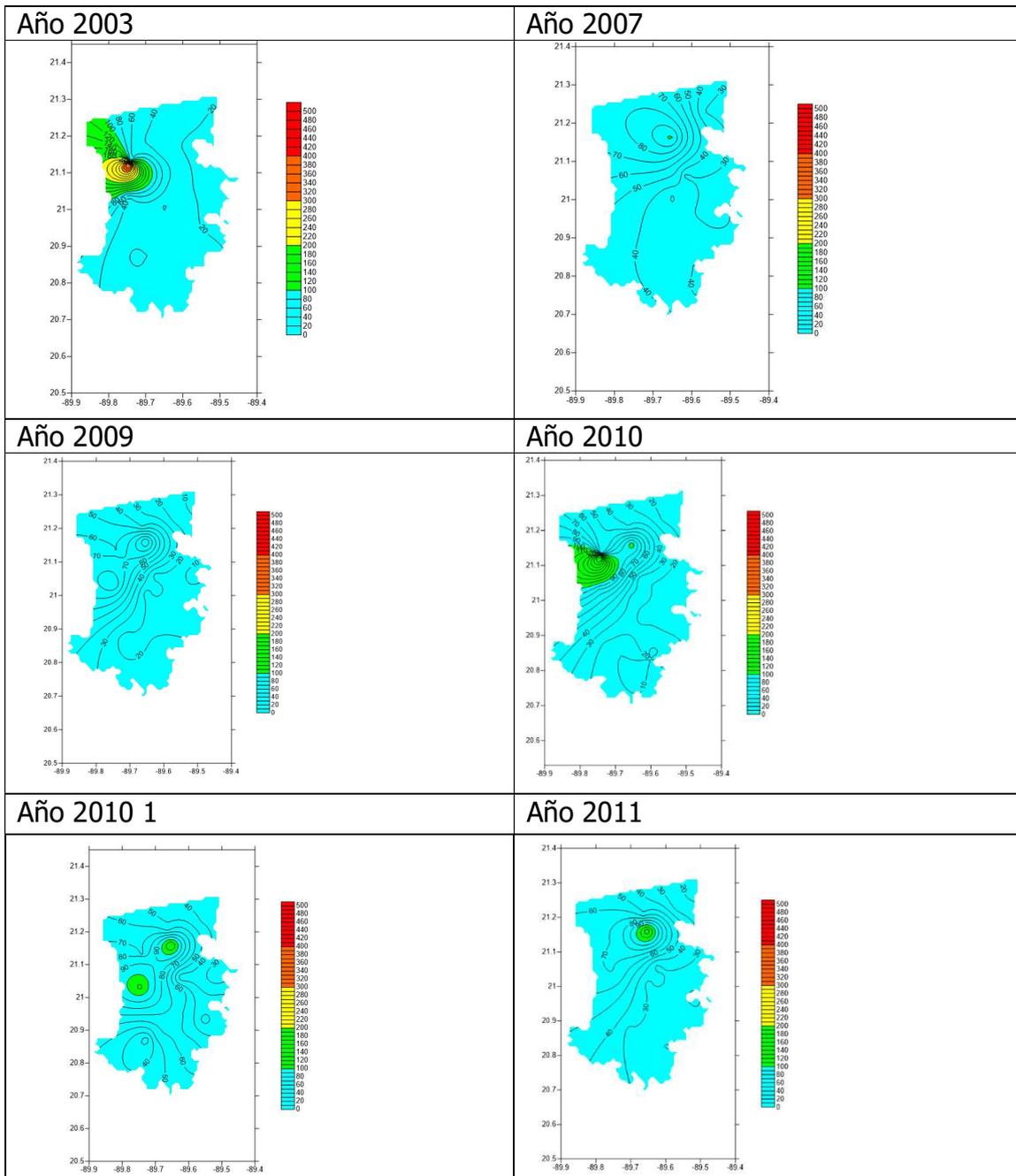


Figura 19. Distribución espacial del ion bicarbonato en la ZMM.

Los bicarbonatos reportaron valores con pocos cambios y en los muestreos correspondientes a los años 2012 y 2013 tuvieron poca dispersión.

SULFATOS



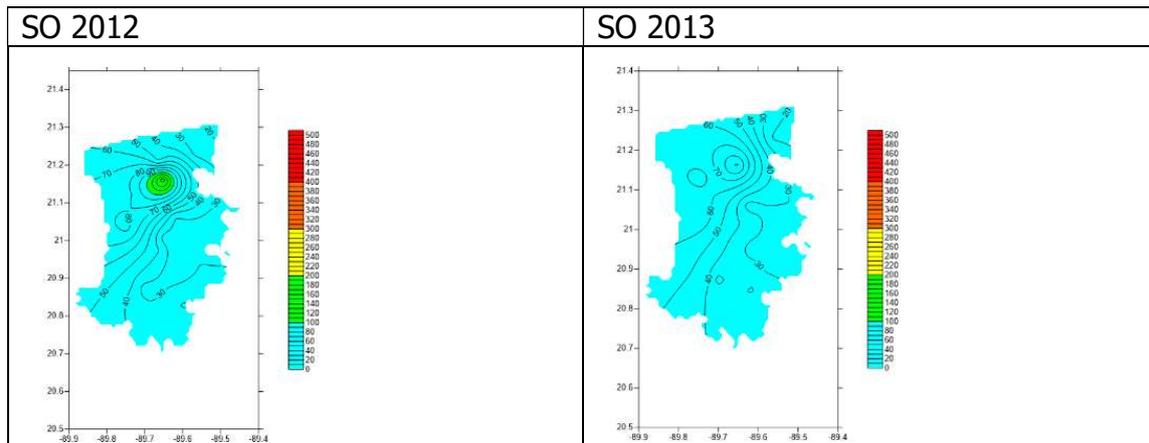
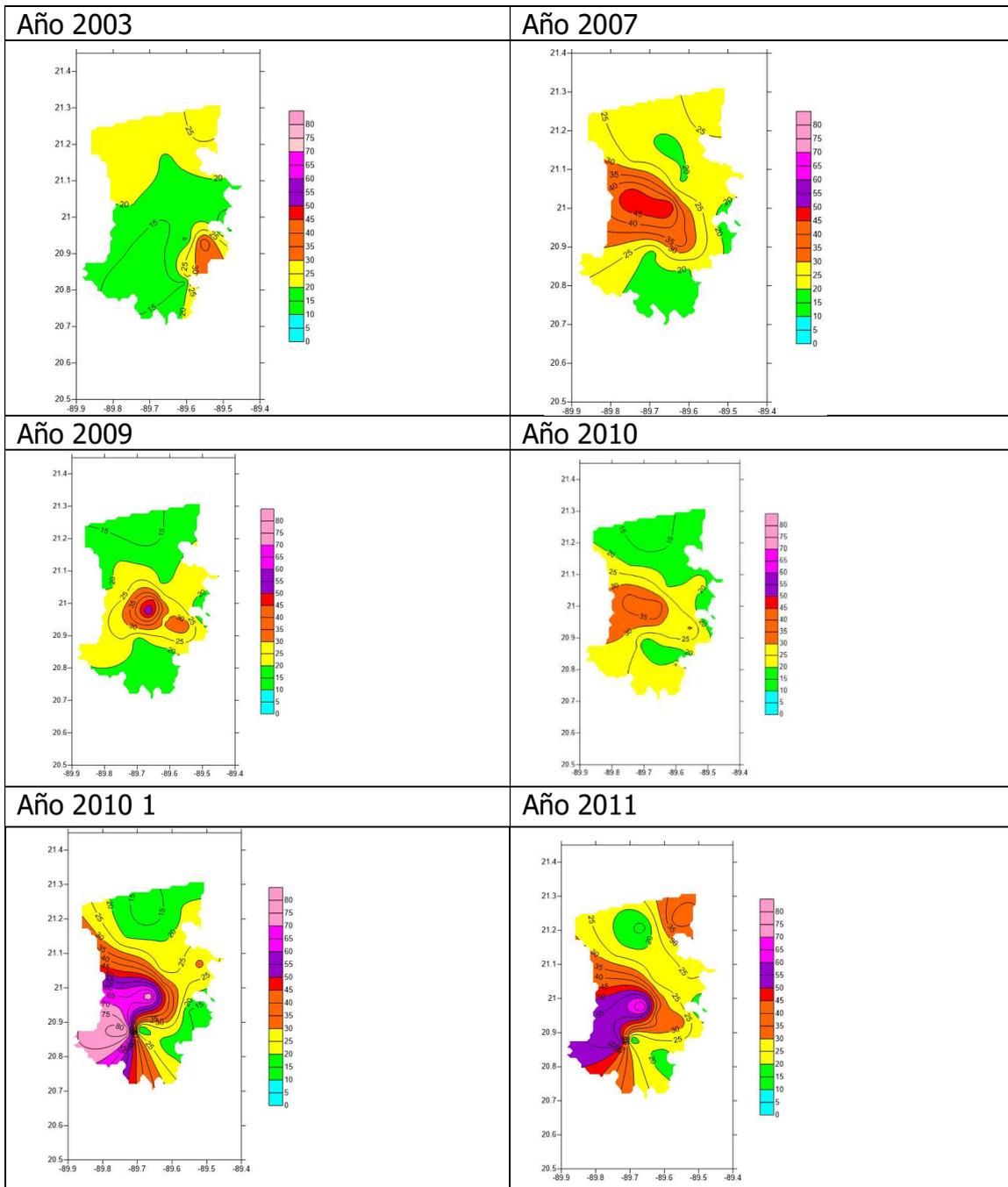


Figura 20. Distribución espacial del ion sulfato en la ZMM.

Las concentraciones de los sulfatos se mantuvieron en la mayor parte de la ZMM por debajo de los 100 mg/l aunque hubo algunos valores superiores pero muy por debajo del límite permisible que es de 400 mg/l.

NITRATOS



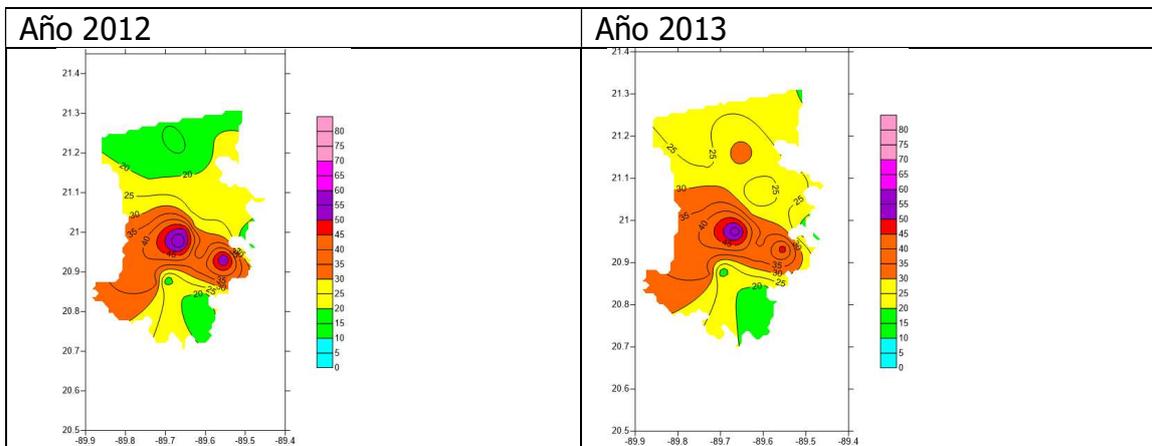
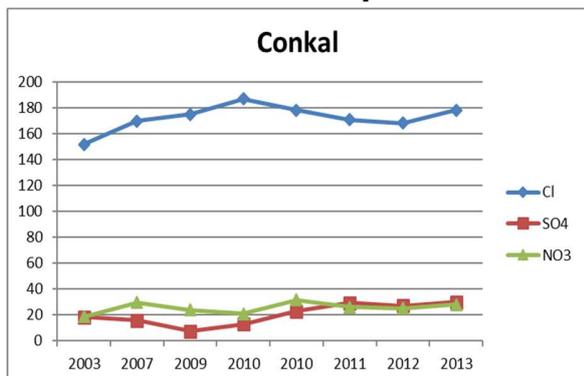


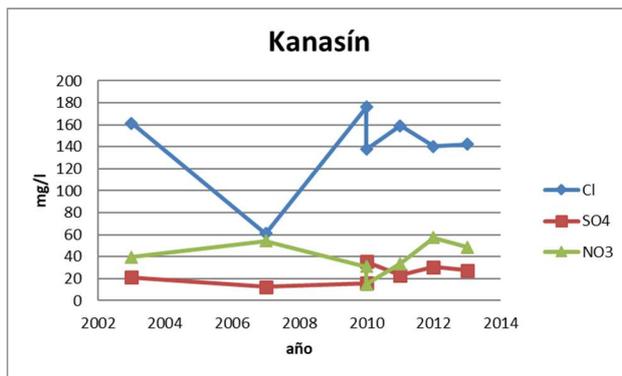
Figura 21. Distribución espacial del ion nitrato en la ZMM.

Los nitratos mostraron una concentración por arriba de los límites permisibles en pozos intraurbanos en la ciudad de Mérida principalmente, en Umán y Kanasin.

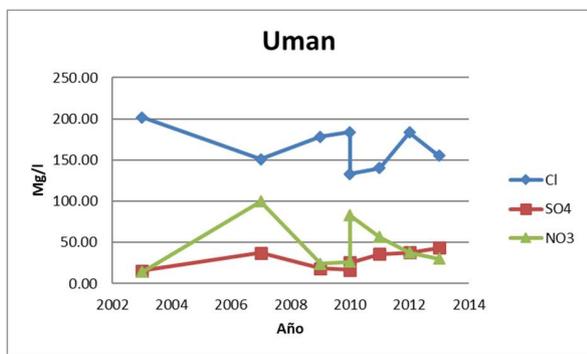
5.4 Evolución temporal



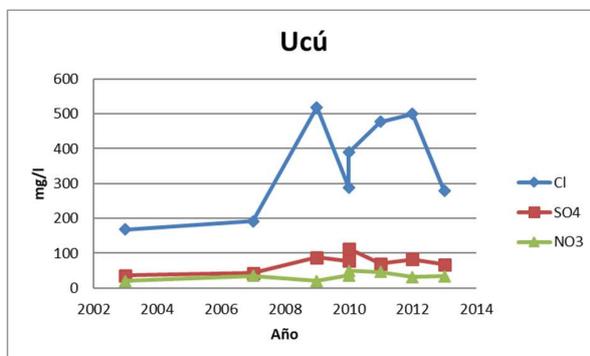
(a)



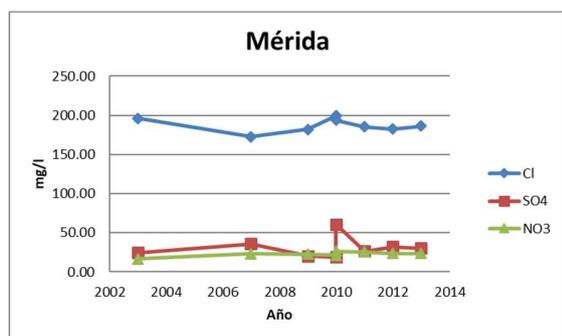
(b)



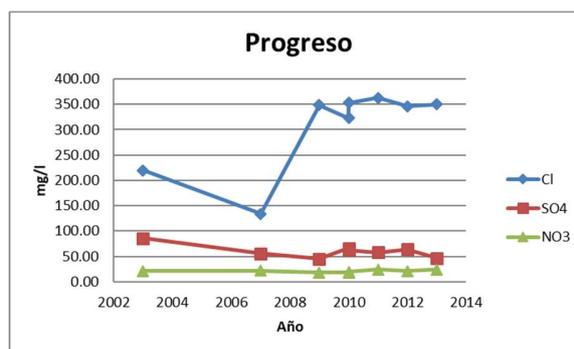
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 22. Evolución temporal de Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} en (a) Conkal, (b) Kanasín, (c) Umán (d) Ucú, (e) Mérida y (f) Progreso

En la figura 22 se muestra la evolución temporal de los iones Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} en los municipios que conforman la Zona Metropolitana de Mérida ya que han sido utilizados como indicadores de contaminación en diversos casos. En el caso del municipio de Conkal, Figura 22 (a) se aprecian que los tres iones se incrementaron en el periodo de estudio aunque sin superar los límites establecidos en la norma; en el caso de los cloruros tuvieron un pico en el año 2010 y posteriormente se observa un gradual descenso con un repunte hacia el 2013 los valores observados al final del período son superiores a los observados al inicio; en lo que respecta al SO_4^{2-} y NO_3^- se observa un comportamiento similar entre ellos con valores superiores al final del período. En la Figura 22 (b) correspondiente al municipio de Kanasín en el caso del SO_4^{2-} y NO_3^- se observa un comportamiento variable, con picos y mínimos pero al final ambos iones incrementaron sus concentraciones al final del período y en el caso de los nitratos la concentración rebasó el límite permisible por la norma en 2007 tras lo cual disminuyó pero desde 2010 de nueva cuenta se incrementaron las concentraciones hasta el año 2012 que supera el límite permisible y de hecho es el valor más alto en el período, en el año 2013 hay una disminución y se observó un valor ligeramente debajo del límite permisible; con los Cl^- se observa una leve disminución en las concentraciones. En el caso de Umán, Figura 22 (c) se observó que los Cl^- experimentaron disminuciones importantes en el 2007 y 2010, posterior al mínimo observado en la segunda mitad de 2010 las concentraciones comenzaron a incrementarse hasta el final del período aunque los valores observados al final del período son menores a los observados al principio, las concentraciones de SO_4^{2-} muestran un leve incremento pero se mantienen muy abajo del límite permisible; en el caso de NO_3^- se observó un incremento que hacia el último dato este es por debajo de los límites permisibles. Sin embargo, se registraron dos picos que superaron el límite en el 2007 y 2010 aunque después del valor de 2010 hay una disminución en los últimos valores. En la Figura 22 (d) correspondiente a Ucú lo más destacable son los Cl^- hay un importante incremento y desde 2009 se superó el límite permisible hasta que en 2013 se registró un valor menor al límite permisible, en el caso del NO_3^- hay un incremento y en los años 2010 y 2011 se registraron valores por arriba del límite permisible mientras que para el SO_4^{2-} se registra un incremento en las

concentraciones pero las máximas concentraciones se registraron en 2009 y 2010. En la Figura 22 (e) correspondiente al municipio de Mérida las concentraciones muestran pocos cambios, en el caso de los cloruros hubo una leve disminución mientras que el caso de sulfuros y nitratos hay un incremento, pero se mantuvieron por debajo de los límites permisibles, también se observó que para estos tres iones sus concentraciones máximas se registraron en el año 2010. En la Figura 22 (f) correspondiente al municipio de Progreso se observaron pocos cambios en las concentraciones de los nitratos y sulfatos, lo destacable son las concentraciones de los cloruros registraron un incremento con respecto a las concentraciones observadas al inicio del período y con concentraciones arriba del límite permisible desde 2009.

Tabla 13. Tendencias a través de mínimos cuadrados.

Municipio	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Dureza	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻
Conkal	0.0379	0.0890	7.4465	-0.1573	17.9684	6.6000	4.0040	0.8954	0.8279
Kanasín	-1.7642	0.1644	3.3026	-1.2832	2.9756	2.2701	-2.0121	0.5651	1.0554
Mérida	-2.7349	-0.0746	0.7917	-0.7536	-0.8797	-0.3263	-3.3867	0.7491	0.7195
Progreso	2.8694	-0.1497	2.1907	-0.0035	6.2262	19.2909	-3.8972	-2.5935	0.1504
Ucú	14.3210	0.5231	2.7482	1.5486	13.2432	30.3764	2.3791	4.7571	1.2218
Umán	-3.7046	-0.0721	7.2373	-0.1906	24.5042	-3.6587	6.0799	2.5976	3.4154

En la Tabla 13 se muestran datos que fueron obtenidos mediante una regresión lineal con las concentraciones de los parámetros correspondientes al año del muestro, los valores corresponden a la pendiente de la gráfica obtenida. Se puede notar que durante el período de estudio observan tendencias positivas del calcio y los nitratos; en el caso del calcio esto se puede atribuir al proceso de disolución de los suelos cársticos, en consecuencia, la dureza muestra un comportamiento positivo en su tendencia; respecto a los nitratos este tiene una tendencia positiva todos los municipios de la ZMM.

5.5 Índices hidrogeoquímicos

RELACIÓN Mg^{++}/Ca^{++}

En la Figura 23 se observa la relación Mg^{++}/Ca^{++} , al inicio del periodo la mayor parte de la Zona Metropolitana se caracterizaba por tener valores mayores a 0.5 excepto en Ucú lo que indica que el proceso de precipitación $CaCO_3$ se estaba dando en gran parte de la ZMM mientras que al final del período la dilución de la caliza había ganado terreno. Al observar más detenidamente los valores del índice mayores 0.5 se registran en Sierra Papakal y Ucú durante todos los muestreos; también los pozos de la Mérida I presentaron valores mayores a 0.5 en todos los muestreos.

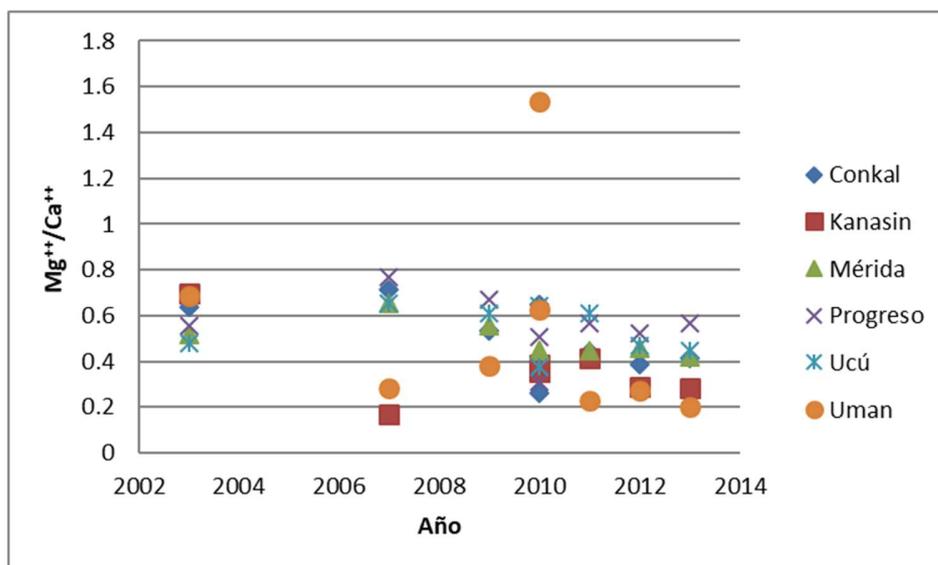


Figura 23. Relación Mg^{++}/Ca^{++}

RELACIÓN $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$

Se observaron incrementos importantes sobre todo en Progreso y Ucú, en el caso de Mérida se observaron casi constantes las concentraciones. En la Figura 24 se muestra lo que era de esperarse, que los puntos más cercanos a la costa tengan los valores más altos, Progreso y Ucú; también se observaron incrementos en estos valores durante el período de estudio por lo que se infiere que la acumulación de sales se ha incrementado.

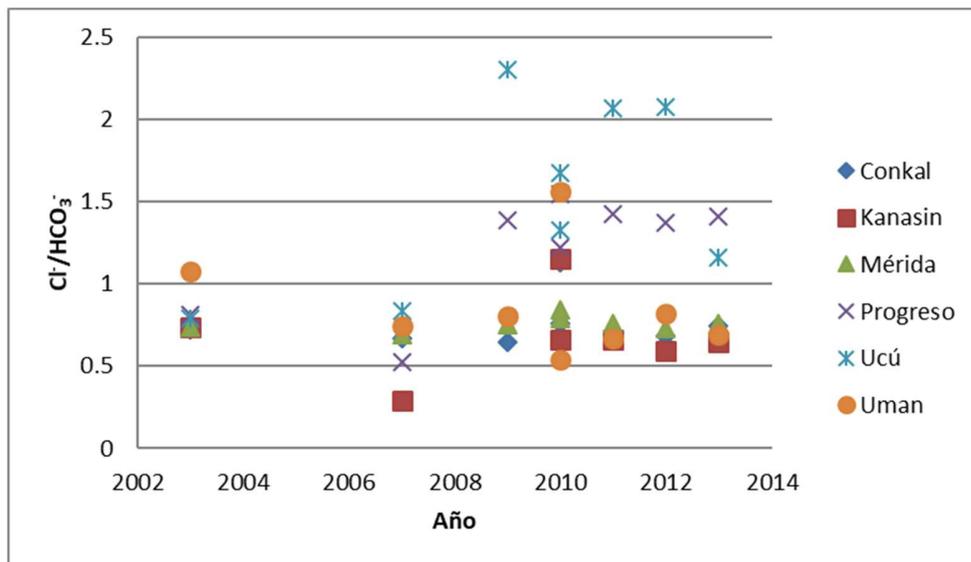


Figura 24. Relación $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$.

RELACIÓN $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$

En la figura 25 se observa que la relación superior al 0.1 se registró en Progreso y Ucú, dado que esta relación es un indicativo de intrusión salina no debe sorprender ya que son los más cercanos a la costa, pero también es de notar que en los últimos años del período todos los municipios muestran valores que sugieren intrusión salina, aunque esto debe ser tomado con cautela.

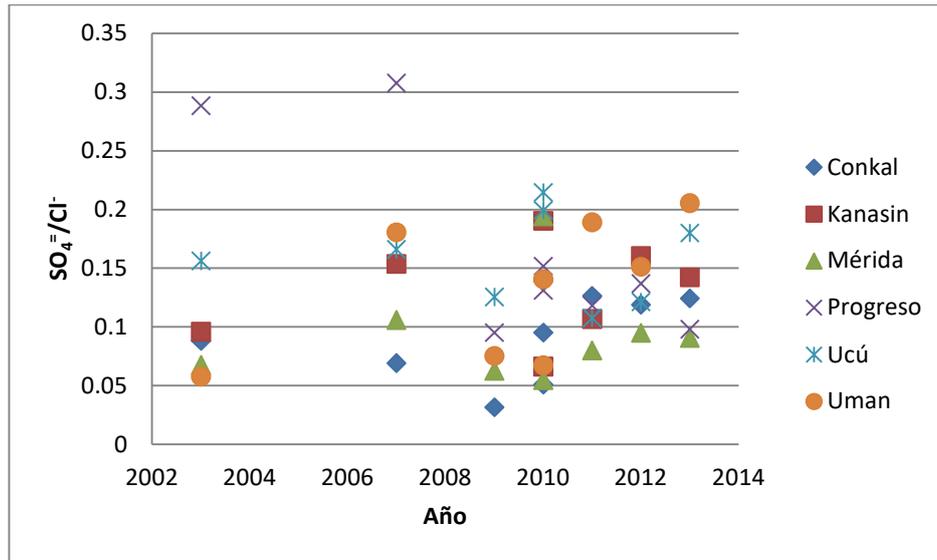


Figura 25. Relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$.

5.6 Familias de aguas

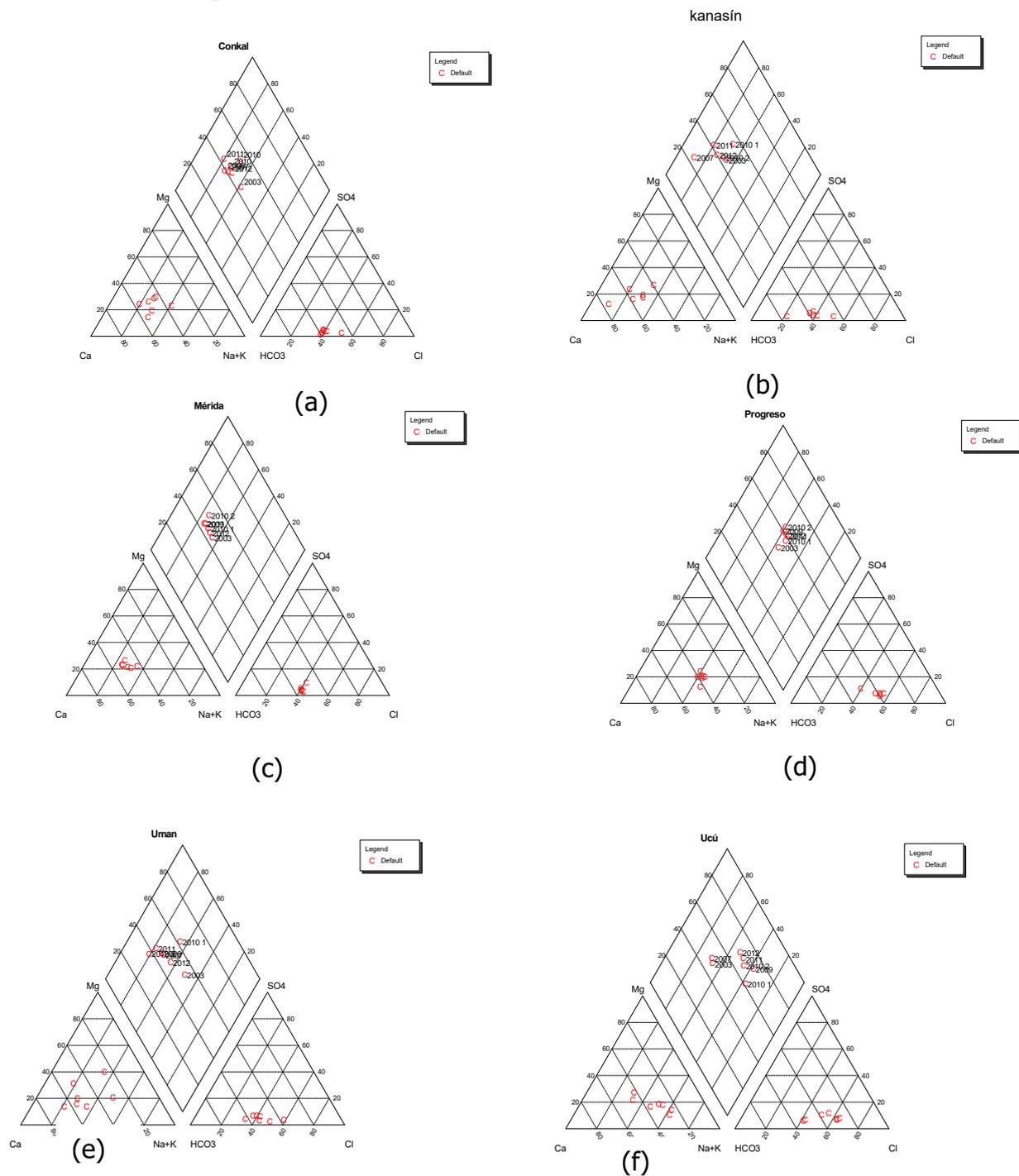


Figura 26. Diagramas de Piper (a) Conkal (b) Kanasín (c) Mérida (d) Progreso (e) Umán y (f) Ucú.

Mediante los diagramas de Piper se observa el dominio de las aguas bicarbonatadas y cálcicas, (Figura 26 de (a) a (f)); sin embargo, en el caso del municipio de Ucú, Figura 26 (f), se observa una transición de las aguas de bicarbonatadas a cloruros y de cálcicas a sódicas.

5.7 Discusión

Las concentraciones de cloruros en la ZMM se presentan en mayores concentraciones a medida que se encuentra a menores distancias de la costa como se puede ver en la Figura 9; en la Figura 22 se muestra que municipios como Umán y Kanasín presentan leves disminuciones. Sin embargo, en el caso de Ucú y Progreso, los más cercanos a la costa no solo presentan concentraciones elevadas, sino que las concentraciones de cloruros sugieren que existe contaminación marina lo que se aprecia también por la Figura 25 y muestran que este fenómeno se está incrementando, así queda de manifiesto mediante los diagramas de Piper, Figura 26 y los índices hidrogeoquímicos, Figuras 24 y 25 que señalan el incremento de las concentraciones de sales. En lo que respecta a los nitratos que es un ion asociado estrechamente por la contaminación aguas residuales se observan concentraciones casi constantes en términos generales en Mérida excepto en algunos pozos intraurbanos como es el caso de Pensiones y Xoclán que rebasan el límite permisible por 8 y 35 mg/l por arriba del valor permisible respectivamente, otra zona que experimentó un incremento en sus concentraciones de nitratos fue Kanasín, este municipio registró incremento de la población, en su superficie sembrada, de riego y de producción porcina. La presencia de sulfatos en el agua subterránea se asocia en el caso de la actividad antropogénica al uso de fertilizantes, al incrementarse las superficies por riego también hay un incremento en el uso de fertilizantes; el uso de fertilizantes en la agricultura se ha hecho común en los últimos años. En cuanto al índice Mg^{++}/Ca^{++} en la planta Mérida I que se ha mantenido con valores mayores a 0.5, esta planta potabilizadora se ubica en el área de más precipitación de la ZMM lo que contribuiría a una mayor dilución de carbonatos.

VI. CONCLUSIONES

La variación hidrogeoquímica del agua en la Zona Metropolitana de Mérida como se puede ver en los diagramas de Piper se mantuvo constante al mantenerse en la misma familia de aguas salvo en el municipio de Ucú donde se sugiere una transición hacia la familia cloruro sódica, en lo que respecta a la calidad química al menos con los iones estudiados ninguno de estos se ha mantenido por arriba de los límites normados.

En cuanto al comportamiento hidrogeoquímico, según la evolución temporal de los índices hidrogeoquímicos lo más destacable es la sugerencia de intrusión marina y/o mezcla con agua salada que si bien era de esperarse en Ucú y Progreso destaca que hacia el final del período casi todos los municipios indican esto, incluida la ciudad de Mérida, por lo que como se puede ver en las figuras de distribución espacial la mayor concentración de cloruros se observa en la zona norte de la ZMM, cercana a la costa.

Las concentraciones de nitratos muestran incrementos en Kanasín, Conkal, Uman y la zona poniente de Mérida que han sido las zonas con mayor crecimiento de viviendas por lo que su origen pudiera deberse a las aguas residuales mientras que en el resto de Mérida se han mantenido constantes lo que indica que la problemática de las aguas residuales está aún presente; en la ZMM es el incremento mismo de la población el principal factor humano que puede repercutir en la calidad del agua para consumo, las concentraciones de nitratos por ejemplo en Kanasín mostraron un incremento siendo este el municipio de la ZMM que ha experimentado más crecimiento poblacional y uno de los que más rezago presenta en sus políticas de tratamiento de aguas residuales; el incremento de sulfatos en Kanasín y Ucú si bien pudiese obedecer al incremento del uso de fertilizantes al incrementar sus superficies de riego es necesario llevar a cabo más estudios para poder correlacionarlo de manera correcta.

En cuanto a los valores con límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM127-SSA1, 1994) se observaron valores que superan los límites permisibles, aunque en los que indicarían un riesgo inmediato para la salud como es el caso de los nitratos estos fueron aislados y dado que las muestras fueron tomadas antes de someterse a los procesos de potabilización no supone un riesgo hacia la población pero la contaminación por nitratos es un problema presente en la ZMM.

VII. REFERENCIAS

Alcaraz R. (2010). Estudio hidroquímico y de contaminación en el sector “Mérida-Progreso” del acuífero kárstico de Yucatán (México). Tesis de Maestría, Universidad de Málaga y Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Alcocer D. J., Lugo V. A., Sánchez R.M., Escobar B. E., (1999). Contaminación del agua subterránea en la península de Yucatán, “Imagen Veterinaria”, 1(1), 41-50.

Aguilar Y., Bautista F., Mendoza M., Delgado C. (2013). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kárstico, “Tropical and Subtropical Agroecosystems”. 16(2), 243-263.

APHA, AWWA & WPCF (1989). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater L. S. Clesceri, A. E. Greenberg, & R. R. Trussell, eds., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation.

APHA, AWWA, WPCF (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Edited by Andrew D. Eaton, Lenore S. Clesceri, Eugene W. Rice, Arnold E. Greenberg. 21st. Edition.

Auge M., (2008). Hidrogeología ambiental, Departamento de geología facultad de ciencias exactas y naturales Universidad de Buenos aires, Buenos Aires, Argentina.

Batisani N (2012). Groundwater hydrochemistry evaluation in rural Botswana: a contribution to integrated water resources management, “Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management” EJESM., 5(4), 521-528.

Bathrellos, G. D., Skilodimumou, H. D., Kelepertsis, A., Alexakis, D., Chrisanthaki, I., Archonti, D. (2007). Environmental research of groundwater in the urban and suburban areas of Attica region, Greece, “Environmental Geology”, 56 (1), 11-18.

Batllore E., González J., Díaz J. y Febles J. (2005). Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, “México. Investigaciones Geográficas”, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 59, 2006, 74-92.

Berez M., Kauffer E., Álvarez G., (2010). Percepciones de la calidad del agua superficial en la microcuenca del río Fogotico, Chiapas, “Frontera Norte”, 22(23), 129-158.

Cabrera A., Pacheco J., Cuevas E., Ramírez J., Comas M., Cámara A., (2002). Hidrogeoquímica del agua que subyace a la JAPAY I, en Mérida, Yucatán, México. “Ingeniería”, 6(3), 29-40.

CEMDA (2006). El agua en México: lo que todas y todos debemos saber, 1ª edición, Centro Mexicano de Derecho A.C., México D.F.

CONAGUA (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región hidrológico-administrativa XII Península de Yucatán, Comisión Nacional del Agua, México, D.F.

CONAGUA (2014). Estadísticas del Agua en México, CONAGUA, México, D.F.

CONAGUA (2015). Determinación de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero península de Yucatán, estado de Yucatán, Comisión Nacional del Agua Gerencia de aguas subterráneas Subgerencia de evaluación y modelación Hidrogeológica, México, D.F.

Custodio E., Llamas M., (1983a). Hidrología subterránea Tomo I, 2ª edición, Ediciones Omega, S. A., Barcelona.

Custodio E., Llamas M., (1983b). Hidrología subterránea Tomo II, 2ª edición, Ediciones Omega, S. A., Barcelona

Del Campo M., (2009). Cambios en la hidrodinámica del acuífero del valle de Toluca en su porción central, Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México.

DOF, (2013). Estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Península de Yucatán, 4 de sep de 2013.

Durán R. y M. Méndez. (2010). Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, 1ª edición, CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, Mérida, Yucatán.

Facundo C. Juan R. González H. P. (2005). Hidrogeoquímica, CENAMENT, La Habana, Cuba.

FAO (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Como gestionar los sistemas en peligro, Roma, Italia.

FUSDA (2008). Fundación por la Sociodemocracia de las Américas, A.C. El Agua Recurso Natural y Elemento de Desarrollo, En: "Medio ambiente y desarrollo, hacia un manejo sustentable del agua."

Graf S.,(2007). Escasez de agua en el mundo y la importancia del acuífero guaraní para Sudamérica: relación abundancia-escasez, "Centro Argentino de Estudios Internacionales Programa Recursos Naturales y Desarrollo."

Gleick P.,(2000). The changing water paradigm look at twenty-first century water resources development, "International water resources association water international",25(1), 127-138.

González M., (2009). Evolución espacio-temporal de la calidad del agua subterránea en el acuífero Cedral-Matehuala: alternativas de uso, Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

Guo H., Wang Y.,(2004). Hydrogeochemical processes in shallow quaternary aquifers from the northern part of the Datong Basin, China, "Applied Geochemistry", 19(1),19-27.

Hernández (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 de San Luis Potosí.

INEGI (2010). Sistema para la consulta de las síntesis estadísticas municipales 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, INEGI.

INEGI. (2011a). Anuario de estadísticas por entidad federativa 2011, INEGI.

INEGI. (2011b). Censo de Población y Vivienda 2010. Panorama sociodemográfico de Yucatán, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México: INEGI.

Leung, C., Jiao, J. J., Malpas., J., Chan, W., Wang, Y. (2004). Factors affecting the groundwater chemistry in highly urbanized coastal area in Hong Kong: an example from the Mid-Levels area. "Environmental Geology", 48(4), 480-495.

López S., (2008). Arbolado urbano en Mérida, Yucatán y su relación con aspectos socioeconómicos, culturales y de la estructura urbana de la ciudad, Tesis de maestría, Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto Politécnico Nacional Unidad Mérida.

Nagaraju A., Sunil Kumar K., Thejaswi A., Sharifi A, (2014). Statistical Analysis of the Hydrogeochemical Evolution of Groundwater in the Rangampeta area, Chittoor District, Andhra Pradesh, South India, "American Journal of Water Resources", 2(3), 63-70.

NOM-127-SSA1-1994 (1994) Norma Oficial Mexicana: "Salud ambiental, para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización". Secretaría de Salud.

Ordóñez I., García M., (2010). Formas kársticas comunes de los cenotes del estado de Quintana Roo (México), "Revista electrónica del medio ambiente UCM.", 9, 15-35.

Osorio J., (2009), Calidad del agua de los pozos de abastecimiento del estado de Yucatán. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán.

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.

Pernia-Llera, J.M., Cuesta-Peiro, F., Ballesteros-Navarro, B., Barba-Romero Munoz, J., Garcia-Sanchez, E., (1993). Las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas: Madrid, "Instituto Geológico y Minero de España"

- Perry E., Paytan A., Pedersen B., Velazquez-Oliman G. (2008). Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology, "Journal of Hydrology", 357, 27-40.
- Pulido-Bosch A., Cerón García J.C. (1991). Variaciones hidrogeoquímicas de periodicidad anual en surgencias kársticas. Ejemplo del manantial de La Yedra (Málaga), "Rev. Soc. Geol. España", 4, 51-59
- Sanchez-Pinto, I., González-Herrera, R., Perry, E. (2005). Hydrodynamic behavior of the Yucatán aquifer. A perspective on the hydraulic conductivity estimation, "Espelunca Digital". 2, 8-22.
- SEDUMA (2013), Zona Metropolitana de Mérida. Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Urbano.
- SEDUMA (2014). Programa de Desarrollo Urbano Regional de la Zona Metropolitana de Mérida, Secretaria de Desarrollo urbano y Medio Ambiente.
- Sosa-Rodríguez F., (2012). El futuro de la disponibilidad del agua en México y las medidas de adaptación utilizadas en el contexto internacional. "Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades, SOCIOTAM", 12(2), 165-187.
- Toledo A. (2002). El agua en México y el mundo, "Gaceta Ecológica", 64, 9-18
- Torres M., Basulto Y., Cortés J., Uitz G, Koh A., Puerto F., Pacheco J. (2014). Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán, "Ecosistemas y Recursos Agropecuarios", 1(3), 189-203.
- UNESCO 2009. World Water Assessment Programme: The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World, Paris.
- UNESCO (2015). The United Nations World Water Development Report 2015 Water for a sustainable world. United Nations, París.
- Varela M (1993) Las aguas subterráneas. Importancia y perspectivas, "Instituto geológico y minero de España."
- Velázquez Aguirre L., (1986). Aplicaciones de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán, "Dirección General de Administración y Control de sistemas Hidrológicos SHRA Ingeniería Hidráulica en México", 21-29.
- Villasuso M. J., Méndez R. (2000). A Conceptual Model of the Aquifer of the Yucatan peninsula, "Population, Development, and Environment on the Yucatan Peninsula" Lutz W. and Prieto L. Editors, 120-139.
- WHO (2009). Potassium in Drinking Water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality, Geneva, Switzerland.