Universidad de Málaga
Facultad de Ciencias
Departamento de Ecología y Geología

Universidad Autónoma de Yucatán
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica

Estudio hidroquímico y de contaminación en el sector "Mérida-Progreso" del acuífero kárstico de Yucatán (México)

Trabajo Fin de Máster
"Recursos Hídricos y Medio Ambiente"

Autor: Rubén Alcaraz Navarro

Tutor de la Universidad de Málaga: Dr. Iñaki Vadillo Pérez
Tutor de la Universidad Autónoma de Yucatán: Dr. Eduardo Graniel Castro
Coordinador del Máster "Recursos Hídricos y Medio Ambiente": Dr. Bartolomé Andreo Navarro

"A todas las personas que han contribuido a realizar este trabajo"

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer al **Doctor Iñaki Vadillo** por facilitar la gestión de la práctica y también por los consejos junto con la ayuda prestada que tan necesaria ha resultado en mi proyecto, al **Doctor Bartolomé Andreo** por el ofrecimiento de la práctica en este lugar del mundo y al **Doctor Eduardo Graniel** no solo por su labor de tutor y por la facilitación de documentos bibliográficos, conocimientos e información para el trabajo, sino también por el trato cordial mostrado hacia mi persona, por hacer cómoda mi estancia en México y por todas las mañanas divertidas en los despachos.

Por su gran ayuda en el laboratorio a la hora de analizar las muestras de pesticidas, por facilitarme la información que contribuyó de manera sobresaliente a completar este trabajo de fin de máster, por su labor de fotógrafa, y por ayudar en la toma de muestras, le doy todo mi agradecimiento a **Irma Lizarraga**.

Agradecer a **Timm Reisinger**, **Sylwana Bosowski** y **Darío Cauich** tanto a nivel personal como a profesional en los días de muestreo del agua a analizar para este proyecto.

Debido a su gran intervención en la recogida de muestras, a **Mónica Carrillo Monsreal**. Por el mismo motivo, además de facilitar los desplazamientos, a **Emmanuel González**.

Al **Doctor Antonio Cardona**, de la Universidad de San Luis Potosí, con el que tuve la suerte de colaborar en los muestreos para los elementos trazas y de aprender de primera mano.

Al **Doctor Emmanuel**, **Doctor Germán Giacomán** y **Roberto**, por la ayuda en los laboratorios y por los consejos. Otro agradecimiento al personal del servicio de informática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, por solucionar mis problemas informáticos.

Por su ayuda y guía durante toda la duración del Máster de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, le doy un enorme agradecimiento a mi amigo **Manuel Argamasilla**.

A **Damián Sánchez**, por la ayuda ofrecida en la preparación de los viales y por prestar atención a la llegada de los mismos a la Universidad de Málaga.

A mis compañeros, con los que he tenido el honor de pasar grandes momentos en estos meses que ha durado el Máster de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, muy en especial quiero mencionar a **Roberto Luis Palomino**, **Francisco Zafra**, **Inmaculada Espejo**, **Raquel Parras**, **Daniel Montiel**, **Ana María Zárate**, **David Rizo**, **Juan Ramón Ponce** y **Mateo Márquez**.

No olvidar nunca a mi familia por sus ánimos y gran sacrificio, y a mis amigos, que siempre estuvieron apoyándome desde la otra parte del Atlántico.

Un enorme **"gracias"** *a todos vosotros.*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN……..7

1.1 Motivación y breve descripción del proyecto……7
1.2 Localización geográfica del área de estudio……8
1.3 Características climáticas……10
1.4 Características geológicas……11
1.5 Características hidráulicas……12
1.5.1 Recursos hídricos en el Estado de Yucatán……14
1.5.2 Usos del agua……15
1.6 Fuentes de degradación y contaminación del agua……16

2. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ESTUDIO……19

2.1 Muestreo del agua subterránea……19
2.2 Análisis en el laboratorio……22
2.2.1 Análisis de la concentración de sodio y potasio……22
2.2.2 Análisis de los pesticidas……22
2.2.3 Análisis de los elementos traza……24

3. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS Y COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS……25

3.1 Contenido iónico mayoritario……30
3.1.1 Diagrama de Pipper……32
3.1.2 Diagramas de Stiff……33
3.2 Coliformes fecales y coliformes totales……46
3.3 Isótopos de moléculas de agua $\partial^{2}H$ y $\partial^{18}O$……49
3.4 Resultados de organofosforados y plaguicidas organoclorados……55

4. CONCLUSIÓN FINAL……59

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS……62

6. ANEXOS DE CONTENIDOS……64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio……8

Figura 2. Puntos de muestreo en el área de estudio con sus respectivos nombres y coordenadas geográficas en UTM.....9

Figura 3. Gráfico de precipitación y evaporación media anual en el Estado de Yucatán…..10

Figura 4. Diferentes climatologías repartidas en el Estado de Yucatán……10

Figura 5. Estructura geológica del Estado de Yucatán……11

Figura 6. Gráfico del equipo y procedimiento del análisis de los elementos traza……24

Figura 7. Piezometría en el sector "Mérida-Progreso"……26

Figura 8. Isovalores de pH en la zona de estudio……27

Figura 9. Isovalores de Conductividad Eléctrica en la zona de estudio……28

Figura 10. Isovalores de temperatura en la zona de estudio……29

Figura 11. Diagrama de Piper con cuatro agrupaciones dependiendo de su facie hidroquímica y localización……32

Figura 12. Distribución de las diversas facies hidroquímicas en el área de estudio……33

Figura 13. Isovalores de sulfato en el área de estudio……35

Figura 14. Isovalores de nitrato en el área de estudio……37

Figura 15. Isovalores de nitrito en el área de estudio……38

Figura 16. Isovalores de nitrógeno total kjeldahl en el área de estudio.....39

Figura 17. Isovalores de potasio en el área de estudio……40

Figura 18. Isovalores de sodio en el área de estudio……41

Figura 19. Isovalores de ión cloruro en el área de estudio……42

Figura 20. Isovalores de calcio en el área de estudio.....44

Figura 21. Isovalores de magnesio en el área de estudio.....46

Figura 22. Distribución de la concentración de coliformes totales en nuestra área de estudio.....47

Figura 23. Distribución de la concentración de coliformes totales en nuestra área de estudio ……..…48

Figura 24. Representación de las muestras y comparación con la recta meteórica mundial. Agrupación de las muestras de agua ateniendo a su isotopía……..……50

Figura 25. Representación de la Línea meteórica mundial.....51

Figura 26. Isovalores de $\delta^{2}H$ en nuestra área de estudio.....52

Figura 27. Isovalores de $\delta^{18}O$ en nuestra área de estudio.....53

Figura 28. Distribución y movimiento general de las bajas presiones en México.....54

Figura 29. Concentración total de organofosforados.....56

Figura 30. Concentración total de plaguicidas organoclorados.....58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución porcentual del agua utilizada en los diferentes usos en el Estado de Yucatán……15

Tabla 2. Valores de las mediciones realizadas en los mismos puntos de muestreo……25

Tabla 3. Representación de los cationes y aniones en obtenidos en las muestras de agua……31

Tabla 4. Representación de los valores de los cationes y aniones con su respectivo sumatorio en cada punto de muestreo y error en %……32

Tabla 5. Representación de la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} en los puntos de muestreo……43

Tabla 6. Representación de los coliformes totales y fecales. Abril 2013……46

Tabla 7. Valores de $\partial^{2}H$ y de $\partial^{18}O$ en ‰ para cada muestra……49

Tabla 8. Concentración de organofosforados (ppb)……55

Tabla 9. Suma de Drines, Clordanos, Heptacloro, Endosulfan, DDT y Metoxicloro……57

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Punto de muestreo/Introducción de la botella Wildco en la captación……19

Fotografía 2. Relleno del agua subterránea extraída mediante la botella Wildco/Medición de los parámetros de la muestra de agua……20

Fotografía 3. Sonda piezométrica/Introducción de la botella Wildco en la captación……21

Fotografía 4. Filtración de las muestras/Retención de los compuestos organoclorados……23

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y breve descripción del proyecto

En la península de Yucatán, ya sea en ciudades como Mérida, Valladolid o en núcleos urbanos de menor tamaño, la principal fuente de abastecimiento es el agua subterránea. La gran permeabilidad del subsuelo debido a su karstificación, asociada a una gran vulnerabilidad, origina que los vertidos representen un importante potencial de contaminación.

Debido al fenómeno comentado, el objetivo del proyecto es la evaluación de la contaminación en el sector "Mérida-Progreso" del acuífero de Yucatán.

Para lograr una gestión eficiente en el abastecimiento del agua subterránea, es necesaria una evaluación de los contaminantes que se encuentren presentes; esta evaluación permite además, identificar los puntos contaminantes que afectan tanto directa como indirectamente al acuífero.

Se realizó un análisis de:

- **Bacterias**
- **Pesticidas**
- **Contenido iónico mayoritario**
- **Elementos trazas**
- **Metales pesados**

Además de dicha evaluación, se procedió a un análisis mediante **isótopos de agua**.

La motivación personal que me ha llevado a tomar la decisión de querer realizar este proyecto, es averiguar de manera particular, mediante la colaboración de todo el equipo formado tanto por el personal de la Universidad Autónoma de Yucatán como los integrantes de la Universidad de Málaga, el funcionamiento hidroquímico de lo que se intuye que es un enorme acuífero kárstico que otorga recursos hídricos a una cantidad considerables de personas, localizar sus puntos y focos en este sector que producen la contaminación en este acuífero.

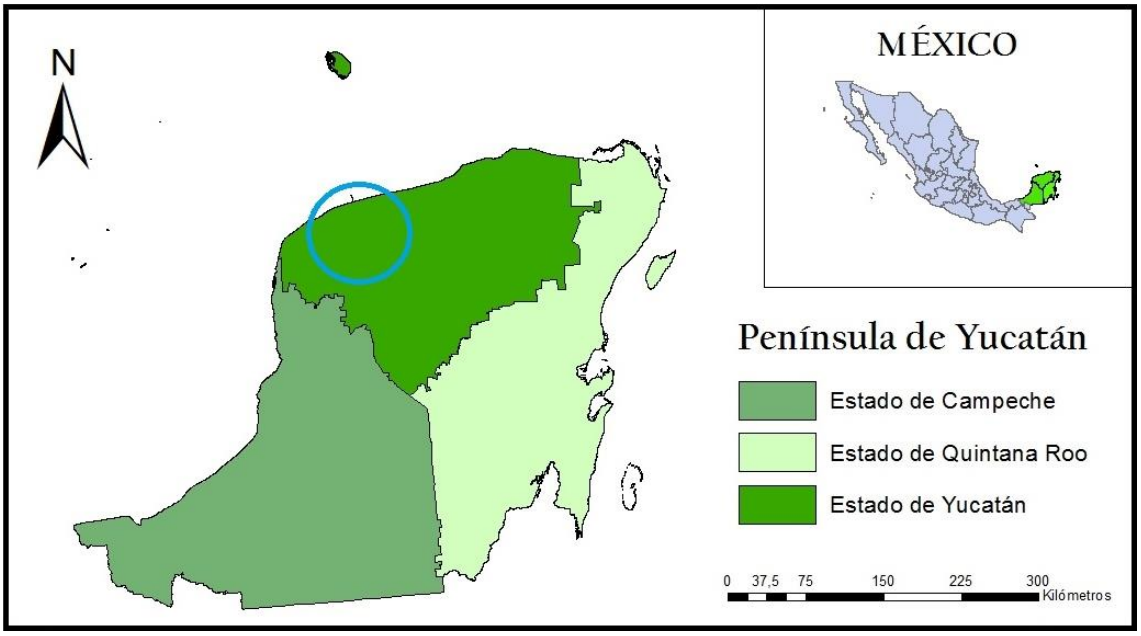
Estas han sido las claves motivadoras para que mi interés por este estudio y la realización de este proyecto fin de máster se lleve a cabo con todo mi interés y dedicación personal.

1.2 Localización geográfica del área de estudio

El área de estudio engloba parte del territorio centro-norte del Estado de Yucatán (México).

El Estado de Yucatán, se encuentra formando parte de la Península de Yucatán, situada al Sureste del país. Esta a su vez, se encuentra dividida en tres Estados, además del mencionado, comparte territorio con el Estado de Quintana Roo (situado al Este), y el Estado de Campeche, (situado al Suroeste).

Las ciudades más representativas e importantes a diversos factores (tanto a nivel dimensional, económico y número de habitantes) en este Estado son: Mérida, Valladolid y Progreso (Fig.1).



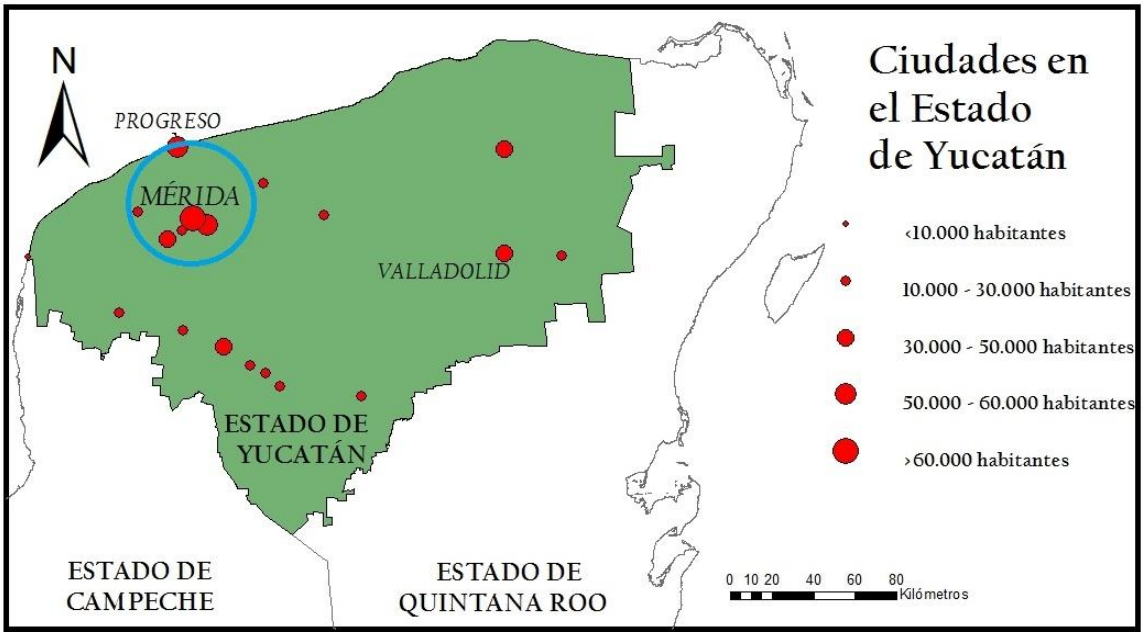
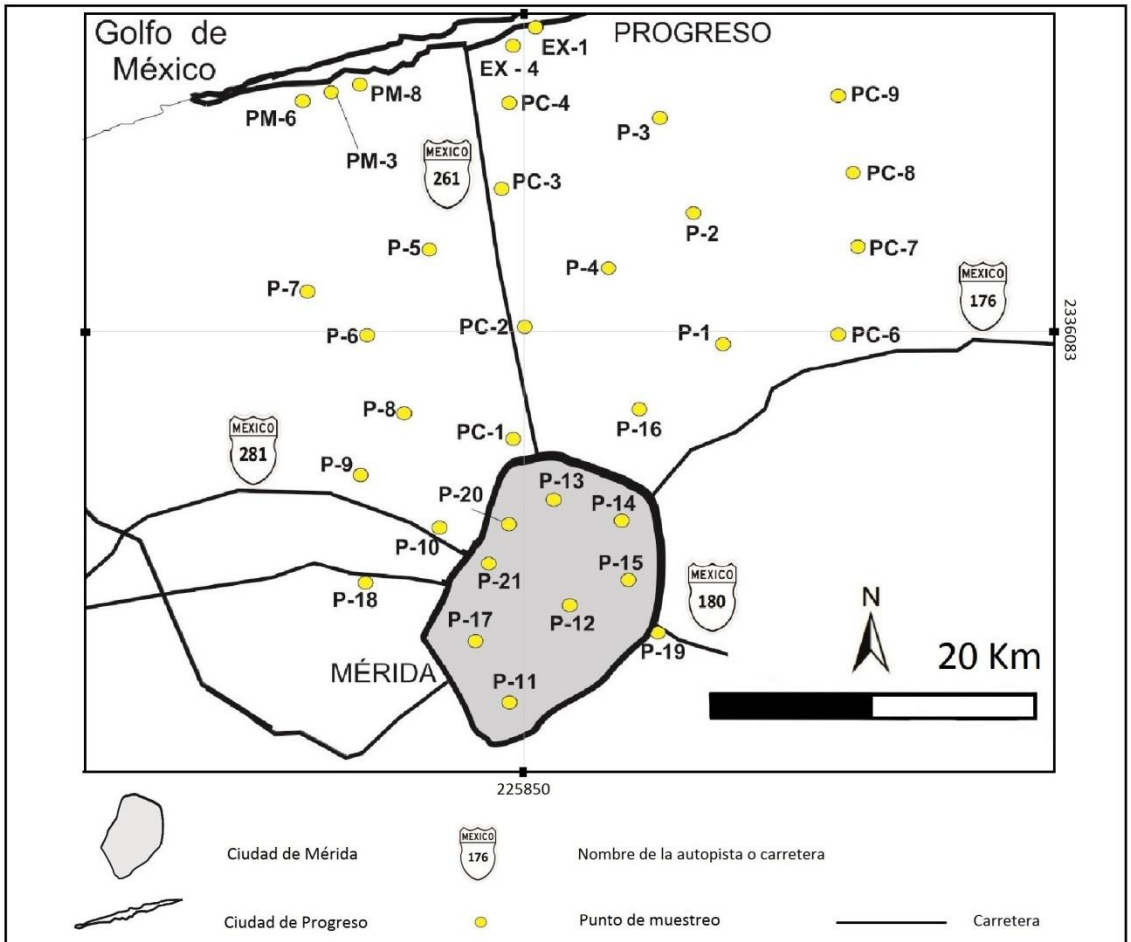


Figura 1: Localización del área de estudio. (Elaboración propia)



		Coordenadas (UTM)	
Pozo	**Ubicación**	**Este**	**Norte**
P-1	Megalita	238351	2335222
P-2	Granjas Crío	236297	2343980
P-3	BAAG	235198	2349087
P-4	Sac-Nicté	231623	2340055
P-5	Dzizilché	220586	2341398
P-6	Sierra Papacal	216654	2338173
P-7	San Miguel	213593	2339115
P-8	Cheuman	218755	2331956
P-9	Ucú	215633	2327693
P-10	Anicabil	220786	2323798
P-11	U.D. del Sur	223636	2313336
P-12	Bomberos	227497	2319813
P-13	Tecnológico	227441	2325618
P-14	Sagarpa	230459	2324657
P-15	Pacabtun	231492	2320171
P-16	Tixcuytun	232928	2331630
P-17	Observatorio	224229	2318495

		Coordenadas (UTM)	
Pozo	**Ubicación**	**Este**	**Norte**
P-18	Chalmuch	216275	2321580
P-19	Acuaparque	232033	2318439
P-20	Chenku	224573	2325195
P-21	CONAGUA	223823	2322638
PC-1	Matemáticas	225171	2329869
PC-2	Komchén	225851	2336084
PC-3	PREDECO	225146	2344883
PC-4	Contenedores	224191	2350250
PC-6	Mococha	244639	2334820
PC-7	Hda. Too	245363	2340025
PC-8	X'luch	245600	2344583
PC-9	Vázquez	245320	2348517
PM-8	Manantial	215958	2352879
PM-6	Manantial	214000	2352057
PM-3	Manantial	213961	2352430
EX- 1	Basurero	226807	2355066
EX- 4	Basurero	226823	2355044

Figura 2: Puntos de muestreo en el área de estudio con sus respectivos nombres y coordenadas geográficas en UTM.

1.3 Características climáticas

En la zona predomina una climatología tropical subhúmeda, con un **promedio anual de precipitación** de **1162mm**, una **evaporación anual** de **2100mm** y una **temperatura anual media** de **26,2°C**.

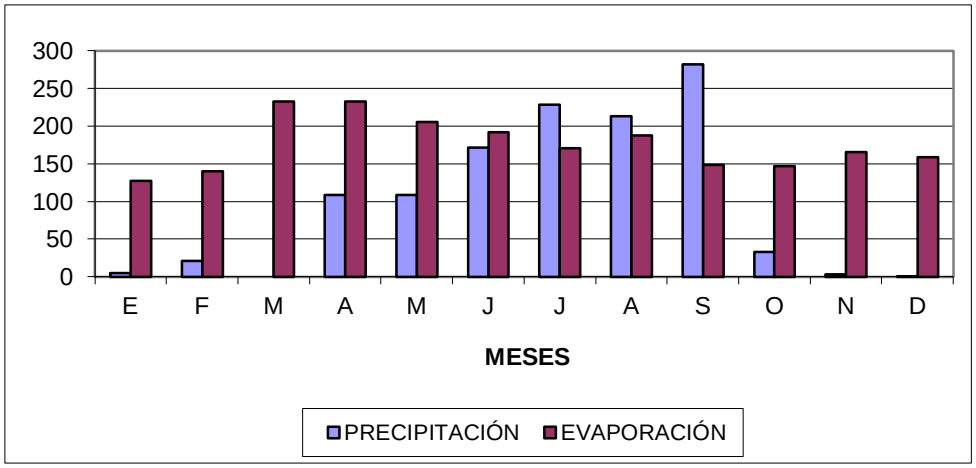


Figura 3: Gráfico de precipitación y evaporación media anual en el Estado de Yucatán. (E.Graniel)

No obstante, encontramos también dos tipos de climatología más en el Estado, en la zona Noroeste, encontramos un clima tropical semiárido, y ya en plena costa, encontramos un clima tropical árido (Fig.4).

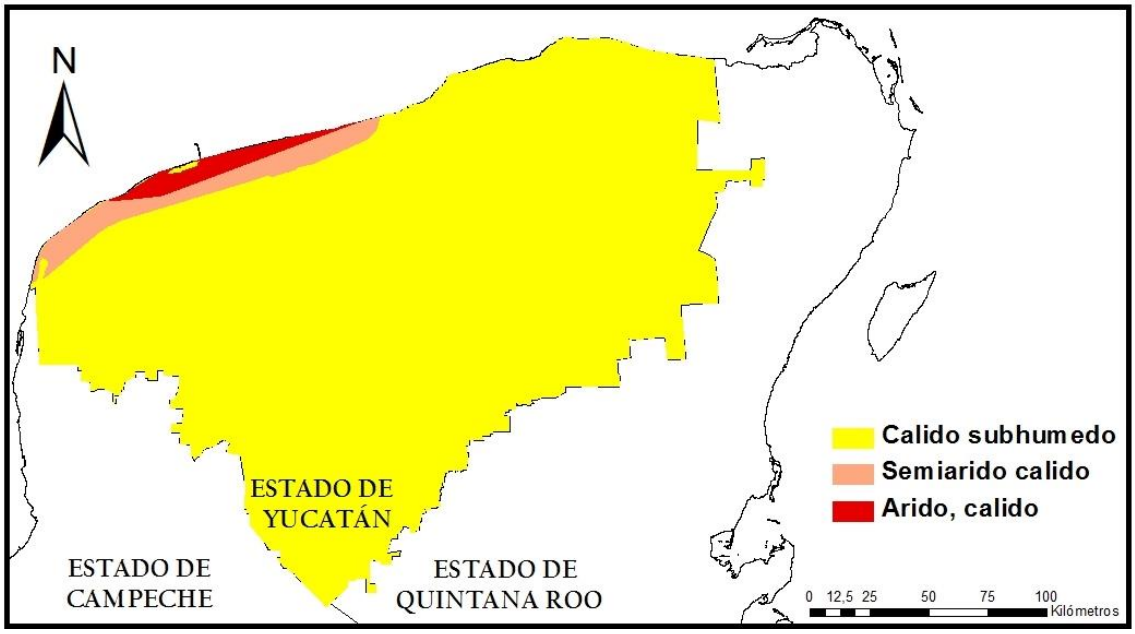


Figura 4: Diferentes climatologías repartidas en el Estado de Yucatán (Elaboración propia)

1.4 Características geológicas

Desde el punto geológico, el subsuelo está constituido por una secuencia potente de sedimentos calcáreos de origen marino del Terciario Reciente *(Butterlin y Bonet, 1960; Bonet y Butterlin, 1962)*; las rocas más antiguas se localizan al sur de la entidad y se encuentran aflorando en la Sierrita de Ticul, corresponden a rocas del Paleoceno-Eoceno Indiferenciado, que se encuentran dolomitizadas, silicificadas o recristalizadas, dentro de las que se incluyen a las rocas evaporitas de la formación Icaiché, constituidas por yeso y anhidrita, ricas en sulfatos.

Estos estratos en la zona sur del Estado, están cubiertos por el Miembro Pisté de la Formación Chichén Itzá, correspondiente al Eoceno Medio, los cuales también ocupan una gran porción del centro del estado de Yucatán, en contacto al norte de Libre Unión con las calizas masivas, blancas y muy cristalinas del Miembro Chumbec del Eoceno Superior, hacia el noroeste al norte de Muna con los estratos del Oligoceno. Rodeando al Miembro Pisté al norte este y oeste se localizan las calizas amarillentas (a veces arcillosas) de la Formación Carrillo Puerto del Mio-Plioceno y hacia la costa del Estado, formando una banda se encuentran calizas de moluscos del Reciente.

El principal rasgo fisiográfico está representado por la Sierrita de Ticul, que se encuentra la sur del estado; la cual tiene una extensión aproximada de 110 km, está orientada ONO-ESE, con una elevación máxima de 275 m sobre el nivel del mar, y está constituida por calizas cristalinas, dolomitizadas y silicificadas del Eoceno Inferior.

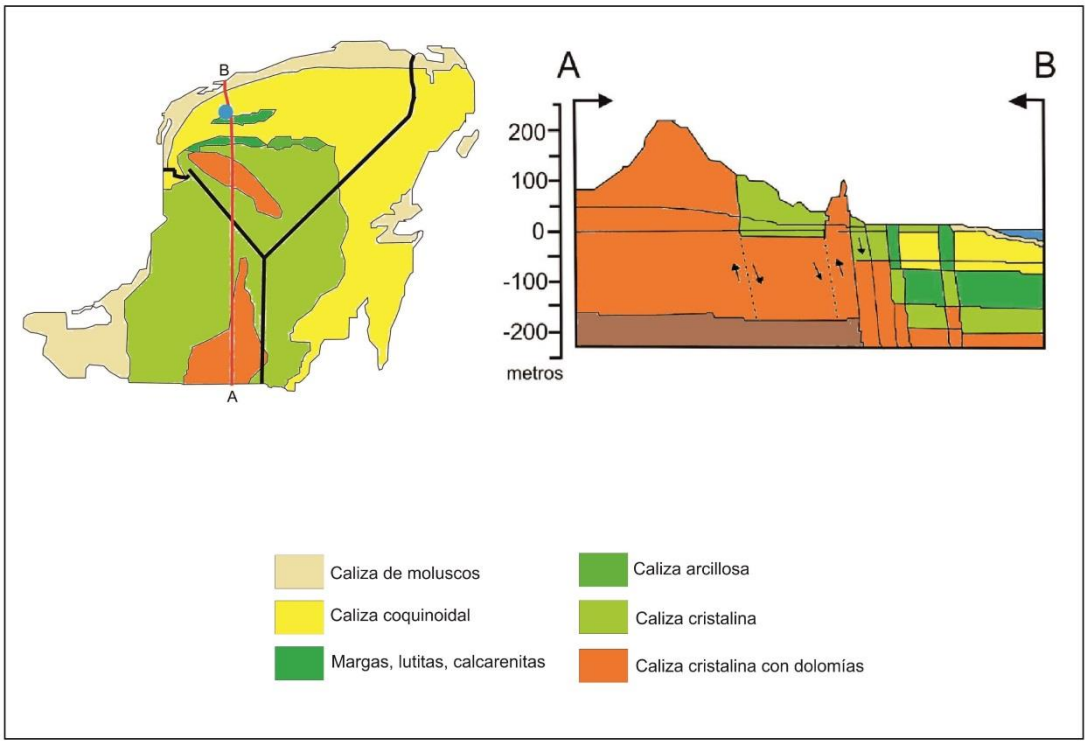


Figura 5: Estructura geológica de la Península de Yucatán

1.5 Características hidraúlicas

El agua subterránea se mueve de manera difusa a través de los intersticios granulares de la matriz rocosa o bien como flujos preferenciales que ocurren por fracturas y por conductos de disolución. Estos conductos tienen un espesor medio de 150 metros en esta zona.

El movimiento del agua subterránea va de las zonas de mayor precipitación ubicadas al sur del Estado hacia las costas, donde se realiza la descarga natural del acuífero al mar; alimentando de paso a los esteros y lagunas costeras. Investigaciones recientes han demostrado que la presencia del anillo de cenotes (red cavernosa con forma de círculo cuyo epicentro se encuentra aproximadamente en la ciudad de Progreso) representa en varios de sus segmentos una zona de alta permeabilidad que actúa como un río subterráneo, el cual concentra el agua subterránea y la conduce hacia sus puntos de intersección con la línea costera cerca de Celestún y Dzilam de Bravo.

La alta conductividad hidráulica es una combinación de la permeabilidad primaria de la roca, del grado de fracturación y de los conductos de disolución. La disolución de la roca carbonatada, ocurre según el contenido de carbonato de calcio y la acidez del agua, en el proceso de kárstificación, en donde la heterogeneidad del sistema se incrementa continuamente propiciando que el almacenamiento y el movimiento del agua subterránea se presente a través de la red de cavidades interconectadas con fracturas y conductos de disolución, como las oquedades y cavernas localizadas a diferentes profundidades del subsuelo *(Villasuso y Méndez, 2000)*.

Podemos obtener valores altos para la transmisividad, que oscila entre 331,5 m^2/d y 1798,5 m^2/d, en comparación con otros acuíferos de espesor similar.

La profundidad del nivel freático varía desde los 8 metros al norte de la Sierrita de Ticul, 15 m al pie de la misma y hasta unos pocos metros en el litoral costero.

Debido a las condiciones geológicas imperantes, el **acuífero** es considerado como **libre**, excepto en una franja estrecha paralela a lo largo de toda la costa *(Perry et al., 1989)*; esta delgada capa (0,5 a 1,40 m) se extiende a lo largo de los 250 kilómetros de costa y en una franja de 2 a 20 kilómetros de ancho. Este extenso caliche costero es prácticamente impermeable ya que su porosidad es menor al 1%, actuando como una barrera que impide el movimiento hacia el mar del agua subterránea.

A consecuencia de esto, tenemos dos aspectos interesantes:

1. A una distancia de 5 a 7 metros de la costa tierra adentro, el acuífero presenta alturas hidrostáticas que varían de 0,32 a 0,77 por encima del nivel del mar.

2. El caliche se extiende en algunas zonas más de 3 km mar adentro, donde inicia un proceso de destrucción debido principalmente a organismos incrustantes. Existe fuerte evidencia en el sentido de que la elevación de la superficie piezométrica del acuífero cerca de la costa es mayor al nivel medio del mar,

debido a que la mayor descarga de agua dulce ocurre a varios kilómetros de la costa (mar adentro) y a varios metros de profundidad *(Perry et al. 1989).*

Debido a las características de gran conductividad hidráulica del medio geológico, se tiene un gradiente hidráulico extremadamente bajo de 5–10 mm/km *(Marín et al., 1987)*. En las cercanías de Mérida, el cuerpo de agua dulce es de aproximadamente 40 metros de espesor, sobreyaciendo a agua de mayor contenido de sales que el agua marina actual *(Graniel et al. 1999 a).*

Existen dos fuentes de agua salada:

I. Disolución de depósitos de evaporitas intercalados con sedimentos carbonatados
II. El agua de mar que circunda al estado *(Lesser y Weidie, 1988*)

Debido a que las aguas subterráneas son la principal fuente de abastecimiento para todos los usos en el estado, es importante considerar que sí bien **la recarga supera de una manera notable la extracción del acuífero**, por lo que cuantitativamente no existen conflictos; sí se presentan y se han incrementado paulatinamente **problemas con la calidad del agua subterránea en las costas**, por los casos de intrusión marina ya observados principalmente en el nororiente (oriente) y en el resto del acuífero, por las extracciones excesivas de agua dulce que provocan el ascenso de agua salada subyacente; lo que ha obligado en algunos casos a restringir los abastecimientos permisibles en el litoral y por tanto los caudales de extracción, desaprovechando la gran capacidad trasmisora del acuífero.

La zona de alimentación del acuífero genera un flujo que parte de la región sur oriental del estado dispersándose hacia el noroeste, noreste y norte.

En Yucatán no se tiene en realidad una red de observación del comportamiento espacial y temporal del agua subterránea; se desconocen las condiciones exactas de explotación y operación del acuífero, así como las especificaciones constructivas y operativas que deben reunir las captaciones para el óptimo aprovechamiento y conservación del recurso hídrico.

Las variaciones naturales en la disponibilidad del agua pueden ser debidas tanto a los efectos de la estacionalidad como a variaciones en la distribución espacial. La estacional en los sistemas tropicales está regida primordialmente por los eventos de precipitación, ya que las variaciones térmicas no suelen ser tan notorias.

1.5.1 Recursos hídricos en el estado de Yucatán

El Estado siempre se ha caracterizado por su gran volumen de agua subterránea, que en los últimos años se está viendo afectada por los problemas de contaminación, añadiendo la frágil vulnerabilidad del mismo debido a sus características geológicas, morfológicas y climatológicas ya mencionadas.

Todo esto lleva a que el establecimiento de suministros de agua para satisfacer las necesidades de la población sea de gran importancia para las autoridades federales, estatales y municipales. A nivel social, cada vez más se requiere que este suministro sea más adecuado, higiénico y seguro. Cabe destacar que la calidad del recurso hídrico es vital para la economía del Estado de Yucatán.

Para satisfacer las demandas de agua que requiere la población yucateca, solo se cuenta con el agua subterránea, ya que debido a las características físicas e hidrogeológicas del subsuelo, no se cuenta con agua superficial, aunque esta, a la vez sirve como fuente de descarga, ya que en ella se depositan las aguas de desecho que se generan en los diversos usos; por lo que para conocer el funcionamiento, la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en el Estado, se requiere conocer las características físicas del subsuelo para poder entender el funcionamiento del medio subterráneo.

Topográficamente, el recurso hídrico se ve influenciado, la porción norte de Yucatán se caracteriza por su relieve plano, en la costa es ligeramente mayor a 1 metro, incrementándose hacia el sur y oriente a elevaciones de aproximadamente 30 metros con respecto al nivel medio del mar. Este relieve casi plano, la existencia de un suelo delgado de aproximadamente 20 centímetros y la fracturación de la roca caliza superficial, son los factores principales que determinan la ausencia de corrientes superficiales en Yucatán; la infiltración del agua de lluvia ocurre en forma casi inmediata al evento, a través de las fracturas.

De esta manera, entre el 15 y el 20 % de la precipitación anual constituye la recarga neta al acuífero, siguiendo diferentes trayectorias de flujo, controladas principalmente por el desarrollo kárstico de la zona.

En estudios realizados anteriormente, se conoce que el flujo del agua se traslada en dirección "Sureste – Noroeste", con un gradiente de 0,08%.

1.5.2. Usos del agua

En Yucatán, el agua subterránea se extrae para cubrir las necesidades de una serie de actividades agrícolas, industriales, suministros urbanos… (Tabla 1).

La mayoría de las cuales se encuentran en las zonas norte, oriental y sur-poniente del Estado.

DIFERENTES USOS	%
AGRÍCOLA	*63,2*
PUB-URBANO	*28,1*
INDUSTRIAL	*4,2*
PECUARIO	*2,3*
OTROS USOS	*2,2*

Tabla 1: Distribución porcentual del agua utilizada en los diferentes usos en el Estado de Yucatán

1.6. Fuentes de degradación y contaminación del agua

El **efluente doméstico** en la mayor parte de Yucatán **es descargado al subsuelo por medio de tanques sépticos** y en pozos someros abandonados, ya que no se cuenta con un sistema de drenaje sanitario; el agua pluvial es vertida al acuífero por medio de pozos de absorción de 15-18 m de profundidad, haciendo así que **los índices de contaminación se incrementen lentamente en los últimos años** debido al alto crecimiento urbano, principalmente en la ciudad de Mérida.

En Yucatán, la única fuente de abastecimiento de agua potable es el agua subterránea, que es 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.

Esta contaminación puede tener dos orígenes:

- ***Antropogénico:*** Ocasionado por la falta de alcantarillado, fosas sépticas mal construidas o mal diseñadas y el fecalismo al aire libre.
- ***Origen natural:*** Ocasionada por la intrusión marina en la franja costera del y en algunas áreas del sur por la presencia de yesos en el subsuelo.

La fácil degradación de la calidad del agua es debido a las características tan particulares del subsuelo kárstico, lo que origina que el agua de la precipitación se infiltre rápidamente y arrastre cualquier sustancia que se encuentre en la superficie del terreno; provocando el deterioro en la calidad del agua de los sistemas de abastecimiento de las poblaciones.

En los siguientes puntos se mencionarán algunos de los problemas que se han detectado en el Estado, y que conllevan la degradación de la calidad del agua:

- 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 *(Dohering y Buttler, 1974).*

- 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. *(Graniel et al, 1999)*

- 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 estas 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 pesticidas no autorizados en el medio rural, fugas en gasolineras, residuos de peleterías y tiraderos de aceites

El uso inadecuado de productos agroquímicos y pesticidas 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.

2. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ESTUDIO

2.1 Muestreo del agua subterránea

Cada uno de estos pasos para obtener las muestras se ha realizado de manera repetitiva en todos los puntos de muestreo, a excepción de los manantiales (PM-8, PM-6 y PM-3) y de los exbasureros (EX -1 y EX-4), que en estos, la extracción fue lógicamente manual desde el punto de origen.

Pasos seguidos en los puntos de muestreo para la obtención de agua y su posterior análisis de pesticidas e isótopos:

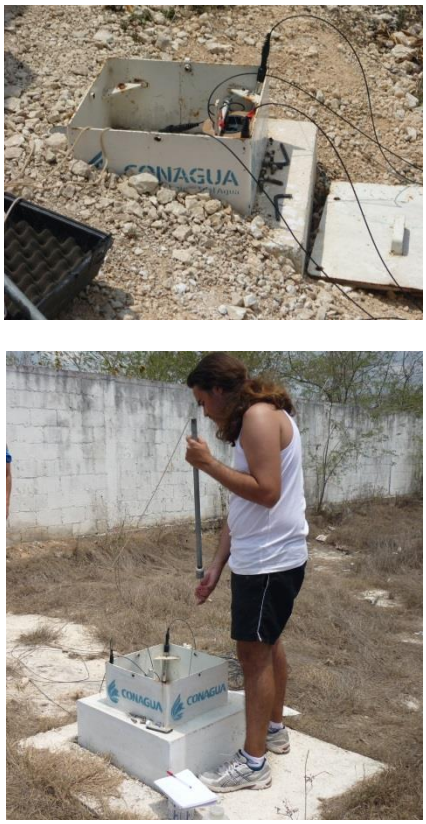
I) ***Medición del nivel piezométrico con una sonda***

II) ***Extracción del agua mediante una botella WILDCO, con capacidad de 1,5 litros***

III) ***Muestreo de los parámetros de temperatura, pH y conductividad eléctrica***

IV) ***Relleno de la botella con el fin de análisis de pesticidas***

V) ***Filtrado*** **y** ***relleno de los viales para isotopía***



Fotografía 1: Arriba: Punto de muestreo. Abajo: Introducción de la botella Wildco en la captación

Fotografía 2: Arriba: Relleno del agua subterránea extraída mediante la botella Wildco. Abajo: Medición de los parámetros de la muestra de agua.

La metodología utilizada para la extracción de agua en los pozos, con el objetivo de los análisis de elementos trazas y elementos mayores, ha sido la siguiente:

I) Medición del nivel piezométrico de los mismos mediante una sonda

II) Medición de los parámetros de conductividad eléctrica, pH, temperatura, oxígeno disuelto, potencial redox y sólidos en suspensión, en una fracción de minutos determinada, mediante un Hydrolop directamente desde el pozo

III) Extracción, mediante la botella WILDCO (1,5 litros), del agua subterránea

IV) Filtración y posterior acidificación con gotas de ácido sulfúrico

Fotografía 3: Arriba: Sonda piezométrica. Abajo: Introducción de la botella Wildco en la captación.

2.2 Análisis en el laboratorio

Los siguientes elementos fueron analizados en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería, en la Universidad Autónoma de Yucatán a excepción de los elementos trazas, que fueron analizados en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, a cargo del Dr. Antonio Cardona.

2.2.1 Análisis de la concentración de sodio y potasio

Para la obtención de la concentración de sodio y potasio en la muestra de agua, ha sido necesaria la realización de los siguientes pasos:

I) Filtración de la muestra en campo.

II) Acidificación hasta obtener un valor pH de 2

II) Introducción de cada una de las muestras en un Espectrómetro de Absorción Atómica para la obtención de la curva de sodio y potasio

2.2.2 Análisis de los pesticidas

A la hora de proceder al análisis de los pesticidas, los siguientes puntos reflejados a continuación representan el procedimiento que se llevó a cabo para el mismo:

I) Deposición en el ultrasonido con detergente "extran" al 20% y deposición en el horno para secado

II) Preparación de la curva de calibración del aparato (CLP Organochlorine Pesticide Mix)

Extracción de los plaguicidas en fase líquida

I) Inyección de los viales con las muestras al cromatógrafo de gases y análisis de las muestras

Extracción de los plaguicidas en fase sólida

I) Filtrado de las muestras para eliminar impurezas

II) Retención de los compuestos organoclorados a través de un cartucho de C18, adicionando 500 ml de cada muestra

III) Análisis de las muestras en un cromatógrafo de gases acoplado a un detector de captura de electrones

IV) Cuantificación de los plaguicidas mediante el cálculo de las concentraciones de analitos con la siguiente fórmula que se muestra a continuación:

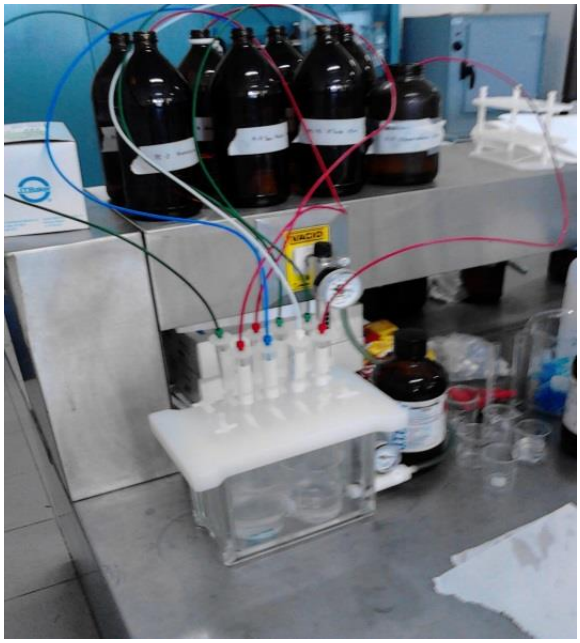
$$[\boldsymbol{analito}] = \frac{\boldsymbol{área\ del\ analito}}{\boldsymbol{área\ OVEX}}\ \boldsymbol{x}\ [\boldsymbol{ovex}]\ \boldsymbol{x}\ (\boldsymbol{FR})$$

<u>Siendo</u>:

[analito] = Concentración de plaguicida

[ovex] = concentración de OVEX

FR = Factor de respuesta



Fotografía 4: Arriba: Filtración de las muestras. Abajo: Retención de los compuestos organoclorados

2.2.3 Análisis de los elementos traza

Para el análisis de los elementos trazas en el laboratorio, se llevó a cabo un procedimiento determinado que se muestra a continuación:

I) Ionización para la extracción de un electrón de la capa exterior del átomo, produciéndose junto al electrón, un ión con carga positiva

II) Detección a través de la separación de los iones positivos mediante un filtro de masas

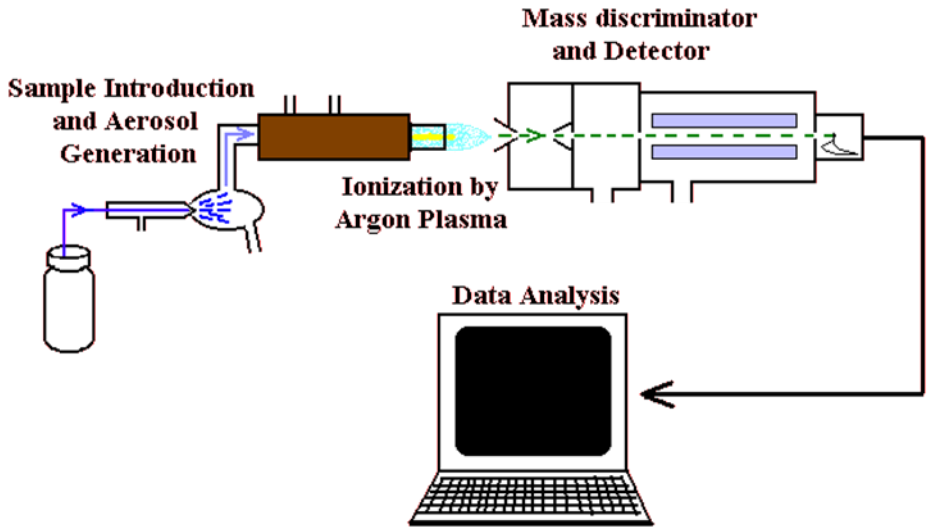


Figura 6: Gráfico del equipo y procedimiento del análisis de los elementos traza.

Para observar al detalle el procedimiento de análisis de cada elemento en laboratorio consultar los anexos de contenidos (Página 64).

3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS Y COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS:

Los datos que se representan a continuación (Tabla 2) fueron tomados durante el mismo muestreo sin necesidad de ser analizados en el laboratorio; el equipo utilizado para la realización del mismo fue una sonda piezométrica, un conductivímetro, y un pHmetro.

Referencia	Ubicación	Prof. Total (m)	Prof.N.Piez. (m)	pH	Temperatura (°C)	C.E. (µS/cm)
P-1	**Megalita**	50	20	6,95	30,0	1.117
P-2	**Granjas Crío**	50	10	6,99	28,4	1.029
P-3	**BAAG**	40	10	6,95	28,3	1.015
P-4	**Sac-Nicté**	50	20	6,94	28,8	1.217
P-5	**Dzizilché**	40	10	6,21	28,6	2.520
P-6	**Sierra Papacal**	40	10	6,89	28,7	2.220
P-7	**San Miguel**	40	10	7,09	29,8	2.630
P-8	**Cheuman**	50	10	6,96	28,3	1.332
P-9	**Ucú**	60	10	7,08	29,9	1.188
P-10	**Anicabil**	40	10	7,00	30,1	740
P-11	**Unidad Deportiva del Sur**	60	20	7,13	29,2	1.207
P-12	**Bomberos**	50	25	7,07	31,0	1.209
P-13	**Tecnológico**	52	20	7,06	29,9	1.001
P-14	**Sagarpa**	54	20	7,02	29,6	1.034
P-15	**Pacabtun**	52	20	7,17	30,0	998
P-16	**Tixcuytun**	57	20	7,00	27,9	1.151
P-17	**Observatorio**	54	20	7,16	29,8	1.183
P-18	**Chalmuch**	55	25	7,03	29,5	2.250
P-19	**Acuaparque**	55	25	7,16	29,0	913
P-20	**Chenku**	50	20	7,10	30,1	1.066
P-21	**CONAGUA**	60	20	6,97	29,0	986
PC-1	**Matemáticas**	60	20	6,96	28,2	995
PC-2	**Komchén**	50	20	6,97	28,8	1.344
PC-3	**PREDECO**	50	15	6,97	29,0	1.514
PC-4	**Contenedores**	52	6	7,00	29,3	1.691
PC-6	**Mococha**	54	20	6,89	26,9	1.006
PC-7	**Hacienda Too**	52	20	6,94	27,8	1.138
PC-8	**X`luch**	57	15	6,95	29,3	1.826
PC-9	**Vázquez**	54	5	7,00	29,0	951
PM - 3	**Manantial**	____	____	6,94	29,0	2.660
PM - 6	**Manantial**	____	____	6,96	29,0	2.780
PM - 8	**Manantial**	____	____	6,98	29,3	2.610
EX - 1	**Basurero**	____	____	6,90	28,6	2.600
EX - 4	**Basurero**	____	____	6,95	28,0	2.370

Tabla 2: Valores de las mediciones realizadas en los mismos puntos de muestreo. {C.E=Conductividad Eléctrica}

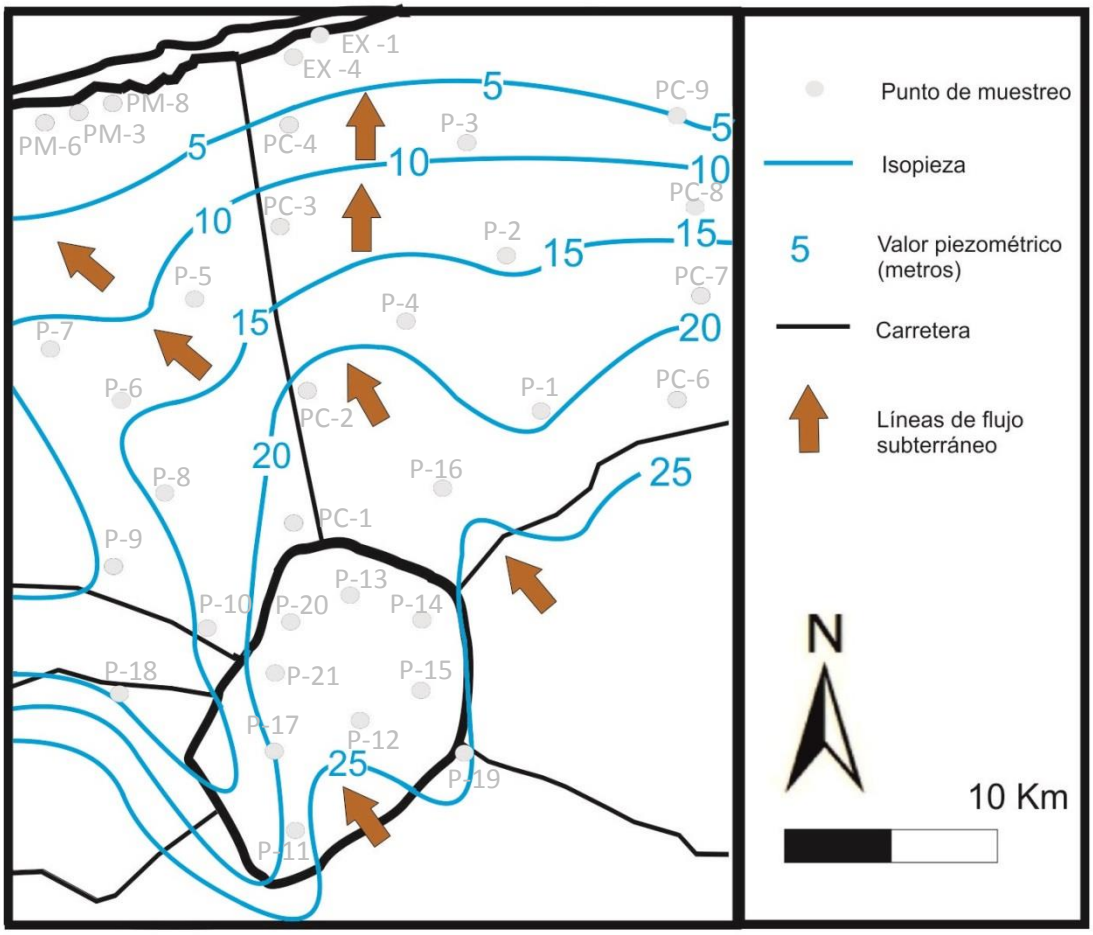


Figura 7: Piezometría en el sector "Mérida-Progreso"

Como se observa en el mapa piezométrico (Fig.7), el flujo subterráneo del agua en nuestra zona de estudio se dirige en dirección Sur - Norte y en dirección Sur – Noroeste.

No es una zona en la que existen captaciones de agua subterránea importantes, por lo cual, los flujos subterráneos no se ven alterados ni modificados por este fenómeno. Observando detenidamente la figura representada, los niveles piezométricos obtenidos en los puntos de muestreo van desde los 25 hasta los 5 metros aproximadamente.

pH:

El valor de pH oscila entre 6,89 y 7,17; son unos valores normales, observamos que en el punto de muestreo P-5, correspondiente a Dzizilché, el valor del mismo es de 6,21; es un valor más ácido de lo habitual (Fig.8).

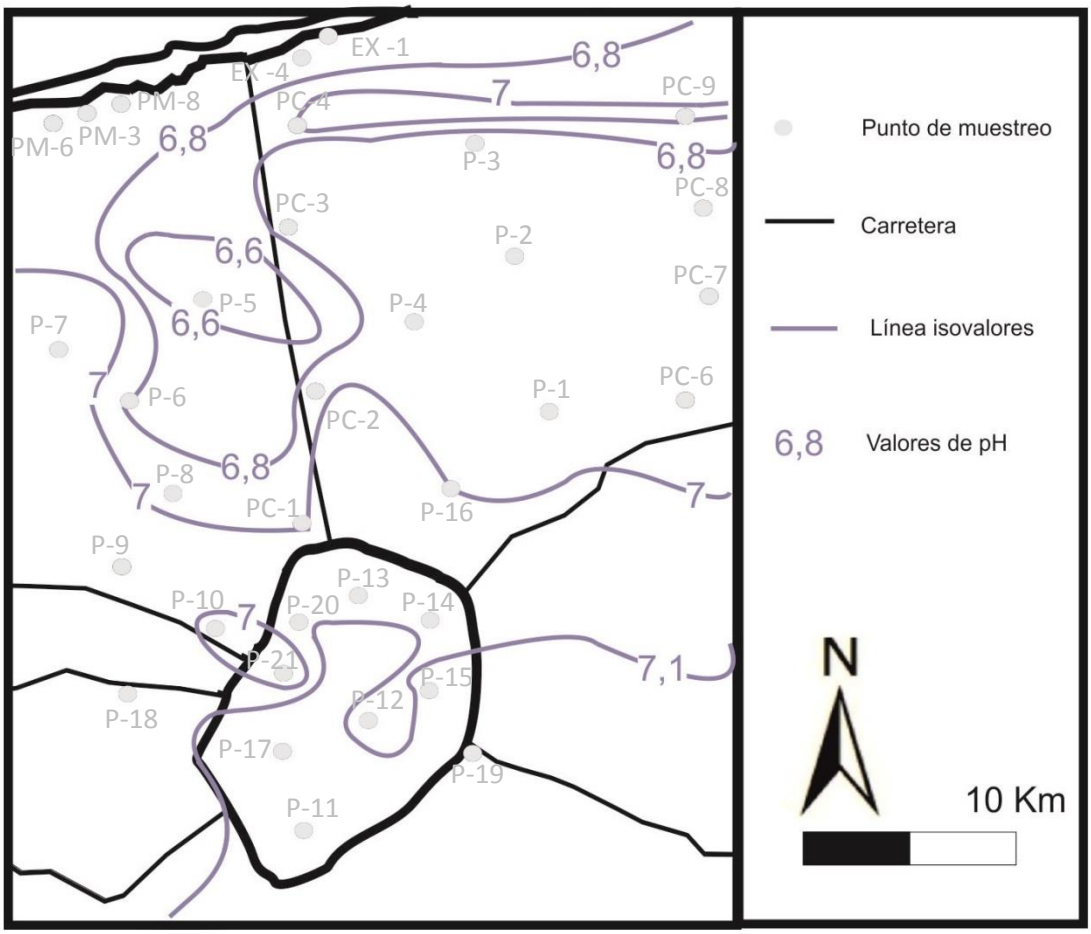


Figura 8: Isovalores de pH en la zona de estudio

Conductividad Eléctrica:

Los valores de la conductividad eléctrica en este estudio, rondan valores situados entre los 740 y 2630 µS/cm.

Así mismo, se representa un mapa con las isolíneas propias y dirección de flujo, según los datos reflejados con anterioridad.

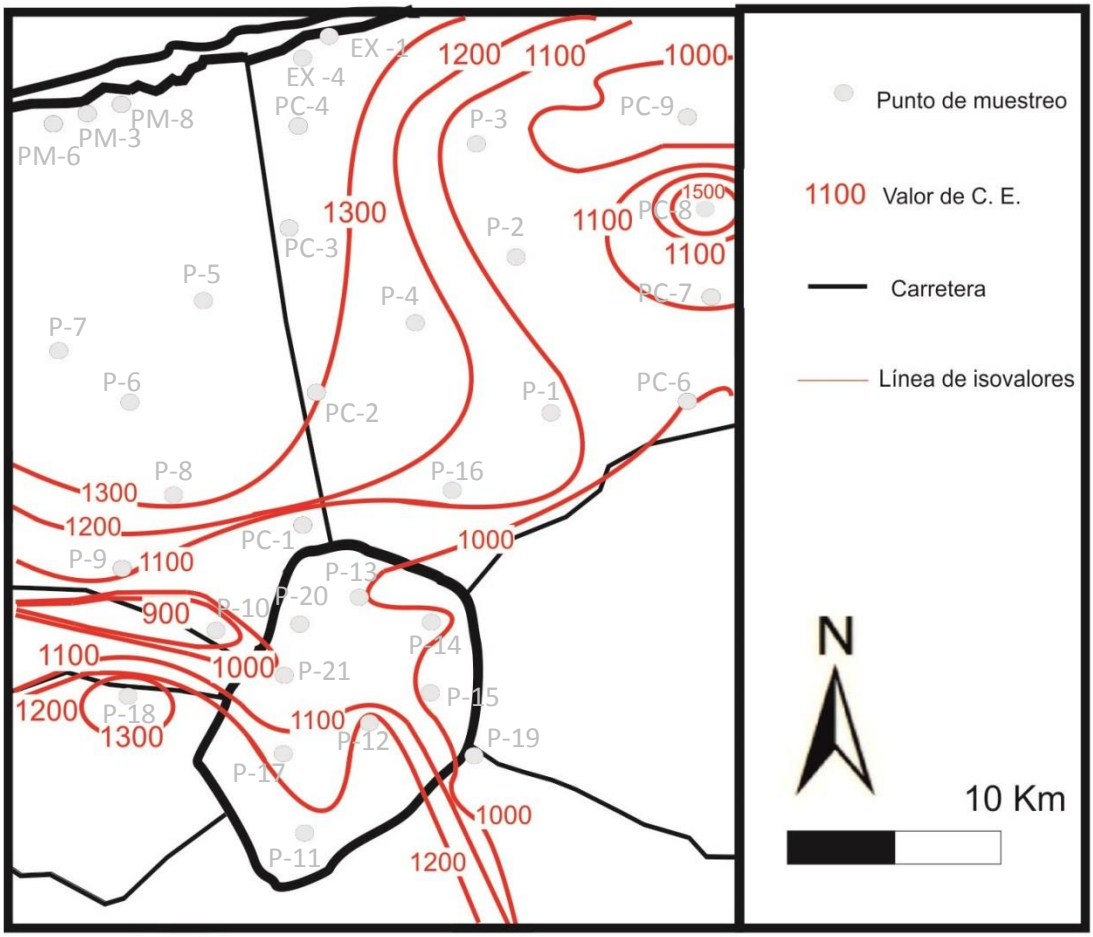


Figura 9: Isovalores de Conductividad Eléctrica (µS/cm) en la zona de estudio.

Temperatura:

Debido a las características climáticas, hacen que la temperatura del agua subterránea en esta zona del mundo sea elevada, como se puede comprobar en la figura, la temperatura suele rondar entre 27 y 30°C.

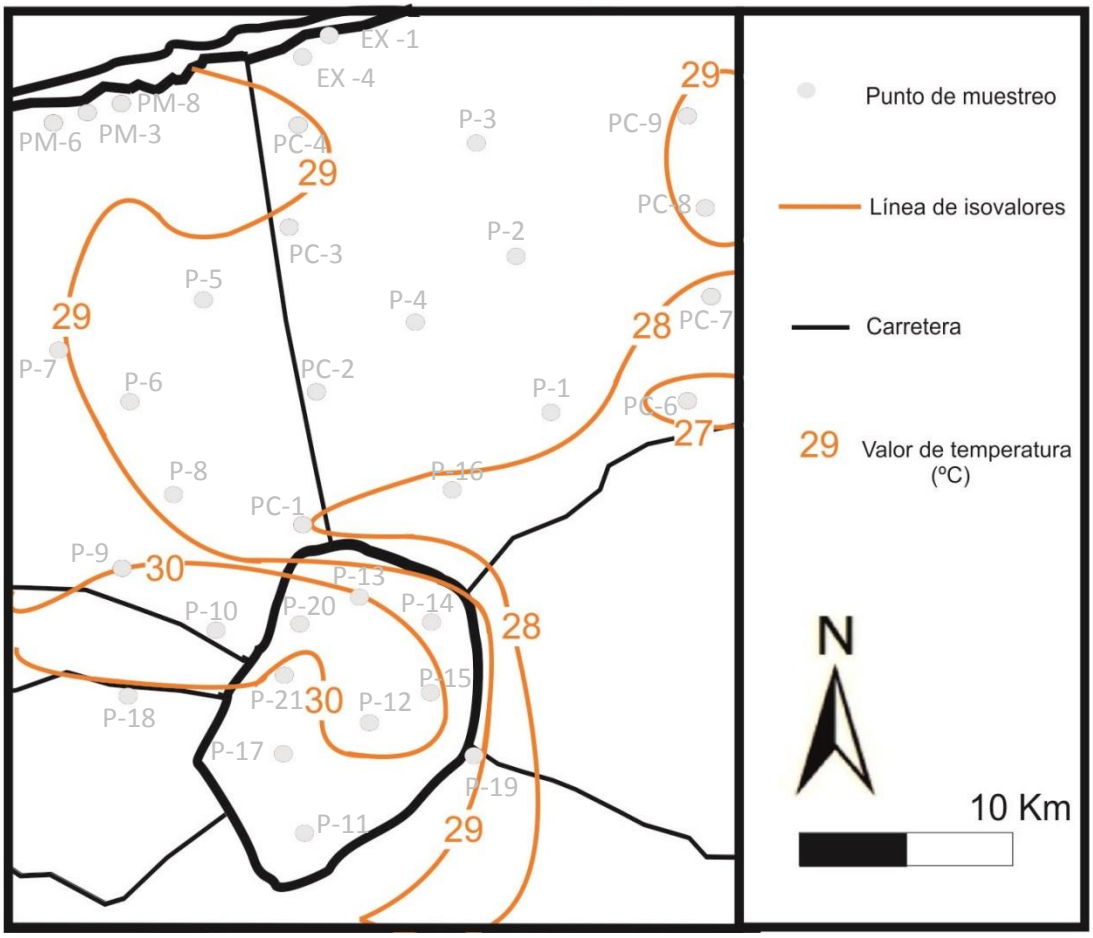


Figura 10: Isovalores de Temperatura (°C) en la zona de estudio

3.1. Contenido iónico mayoritario

REFERENCIA	UBICACIÓN	Profundidad	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	NO_3^{2-}
P-1	MEGALITA	10m	106,4	41,6	85,9	5,0	412,4	185,6	35,6	17,8
P-2	CRIO	10m	107,9	36,0	71,4	4,0	414,8	150,9	34,3	19,8
P-3	BAAG	10m	108,7	29,1	72,4	4,2	414,8	152,9	37,0	17,8
PC-6	MOCOCHA	10m	112,5	24,0	63,4	2,6	402,6	132,0	26,2	16,5
PC-7	HDA. TOO	20m	98,8	36,9	86,7	4,3	429,4	184,6	44,0	17,4
PC-8	IXLUCH	10m	106,4	69,3	213,2	10,7	453,8	446,7	102,0	26,7
PC-9	VAZQUEZ	10m	129,2	18,5	62,8	3,3	424,6	129,0	31,3	12,0
P-6	SIERRA PAPACAL	10m	127,7	50,8	288,8	10,9	439,2	446,7	106,3	20,3
P-7	SAN MIGUEL	10m	109,4	67,4	347,5	13,8	439,2	665,0	132,0	21,2
P-8	CHEUMAN	10m	106,4	41,6	126,6	10,7	414,8	254,1	57,8	20,3
P-9	UCU	10m	121,6	29,5	100,9	4,4	439,2	200,5	46,2	24,4
P-10	ANICABIL	10m	114,0	14,8	44,4	2,9	370,9	85,4	33,5	26,3
P-11	UNID. DEPORTIVA SUR	20m	114,0	41,6	102,1	5,3	407,5	208,4	35,6	23,7
P-15	PACABTUN	20m	103,4	12,9	57,6	2,3	439,2	89,3	29,4	37,1
P-17	OBSERVATORIO	20m	98,8	32,3	101,6	5,3	390,4	168,7	49,0	30,5
P-18	CHALMUCH	25m	111,0	61,9	285,9	11,0	449,0	565,8	191,9	17,2
P-19	ACUAPARQUE	25m	116,3	12,5	65,2	1,4	329,4	152,9	15,7	18,9
PC-2	KOMCHEN	20m	118,6	21,7	123,4	11,5	424,6	248,1	53,4	16,0
PC-3	PREDECO	15m	121,6	42,5	138,8	26,7	458,7	289,8	69,0	35,2
PC-4	CONTENEDORES	6m	106,4	48,0	184,1	10,2	449,0	366,3	83,2	9,6
P-4	SAC-NICTE	20m	95,0	48,5	1462,8	39,6	444,1	1985,2	429,1	3,8
P-5	DZIDZILCHEN	10m	126,2	57,3	868,4	28,9	478,2	1389,6	117,1	14,1
P-12	BOMBEROS	25m	114,0	29,1	102,8	11,8	388,0	188,6	71,3	38,4
P-16	TIXCUYTUN	20m	106,4	36,0	85,4	4,7	414,8	168,7	110,3	21,2
P-21	CON-AGUA	20m	115,5	15,2	81,3	4,4	361,1	139,0	55,2	34,2
P-14	SAGARPA	20m	91,2	29,5	88,7	4,3	390,4	168,3	52,9	5,1
P-20	CHENKU	20m	86,6	23,5	97,7	4,4	341,6	186,5	53,9	34,6
PC-1	MATEMATICAS	20m	88,2	24,5	76,6	3,9	366,0	141,9	44,6	30,3
P-13	TECNOLOGICO	20m	98,6	42,2	94,3	5,2	353,8	164,2	57,7	12,4
EX -1	EXBASURERO-01	Nivel freático	144,3	81,3	551,5	21,6	439,2	740,1	176,1	13,9
EX -4	EXBASURERO-04	Nivel freático	149,6	80,2	1199,8	45,7	444,1	1368,7	529,0	14,0
PM-3	MANANTIAL-03	Nivel freático	139,0	77,0	355,8	14,2	444,1	719,8	215,3	10,7
PM-6	MANANTIAL-06	Nivel freático	142,6	72,7	373,7	14,7	436,8	755,3	227,1	9,9
PM-8	MANANTIAL -08	Nivel freático	125,0	86,6	349,5	13,9	444,1	709,7	243,1	9,7

Tabla 3: Representación de los cationes y aniones en mg/L obtenidos en las muestras de agua. Campaña Mayo 2013

REFERENCIA	UBICACIÓN	Profundidad	Ca^{2+}	Na^{+}	K^{+}	∑Anion	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	NO_3^{2-}	∑Cation	ERROR%
P-1	MEGALITA	10m	5,3	3,7	0,1	12,6	6,8	5,2	0,7	0,3	13,0	1,58
P-2	CRIO	10m	5,4	3,1	0,1	11,6	6,8	4,3	0,7	0,3	12,1	2,16
P-3	BAAG	10m	5,4	3,1	0,1	11,1	6,8	4,3	0,8	0,3	12,2	4,64
PC-6	MOCOCHA	10m	5,6	2,8	0,1	10,4	6,6	3,7	0,5	0,3	11,1	3,26
PC-7	HDA. TOO	20m	4,9	3,8	0,1	11,9	7,0	5,2	0,9	0,3	13,4	6,22
PC-8	IXLUCH	10m	5,3	9,3	0,3	20,6	7,4	12,6	2,1	0,4	22,6	4,65
PC-9	VAZQUEZ	10m	6,5	2,7	0,1	11,0	7,0	3,6	0,6	0,2	11,4	2,91
P-6	SIERRA PAPACAL	10m	6,4	12,6	0,3	23,4	7,2	12,6	2,2	0,3	22,3	-2,35
P-7	SAN MIGUEL	10m	5,5	15,1	0,4	26,5	7,2	18,8	2,7	0,3	29,0	4,58
P-8	CHEUMAN	10m	5,3	5,5	0,3	14,5	6,8	7,2	1,2	0,3	15,5	3,23
P-9	UCU	10m	6,1	4,4	0,1	13,0	7,2	5,7	1,0	0,4	14,2	4,38
P-10	ANICABIL	10m	5,7	1,9	0,1	8,9	6,0	2,4	0,7	0,4	9,6	3,69
P-11	UNID. DEPORTIVA SUR	20m	5,7	4,4	0,1	13,7	6,7	5,9	0,7	0,4	13,7	-0,08
P-15	PACABTUN	20m	5,2	2,5	0,1	8,8	7,2	2,5	0,6	0,6	10,9	10,79
P-17	OBSERVATORIO	20m	4,9	4,4	0,1	12,2	6,4	4,8	1,0	0,5	12,7	2,05
P-18	CHALMUCH	25m	5,5	12,4	0,3	23,4	7,4	16,0	4,0	0,3	27,6	8,28
P-19	ACUAPARQUE	25m	5,8	2,8	0,0	9,7	5,4	4,3	0,3	0,3	10,3	3,15
PC-2	KOMCHEN	20m	5,9	5,4	0,3	13,4	7,0	7,0	1,1	0,3	15,3	6,8
PC-3	PREDECO	15m	6,1	6,0	0,7	16,3	7,5	8,2	1,4	0,6	17,7	4,1
PC-4	CONTENEDORES	6m	5,3	8,0	0,3	17,6	7,4	10,3	1,7	0,2	19,6	5,45
P-4	SAC-NICTE	20m	4,8	63,6	1,0	73,4	7,3	56,0	8,9	0,1	72,3	-0,75
P-5	DZIDZILCHEN	10m	6,3	37,7	0,7	49,5	7,8	39,2	2,4	0,2	49,7	0,17
P-12	BOMBEROS	25m	5,7	4,5	0,3	12,9	6,4	5,3	1,5	0,6	13,8	3,41
P-16	TIXCUYTUN	20m	5,3	3,7	0,1	12,1	6,8	4,8	2,3	0,3	14,2	7,85
P-21	CONAGUA	20m	5,8	3,5	0,1	10,7	5,9	3,9	1,1	0,5	11,5	3,87
P-14	SAGARPA	20m	4,6	3,9	0,1	11,0	6,4	4,7	1,1	0,1	12,3	5,85
P-20	CHENKU	20m	4,3	4,2	0,1	10,6	5,6	5,3	1,1	0,6	12,5	8,23
PC-1	MATEMATICAS	20m	4,4	3,3	0,1	9,9	6,0	4,0	0,9	0,5	11,4	7,33
P-13	TECNOLOGICO	20m	4,9	4,1	0,1	12,6	5,8	4,6	1,2	0,2	11,8	-3,34
EX -1	EXBASURERO-01	Nivel freático	7,2	24,0	0,5	38,5	7,2	20,9	3,7	0,2	32,0	-9,22
EX -4	EXBASURERO-04	Nivel freático	7,5	52,2	1,2	67,4	7,3	38,6	11,0	0,2	57,1	-8,27
PM-3	MANANTIAL-03	Nivel freático	7,0	15,5	0,4	29,1	7,3	20,3	4,5	0,2	32,2	5,04
PM-6	MANANTIAL-06	Nivel freático	7,1	16,2	0,4	29,8	7,2	21,3	4,7	0,2	33,4	5,7
PM-8	MANANTIAL -08	Nivel freático	6,2	15,2	0,4	29,0	7,3	20,0	5,1	0,2	32,5	5,79

Tabla 4: Representación de los valores de los cationes y aniones en meq/L con su respectivo sumatorio en cada punto de muestreo y error en %.

3.1.1 Diagrama de Piper

En el Diagrama de Piper (Fig.11), se clasificó en diversos grupos todas las muestras obtenidas del agua subterránea en referencias a distintos factores, como son las diferentes facies hidroquímicas principalmente, además de su localización geográfica y las características particulares de la ubicación como las diversas actividades y fenómenos del lugar.

Las muestras con **facies cloruradas sódicas** se encuentran en el **GRUPO 1**, coincidiendo además con la ubicación de las mismas, que se encuentran en la zona Noroeste del área de estudio. El **GRUPO 4** está formado por un único punto (P-18), equivalente a Chalmuch; también posee un agua con una facie clorurada sódica, al igual que las muestras incluidas en el primer grupo mencionado con anterioridad, la concentración de los diversos compuestos iónicos en este punto se debe a la aportación del agua subterránea procedente de la ciudad de Mérida, situada al Sureste del mismo, junto con los depósitos sanitarios localizados alrededor.

El resto de puntos de muestreos distribuidos a lo largo de toda el área de estudio, con unas **facies bicarbonatadas cálcicas**, se encuentran encasillados dentro del **GRUPO 2** a excepción del punto de muestreo P-4 perteneciente a Sac-Nicté, este último posee una **facie clorurada cálcica** debido a una posible intrusión marina, este punto se encuentra dentro del **GRUPO 3.**

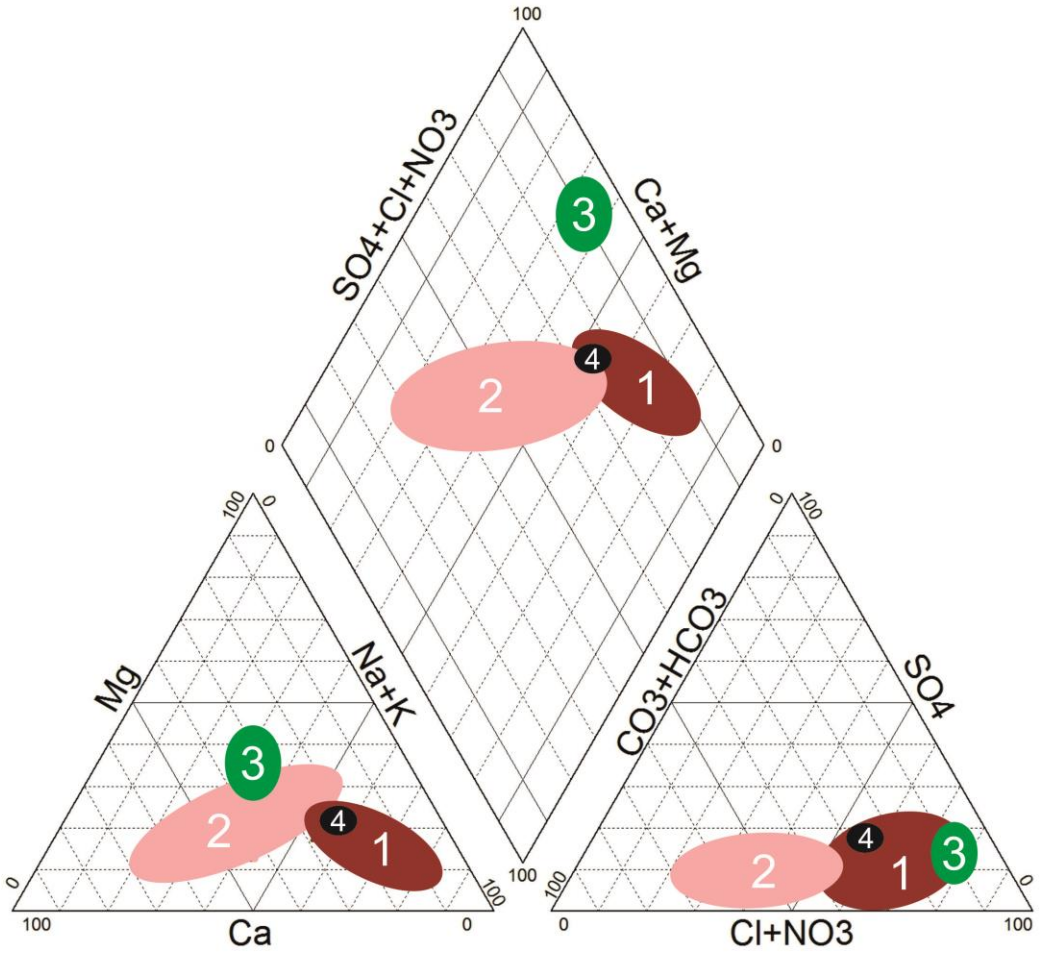


Figura 11: Diagrama de Piper con cuatro agrupaciones dependiendo de su facie hidroquímica y localización

3.1.2 Diagramas de Stiff

En la figura (Fig.12), se encuentran representadas y clasificadas las diferentes **facies hidroquímicas** de las muestras de agua obtenidas en los diversos puntos de muestreo.

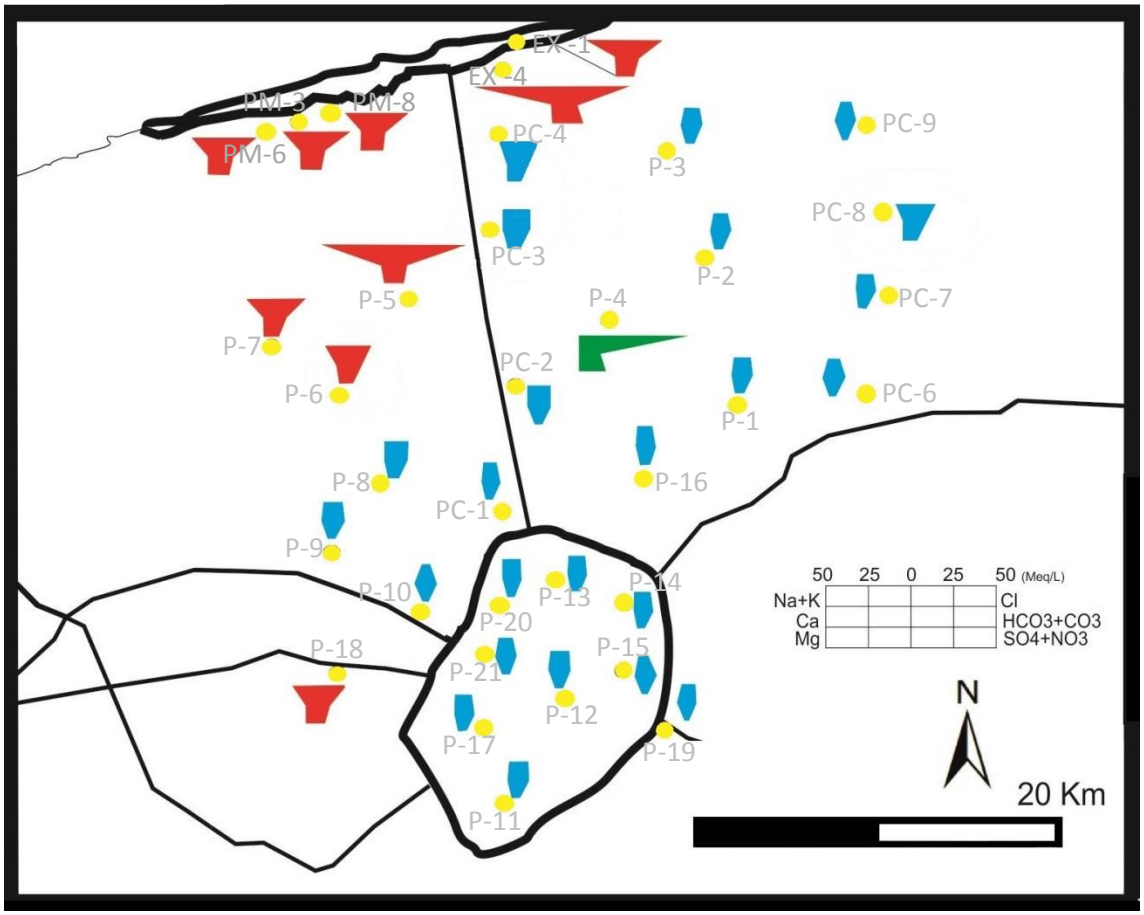


Figura 12: Distribución de las diversas facies hidroquímicas en la zona de estudio.
Rojo: Cloruradas sódicas **Azul: Bicarbonatadas cálcicas** **Verde: Clorurada cálcica**

Las muestras obtenidas en el basurero, representan un tipo de agua **clorurada sódica**, al igual que el agua de los manantiales y el punto correspondiente a Chalmuch (P-18), situado al Suroeste; el resto de los puntos de muestreo sin embargo, pertenecen a un agua **bicarbonatada cálcica** a excepción de Sac-Nicté (P-4) que posee una facie hidroquímica **clorurada cálcica** debido a la acción antrópica y a una posible intrusión marina.

Debido a la geología del lugar, las facies hidroquímicas estarían condicionadas por el mismo acuífero kárstico, haciendo que las muestras obtenidas fueran carbonatadas cálcicas, los diversos cambios observados se deben a diversas actividades producida por la presión humana, como puede ser la actividad industrial, agrícola y urbana.

Bicarbonatos:

La presencia de HCO_3^- se debe al ataque químico de las calizas por acción del agua de lluvia con contenido en CO_2. En este mismo proceso se origina el Ca^{2+} y el Mg^{2+}. Los valores en contenido de HCO_3^- están comprendidos entre 5 y 8 meq/l, como se puede observar en la Fig 18.

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2\,(HCO_3^-)$$
$$MgCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow Mg^{2+} + 2\,(HCO_3^-)$$

Otro origen del HCO_3^- en el agua subterránea del lugar, es el antrópico. Por contaminación, y debido a la oxidación de la materia orgánica.

En el Estado de Yucatán, fuera de las grandes ciudades, existen pequeños pueblos y aldeas en donde la red de alcantarillado y las redes de aguas fecales están en mal estado e incluso son inexistentes. Esto, sumado a la actividad ganadera del lugar, potencia este fenómeno que sin duda, es uno de los principales focos de contaminación del acuífero kárstico, que por sus características, hace que se infiltre todo el desecho contenido en el agua de recarga, contaminando el acuífero.

Sulfatos:

Los SO_4^{2-} vemos que abundan en los manantiales y en los ex-basureros, además de una manera puntual en Sac-Nicté (P-4), Bomberos (P-12) y Chalmuch (P-18) (Fig. 13).

Las muestras recogidas en los manantiales (PM-3, PM-6 y PM-8), junto con la de los ex -basureros (EX -1 y EX -4), se obtuvieron muy cerca de la ciudad de Progreso, al Norte del Estado (Fig. 13); coincidiendo con el lugar donde se concentran las actividades industriales, agrícolas y urbanas.

Hay que mencionar que la mayor parte de la contaminación por sulfatos mencionada en estos cinco puntos, proceden de origen antrópico pero no solo de esta zona industrializada y urbana, ya que como se representó en el mapa piezométrico (Fig. 7), los flujos subterráneos del agua van en dirección a estas zonas de muestreo, siendo un lugar de descarga y por tanto de concentración del SO_4^{2-} producido por las diversas actividades antrópicas en el centro y sur del lugar de estudio.

Sin embargo, las otras muestras se encuentran dispersas en otros lugares de la zona de estudio, como es el caso de Bomberos (P-12), cuya concentración se debe a la contaminación de las actividades urbanas de la ciudad de Mérida; los otros dos puntos donde existe una concentración elevada de este elemento son Sac-Nicté (P-4) y Chalmuch (P-18), situadas respectivamente en la zona centroeste y suroeste (Fig. 13).

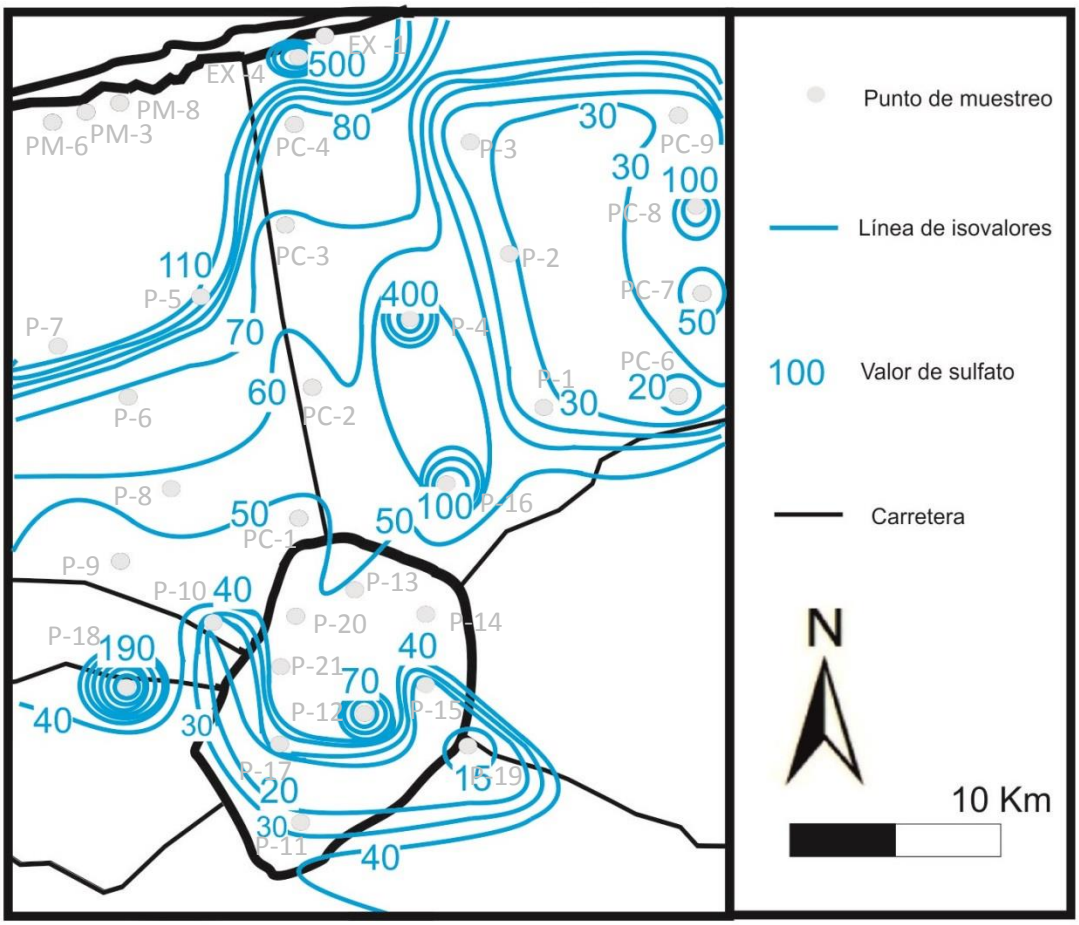


Figura 13: Isovalores de sulfato (mg/L) en el área de estudio

Teniendo en cuenta la **Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"**, se observa que hay una serie de puntos de muestreos en donde los límites permisibles correspondientes al sulfato se superan.

Estos puntos son EX -4 (correspondiente al exbasurero 4) y P-4 (cuya ubicación pertenece a Sac-Nicté).

Esta normativa indica que el límite máximo permitido de concentración de sulfato en aguas subterráneas es de 400 mg/L.

En el muestreo realizado, se han obtenido unas concentraciones superiores a estas, concretamente se obtuvo un valor de concentración de sulfato de 529,0 mg/L en el exbasurero 4 (EX -4) y 429,1 mg/L en Sac-Nicté (P-4), superando la cifra establecida dentro de la legislación mexicana mencionada anteriormente y que actualmente se mantiene en vigor.

Compuestos nitrogenados:

Nitratos: Su mayor concentración se da en la ciudad de Mérida, su concentración está relacionada con las actividades urbanas.

Si observamos la (Fig. 14), además de la concentración en la ciudad de Mérida, existen otros puntos en los que la presencia de NO_3^- es mayor que en el resto del área de estudio, como es en PREDECO (PC-3), Ucú (P-9) y Chalmuch (P-18).

La elevada concentración en PC-3 se debe tanto a la actividad agrícola que se produce en las cercanías del lugar (Granjas Críos "P-2"), además de las actividades urbanas e industriales. Los puntos de Ucú y Chalmuch, P-9 y P-18 respectivamente, poseen una concentración parecida a la de los puntos de muestreo de la misma ciudad de Mérida, se debe a que son zonas con una actividad urbana e industrial considerable.

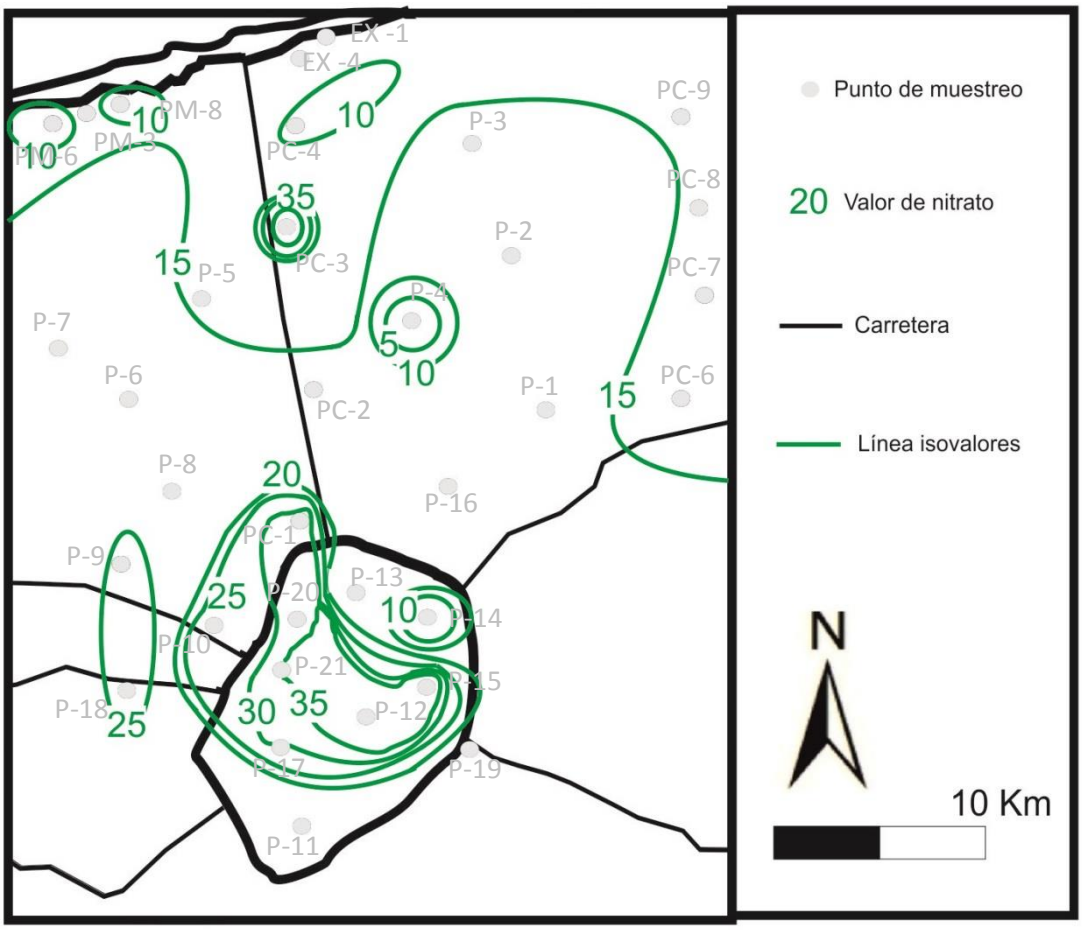


Figura 14: Isovalores de nitrato (mg/L) en el área de estudio

Nitritos y Nitrógeno total Kjeldahl: Los valores de nitrito y de nitrógeno total kjeldahl (que es una unidad que refleja la suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas y NH_4^+) están presentes como resultado de la reducción microbiana de los nitratos. La presencia del NO_2^- es un indicio de contaminación reciente, dada su inestabilidad.

$$NO_3^- \leftrightarrow NO_2^- + ½\ O_2 \leftrightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O \leftrightarrow ½\ O_2 + NH_4^+$$

Esta reducción se observa claramente en Sac-Nicté (P-4), donde la concentración de NO_3^- es baja con respecto a los valores observados (Fig. 14), además de la presencia de nitrito y nitrógeno total kjeldahl en otros puntos (Fig. 15) y (Fig.16).

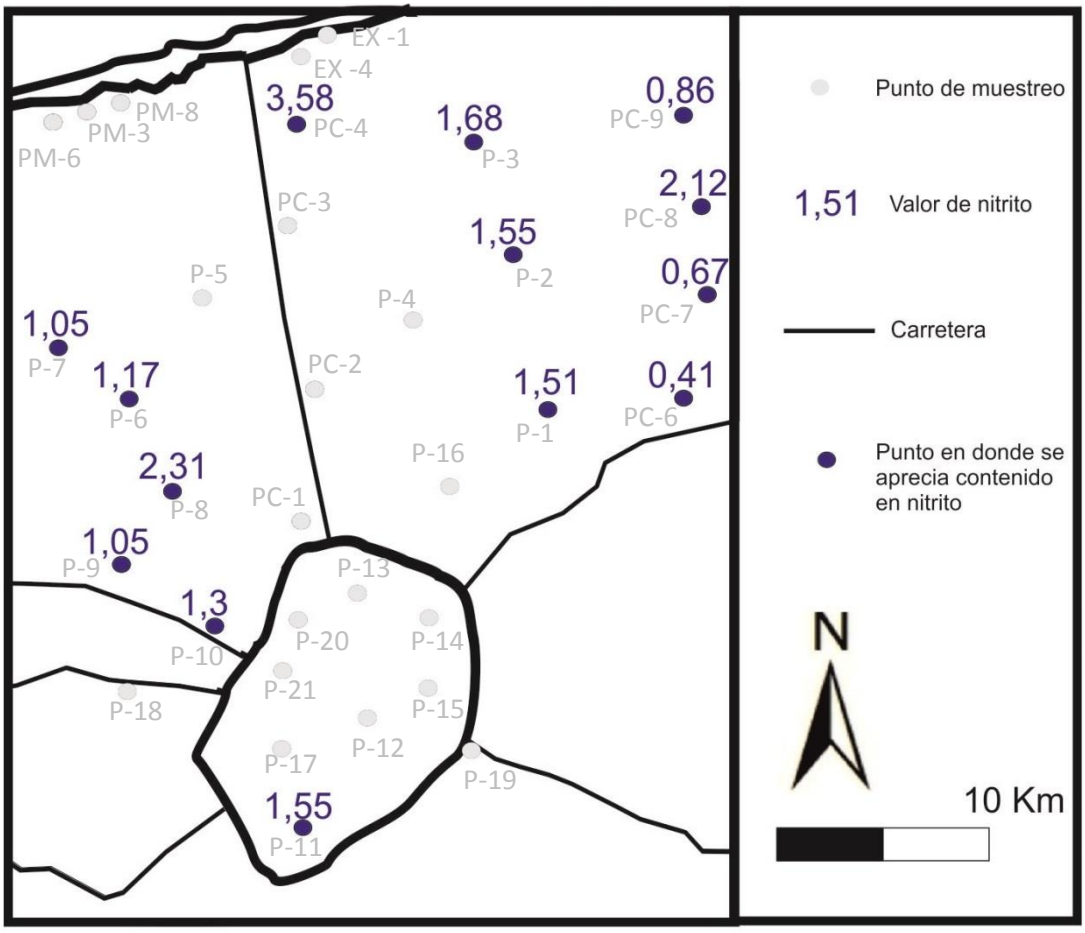


Figura 15: Isovalores de nitrito (mg/L) en el área de estudio

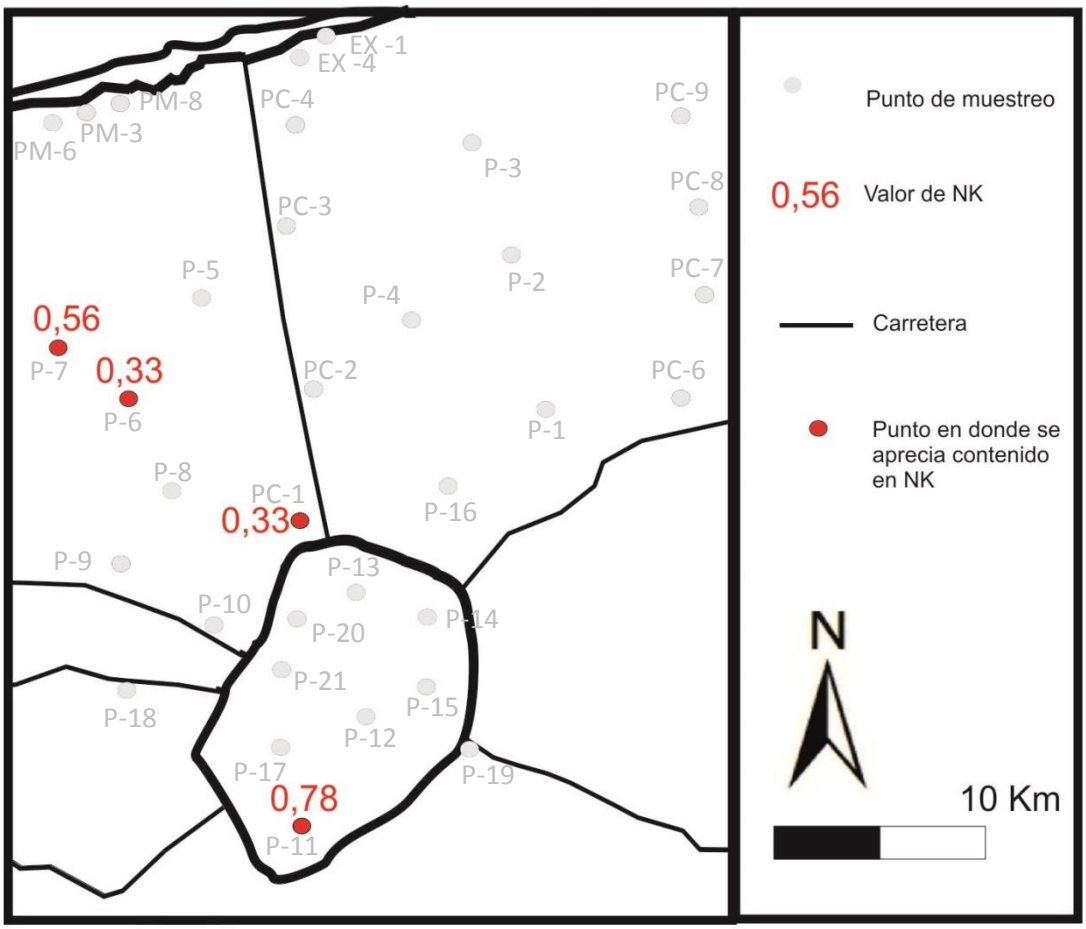


Figura 16: Isovalores de NK (mg/L) en el área de estudio

Siguiendo la misma legislación mencionada en el anterior apartado referente a los sulfatos, observamos que hay una serie de puntos donde la concentración en nitritos supera la establecida por dicha norma.

No obstante, en ningún punto de muestreo, el límite establecido para el nitrato (50 mg/L) se ve superado.

La normativa estable como límite máximo de concentración 0,25 mg/L en nitritos para agua subterránea. Este valor se supera en los puntos P-11 (Unidad Deportiva del Sur), PC-1 (Matemáticas), P-6 (Sierra Papacal) y P-7 (San Miguel); con valores de concentración respectivos de 0,78 mg/L, 0,33 mg/L, 0,33 mg/L y 0,56 mg/L.

Sodio y Potasio:

Se observa en las (Fig. 17) y (Fig. 18) que los puntos con concentraciones mayores de Na^+ y K^+ se encuentran en la zona Norte de nuestra área de estudio, que engloba los puntos de los exbasureros (EX - 1 y EX - 4), además de las muestras correspondientes a Sac-NIcté (P-4) y Dzizilché(P-5).

Las líneas de isovalores siguen una forma geométrica similar en ambas figuras, las concentraciones de sodio y potasio están ligadas entre sí; por tanto se puede observar una presencia de intrusión marina en donde las concentraciones de estas dos sustancias son altas.

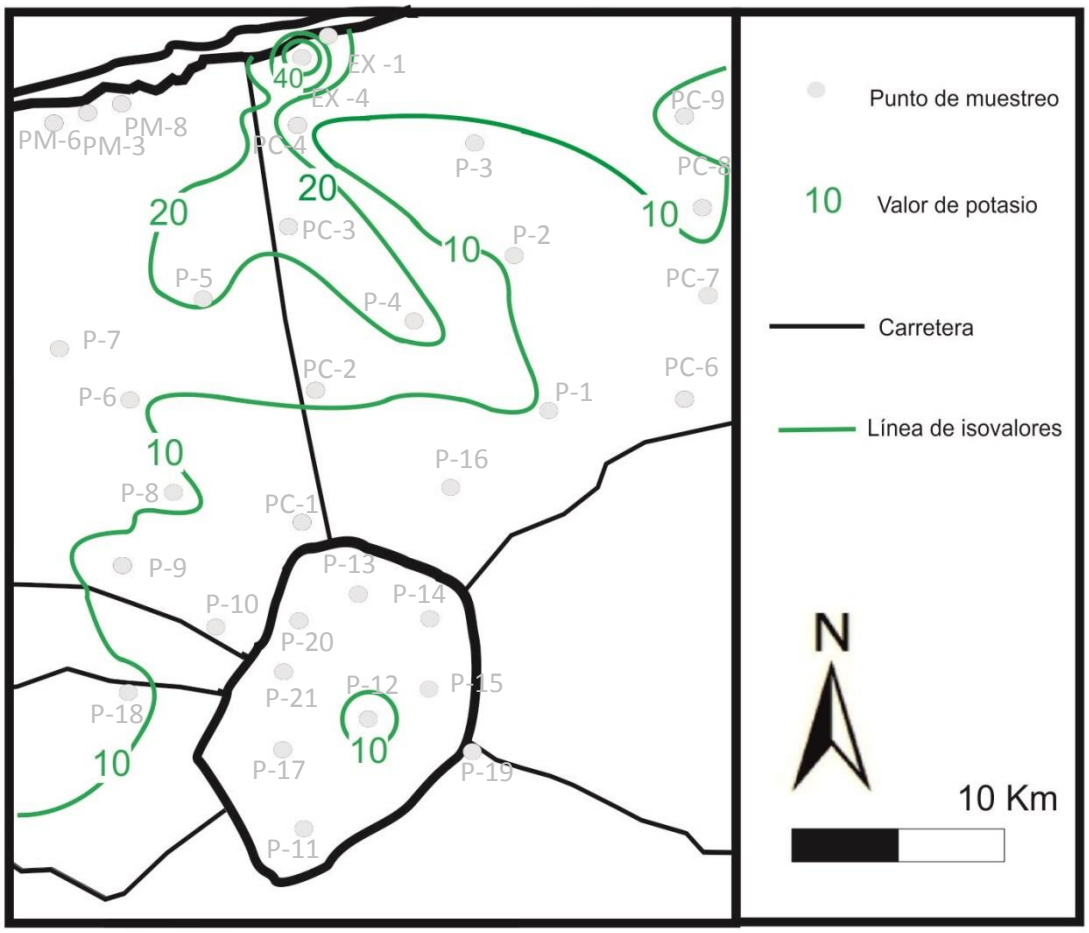


Figura 17: Isovalores de potasio (mg/L) en el área de estudio

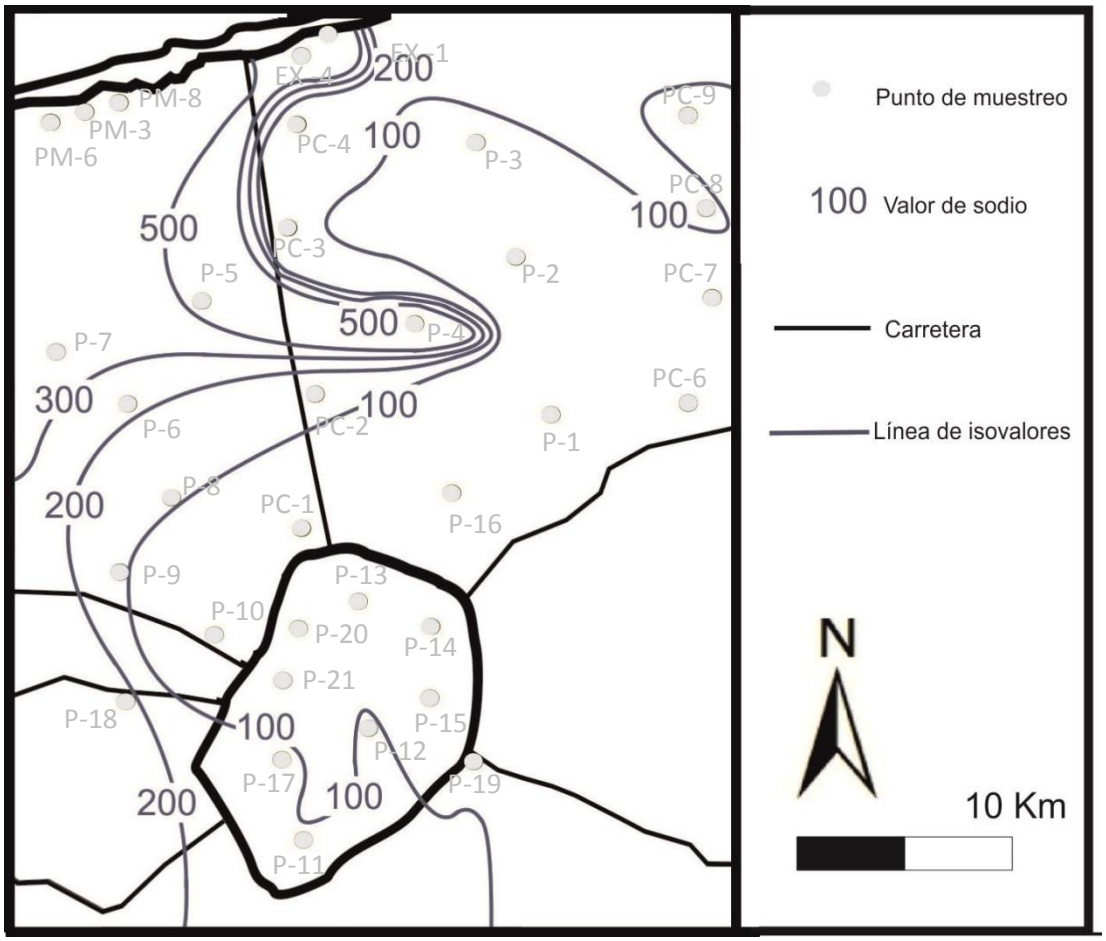


Figura 18: Isovalores de sodio (mg/L) en el área de estudio

Volviendo a citar la normativa mexicana vigente ya mencionada, establece que el límite máximo permisible para el sodio es de 200 mg/L.

Los puntos de muestreo situados en X`luch (PC-8), Sierra Papacal (P-6), San Miguel (P-7), Chalmuch (P-18), Sac-Nicté (P-4), Dzizilché (P-5), los dos exbasureros (EX -1 y EX -4) y en los tres manantiales (PM-3, PM-6 y PM-8) superan este valor umbral.

Cloruro:

Su concentración es elevada en los exbasureros, manantiales y en otros puntos como en Sac-Nicté (P-4) o Dzizilché (P-5).

Su contenido está asociado al de Na^+ y al K^+, si observamos la (Fig.19), los isovalores que representan la concentración del ión cloruro, sigue una forma geométrica similar a la de estos dos cationes mencionados anteriormente en el trabajo fin de Máster.

El Cl^-, al ser un ión conservativo, no forma sales de baja solubilidad ni se reduce ni se oxida; por lo cual, el análisis de este ión, junto con los de los otros dos cationes sodio y potasio, puede ser utilizado como un trazador ideal para observar que en nuestra zona de estudio se produce claramente una intrusión marina.

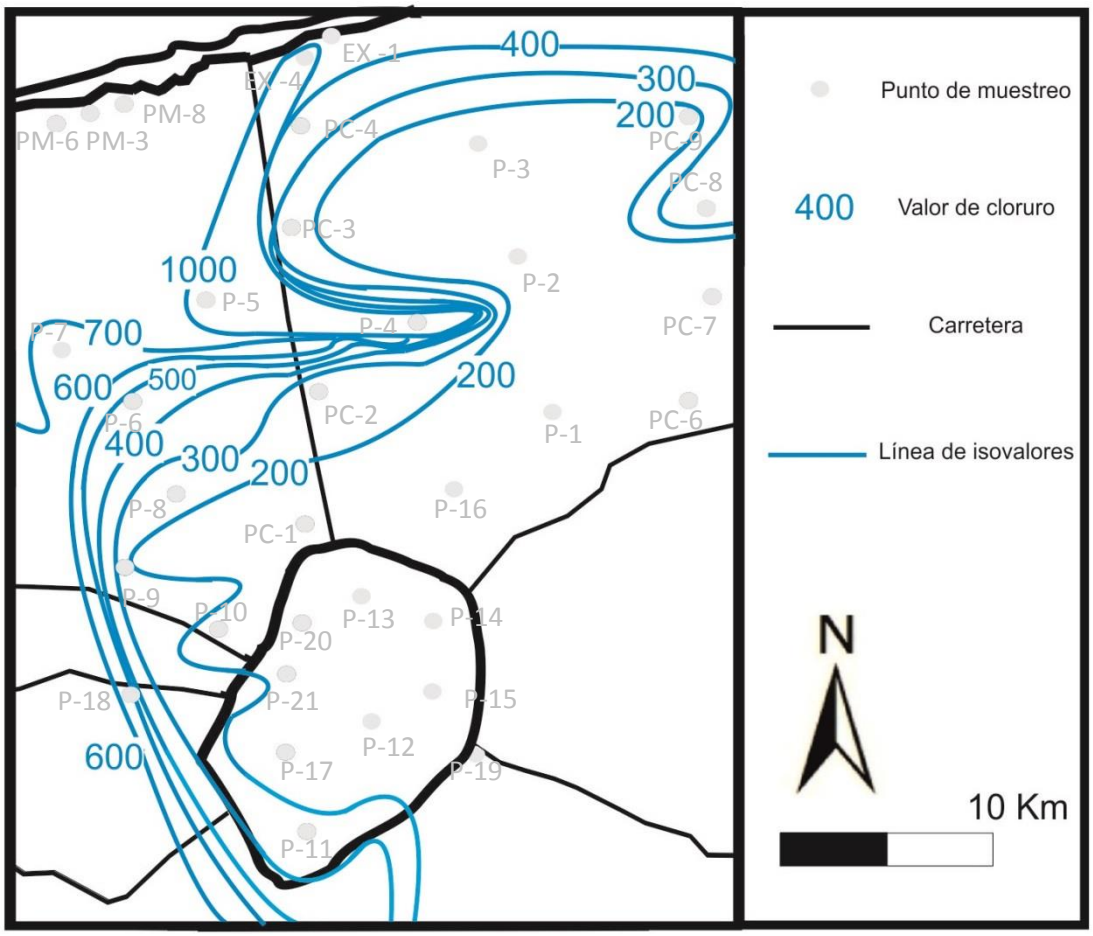


Figura 19: Isovalores de ión cloruro (mg/L) en el área de estudio

La normativa mexicana en vigor manifiesta 250 mg/L como valor límite para el cloruro, dicho valor es superado por las muestras obtenidas en los puntos PC-8 (X´luch), P-6 (Sierra Papacal), P-8 (Cheuman), P-7 (San Miguel), P-18 (Chalmuch), P-4 (Sac-Nicté), P-5 (Dzizilché), EX -1, EX -4 (ambos exbasureros), PM-3, PM-6 y PM-8 (los tres manantiales).

Calcio y Magnesio:

La gran cantidad de concentración de calcio obtenido en las muestras de agua subterránea en los distintos puntos de muestreo, se debe a la formación geológica compuesta por roca caliza. Al ser un terreno de composición carbonatada, el contacto con el agua hace disolver la roca, incorporando este catión al agua subterránea.

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2\,(HCO_3^-)$$
$$MgCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow Mg^{2+} + 2\,(HCO_3^-)$$

La relación Mg^{2+}/Ca^{2+} tiende a asemejarse al valor de la roca original, es decir <1 en calizas; se puede observar que su valor es menor que 1 en la mayoría de los casos (Tabla 5)

UBICACIÓN	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Mg^{2+}/Ca^{2+}	UBICACIÓN	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Mg^{2+}/Ca^{2+}
MEGALITA	5,3	3,4	0,6	KOMCHEN	5,9	1,8	0,3
CRIO	5,4	3	0,5	PREDECO	6,1	3,5	0,6
BAAG	5,4	2,4	0,4	CONTENEDORES	5,3	4	0,7
MOCOCHA	5,6	2	0,3	SAC-NICTE	4,7	4	0,8
HDA.TOO	4,9	3	0,6	DZILDZILCHEN	6,3	4,7	0,7
IXLUCH	5,3	5,7	1,1	BOMBEROS	5,7	2,4	0,4
VAZQUEZ	6,5	1,5	0,2	TIXCUYTUN	5,3	3	0,6
SIERRA PAPACAL	6,4	4,2	0,7	CON-AGUA	5,8	1,3	0,2
SAN MIGUEL	5,5	5,6	1	SAGARPA	4,6	2,4	0,5
CHEUMAN	5,3	3,4	0,6	CHENKU	4,3	1,9	0,4
UCU	6,1	2,4	0,4	MATEMATICAS	4,4	2	0,5
ANICABIL	5,7	1,2	0,2	TECNOLOGICO	4,9	3,5	0,7
UNID.DEPORTIVA SUR	5,7	3,4	0,6	EXBASURERO-01	7,2	6,7	0,9
PACABTUN	5,2	1,1	0,2	EXBASURERO-04	7,5	6,6	0,9
OBSERVATORIO	4,9	2,7	0,5	MANANTIAL-03	6,9	6,4	0,9
CHALMUCH	5,5	5,1	0,9	MANANTIAL-06	7,1	6	0,8
ACUAPARQUE	5,8	1	0,2	MANANTIAL-08	6,2	7,1	1,1

Tabla 5: Representación de la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} en los puntos de muestreo. Los valores tanto de Ca^{2+} como de Mg^{2+} están representados en meq/L.

La cantidad de magnesio es mayor en las zonas de la descarga del flujo subterráneo, es decir, en los dos puntos de muestreo de exbasurero y en los manantiales (Tabla 5).

La interrelación entre los dos parámetros sigue una tendencia similar en los puntos de muestreo, podemos observarlo en los datos representados en la tabla.

Los procesos de intercambio iónico en el agua subterránea afectan tanto a calcio como al magenesio. En estas aguas, el magnesio es retenido con preferencia al calcio en suelos y rocas, de ahí que la concentración de este último sea mayor.

Se observa en el mapa de distribución del calcio a lo largo de nuestra zona de estudio (Fig.20), las líneas de isovalores se asemejan a las de los diferentes compuestos iónicos mayoritarios ya analizados con anterioridad, la concentración del mismo va en aumento a medida que nos acercamos a la zona Norte y Noroeste.

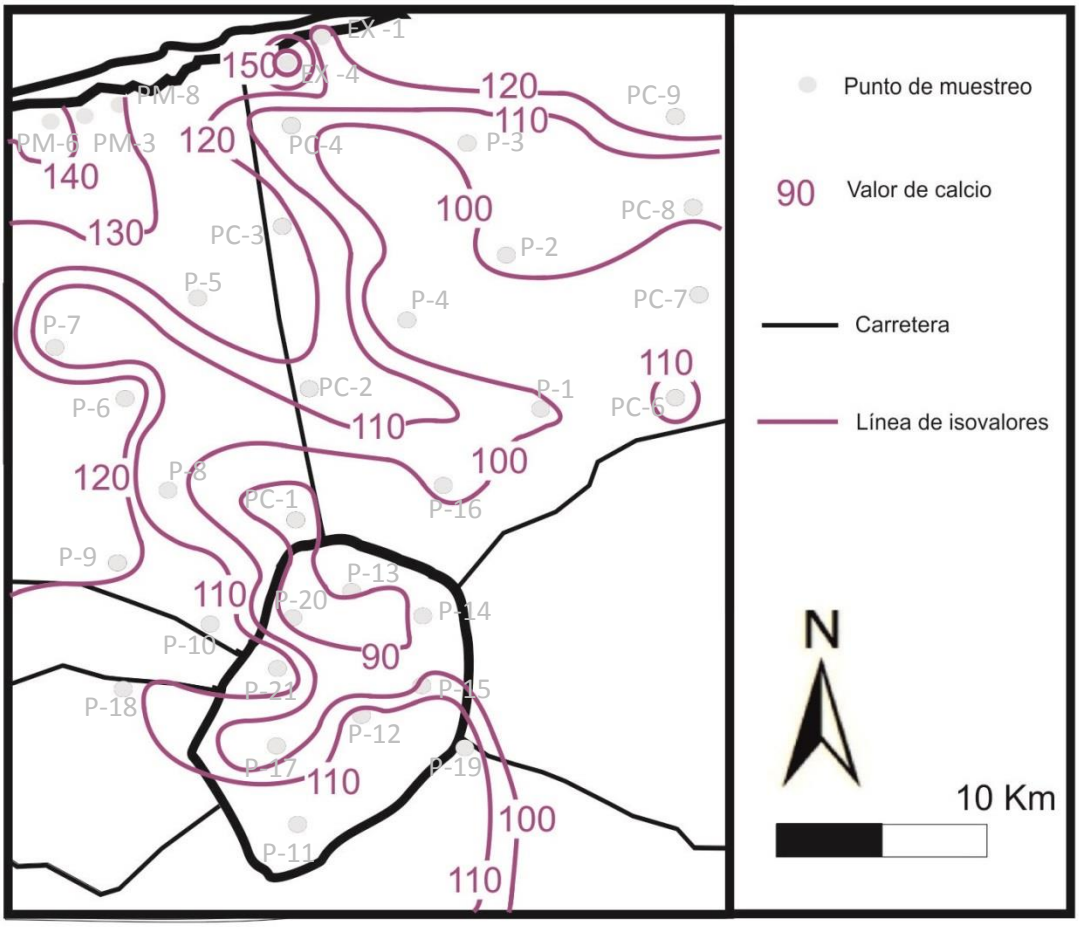


Figura 20: Isovalores de calcio (mg/L) en el área de estudio

Una distribución similar posee las líneas de isovalores para el magnesio (Fig.21), las tendencias observadas en el resto de los componentes iónicos mayoritarios también se repiten para este parámetro.

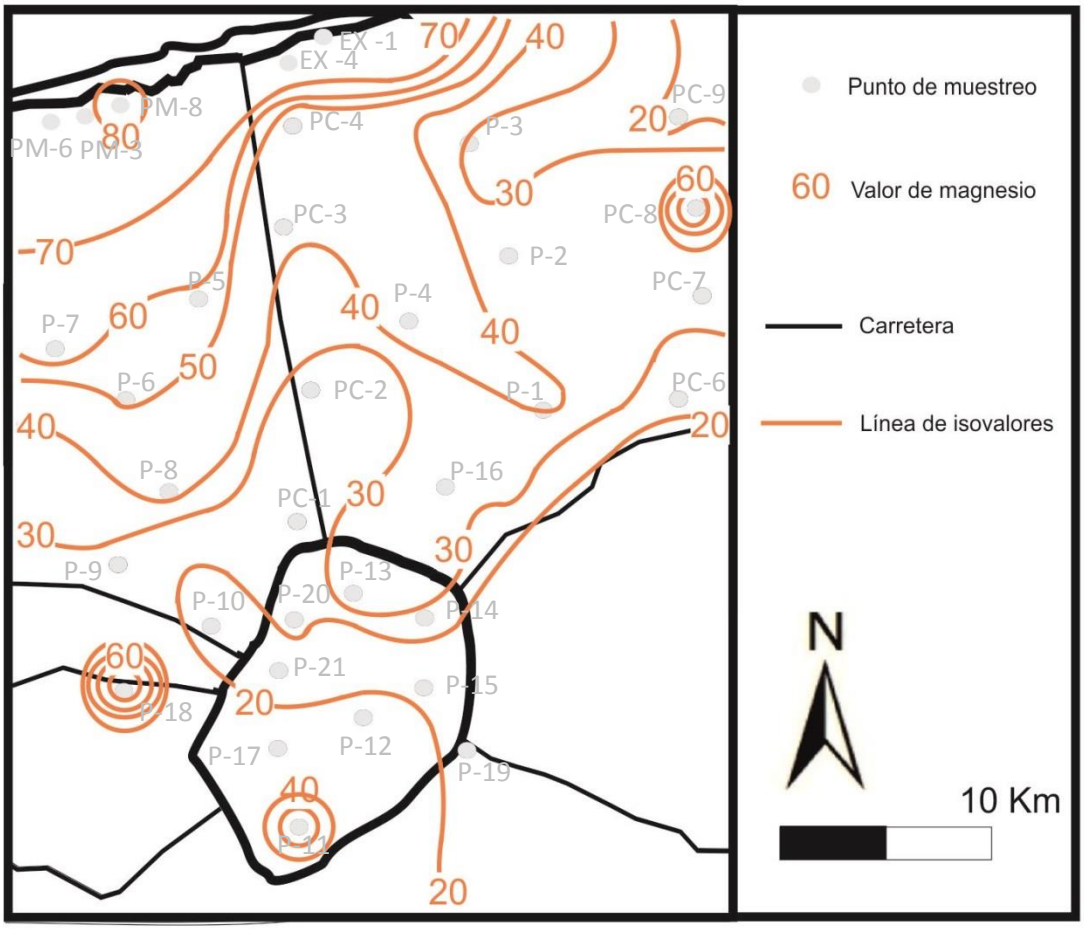


Figura 21: Isovalores de magnesio (mg/L) en el área de estudio

La normativa indica como límite permisible para la dureza total un valor de 500 mg/L, tras realizar los cálculos respectivos para cada lugar de muestreo, este valor se supera en los siguientes puntos: P-6, P-7, P-8, P-18, PC-8, EX -1, EX -4, PM-3, PM-6 y PM-8.

Estos son correspondientes a Sierra Papacal, San Miguel, Cheuman, Chalmuch, X`luch, los dos exbasureros y los tres manantiales.

3.2 Coliformes fecales y coliformes totales

Debido al mal funcionamiento de las redes de saneamiento en el Estado de Yucatán, e incluso a la inexistencia de los mismos en algunos casos, la presencia de coliformes fecales suele ser un factor de contaminación bastante importante además de preocupante en la zona de estudio.
Estos coliformes son indicadores de contaminación del agua subterránea por organismos patógenos.

De ahí su importancia de ser analizados, ya que producen enfermedades como gastronteritis, tifus, disentería… que en ocasiones provocan la muerte de personas cada año en este Estado de México. El análisis de los microorganismos patógenos es un método ideal para determinar la peligrosidad sanitaria de una muestra de agua, ya que permite establecer la relación causa-efecto y establecer la ruta de transmisión.

En la (Tabla 6), se observa la concentración de los coliformes totales y coliformes fecales en las muestras de agua tomadas en el mes de Abril de 2013 en nuestra área de estudio.

Pozo	Ubicación	Coliformes Totales	Coliformes Fecales	Pozo	Ubicación	Coliformes Totales	Coliformes Fecales
P 1	Megalita (20 m)	650	400	P 16	Tixcuytun (20 m)	1100	700
P 2	Crio (10 m)	4300	1600	P 17	Observatorio (20 m)	3250	2630
P 3	BAAG (10 m)	1110	1040	P 18	Chalmuch (25 m)	2500	1200
P 4	Sac Nicte (20 m)	85	60	P 19	Acuaparque (25 m)	1100	600
P 5	Dzidzilche (10 m)	1800	700	P 20	Chenku (20 m)	590	350
P 6	Sierra Papacal (10 m)	1800	450	P 21	Conagua (20 m)	2200	950
P 7	San Miguel (10 m)	248	215	PC 1	Matematicas (20 m)	210	180
P 8	Cheuman (10 m)	1900	1100	PC 2	Komchen (20 m)	490	250
P 9	Ucu (10 m)	1700	600	PC 3	Predeco (15 m)	90	70
P 10	Anicabil (10 m)	900	450	PC 4	Contenedores (6 m)	800	600
P 11	UDS (20 m)	2700	2300	PC 6	Mococha (20 m)	140	60
P 12	Bomberos (25 m)	1500	1400	PC 7	Hac. Too (20 m)	70	40
P 13	TEC (Norte) (20 m)	2500	1800	PC 8	Xluch (10 m)	300	100
P 14	Sagarpa (20 m)	2300	2100	PC 9	Vasquez (15 m)	420	230
P 15	Pacabtun (20 m)	3200	2600				

Tabla 6: Representación de los coliformes totales y fecales ***(NMP/100 mL)***. Abril 2013.

Observamos que tanto los coliformes totales (Fig. 22) y los coliformes fecales (Fig. 23), poseen una distribución muy similar a lo largo de nuestra zona de estudio.

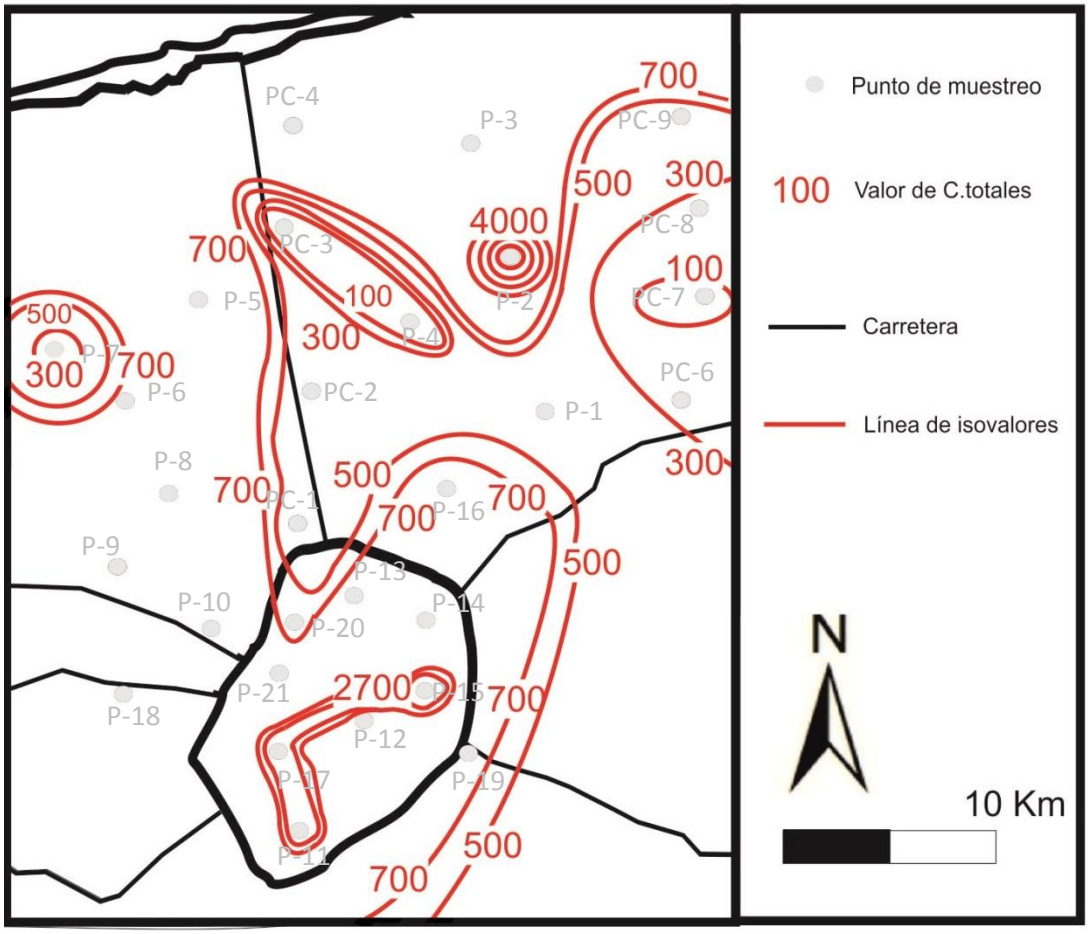


Figura 22: Distribución de la concentración de coliformes totales (NMP /100 ml) en nuestra área de estudio

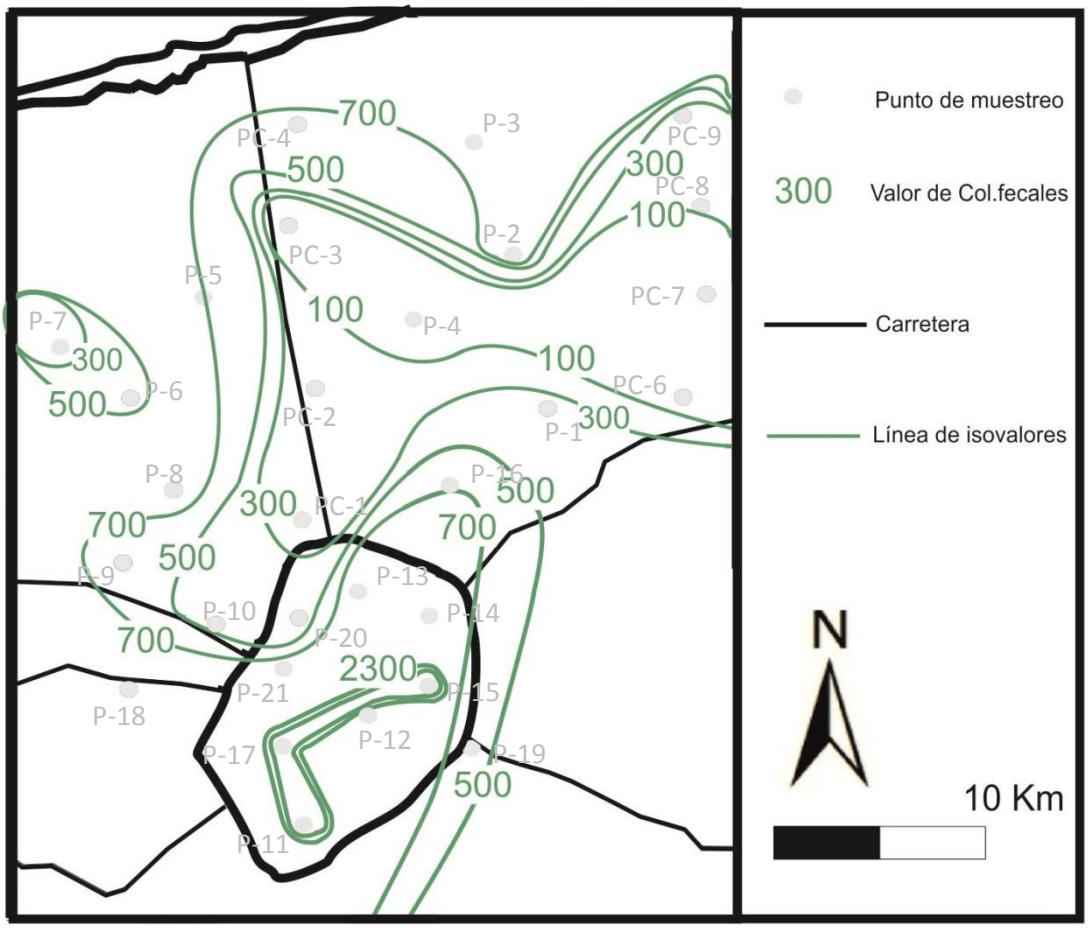


Figura 23: Distribución de la concentración de coliformes fecales (NMP /100 ml) en nuestra área de estudio

Se observa claramente que las zonas con mayor presencia de estos organismos se encuentran en las zonas urbanas, tanto en Mérida (la mayor concentración) como en las pequeñas poblaciones incluidas en nuestra área de estudio.

Esto se debe a lo mencionado con anterioridad, la falta de una red de saneamiento adecuada (en especial en los pueblos y aldeas del lugar), sumada a la alta vulnerabilidad del acuífero, provoca que el agua subterránea posea una concentración de coliformes elevada, siendo uno de los contaminantes más importantes.

Sin embargo, si se comprara la distribución de los coliformes con los de los diversos compuestos nitrogenados, se observa que la distribución de los nitratos no coincide con las de estos.

Para explicar este fenómeno hay que tener en cuenta que los muestreos de los compuestos nitrogenados y los coliformes se efectuaron en diferentes periodos de tiempo. Las muestras del contenido iónico fueron tomadas en Abril del 2013, mientras que en Junio de 2013 se procedió al muestreo para la obtención de los coliformes fecales y totales.

De Abril a Junio se ha producido el fenómeno de la desnitrificación (Fig.14, Fig.15 y Fig. 16), de ahí que la distribución del nitrato procedente de actividad urbana no coincida con la de los coliformes fecales y coliformes totales.

3.3 Isótopos de moléculas de agua ∂^2H y ∂^{18}O

Tras la recogida de los viales tomados en los puntos de muestreo, se procedió al análisis de los mismos obteniendo como resultado los valores expuestos en la (Tabla 7).

A partir de los mismos datos mencionados, se procedió a representar las muestras de isótopos en una gráfica para así comparar las mismas con la recta meteórica mundial (Fig. 24); de este modo podremos observar la procedencia del agua subterránea.

Al mismo tiempo, se realizó dos mapas de representación de nuestras muestras en referencia a su valor de ∂^2H (Fig. 26), y de ∂^{18}O (Fig. 27).

Muestra	∂^2H	∂^{18}O	Muestra	∂^2H	∂^{18}O
P-1	-23,89	-4,08	P-18	-23,99	-4,07
P-2	-24,47	-4,23	P-19	-11,24	-1,55
P-3	-25,22	-4,3	P-20	-23,4	-4,01
P-4	-24,08	-4,25	P-21	-23,68	-4,06
P-5	-25,17	-4,39	PC-1	-22,37	-3,82
P-6	-24,75	-4,37	PC-2	-23,18	-3,89
P-7	-23,05	-4,17	PC-3	-23,81	-4,06
P-8	-23,77	-4,27	PC-4	-23,19	-3,95
P-9	-25,34	-4,52	PC-6	-24,34	-4,19
P-10	-24,41	-4,4	PC-7	-24,8	-4,32
P-11	-23,01	-4,1	PC-8	-24,6	-4,28
P-12	-23,31	-4,04	PC-9	-26,18	-4,49
P-13	-23,03	-4,06	PM-3	-26,18	-4,54
P-14	-22,59	-3,9	PM-6	-26,22	-4,44
P-15	-23,48	-3,98	PM-8	-26,37	-4,46
P-16	-23,96	-4,04	EX-1	-23,85	-4,2
P-17	-23,08	-3,93	EX-4	-24,22	-4,09

Tabla 7: Valores de ∂^2H y de ∂^{18}O en ‰ para cada muestra

Las muestras representadas a continuación en el gráfico (Fig.24), se clasifican según su distribución en el mismo junto con su localización geográfica dentro del área de estudio.

Dentro del **GRUPO I**, se encuentras las muestras localizadas en la zona Oeste. Las muestras obtenidas en la zona Este del sector, se clasifican dentro del **GRUPO IV**.

Los tres manantiales en donde se realizaron muestreos (PM-3, PM-6 Y PM-8), se agrupan conjuntamente dentro del **GRUPO II**. Las muestras pertenecientes al **GRUPO III**, se encuentran mejor repartidas; se distribuyen en la zona centro del área de estudio, otras en la ciudad de Mérida y una última muestra perteneciente al exbasurero (EX – 1).

Una clasificación aparte se dedica a la muestra obtenida en el punto P-19, al Sureste de la ciudad de Mérida, corresponde a Acuaparque, que queda encasillada en el **GRUPO V**. El **GRUPO VI a**barca al resto de las muestras de los restantes puntos de muestreo.

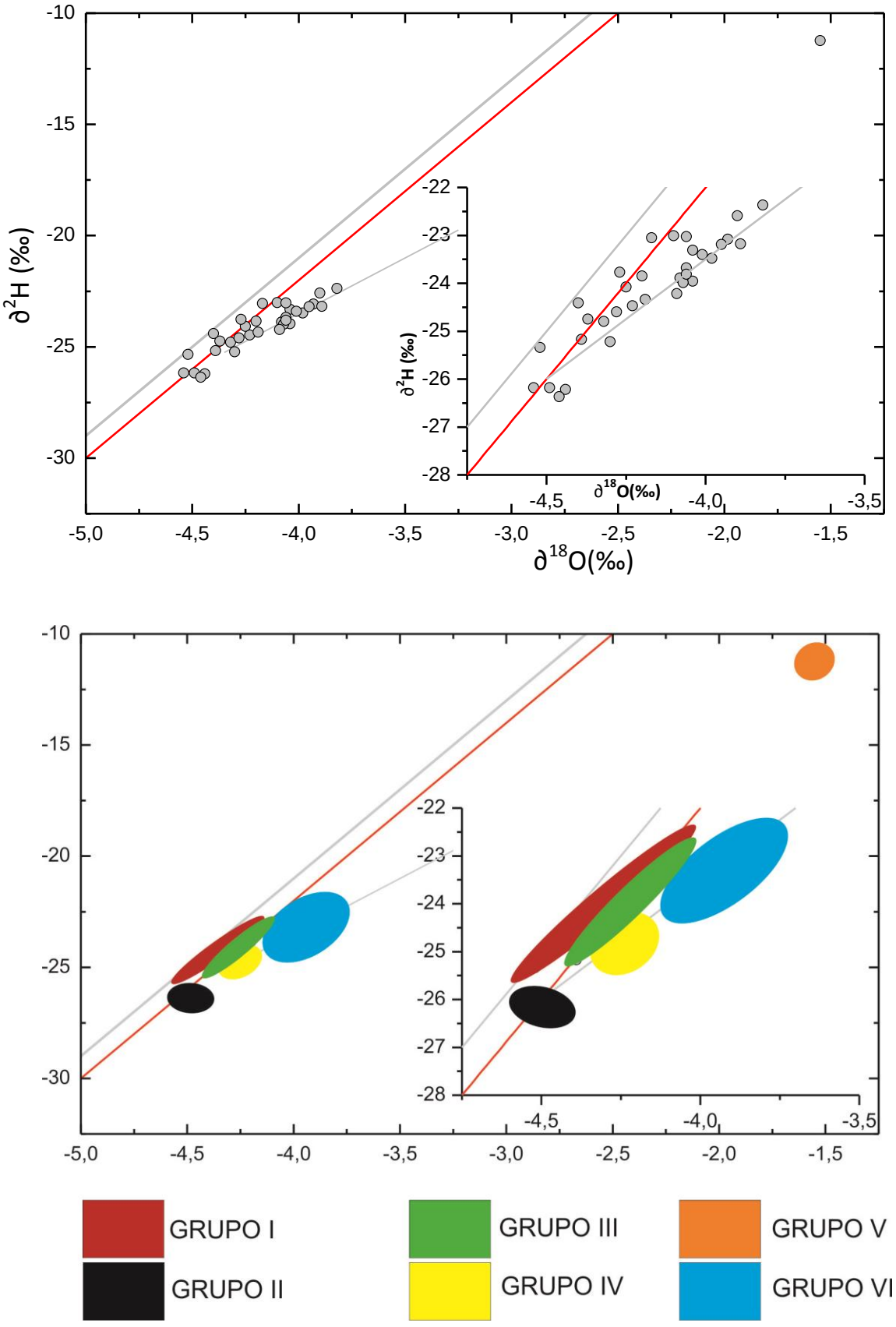


Figura 24: Arriba: Representación de las muestras y comparación con la recta meteórica mundial. Abajo: Agrupación de las muestras de agua ateniendo a su isotopía

Se puede observar en la (Fig.24), que existe un desvío hacia la derecha del gráfico de las muestras pertenecientes al grupo VI, (que abarcan la mayor parte de las mismas muestras) con respecto a la línea meteórica mundial, representada en la (Fig.25) que se muestra a continuación.

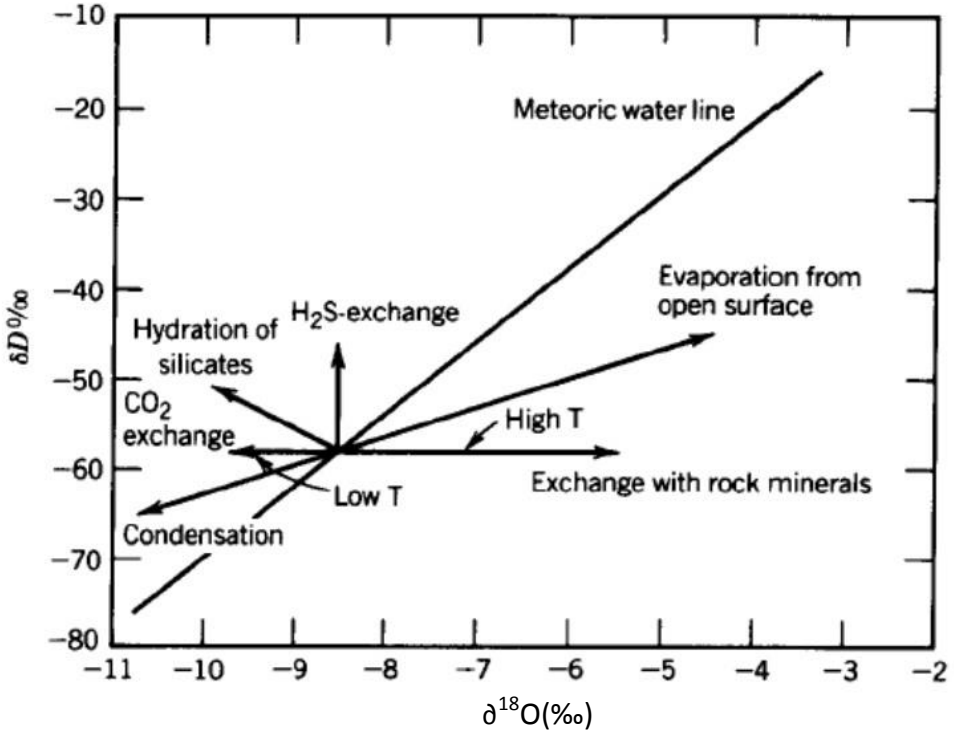


Figura 25: Representación de la Línea meteórica mundial

Estas muestras se encuentran situadas en la línea de evaporación, lo cual quiere decir que esta agua subterránea proviene del agua de lluvia que rápidamente se evapora, debido a las condiciones ambientales del lugar que ya se ha mencionado a lo largo de este trabajo, antes de infiltrarse en el acuífero.

La explicación a los valores isotópicos obtenidos en el grupo V, correspondiente al punto P-19 (Acuaparque), puede deberse a que al ser una zona recreativa con pequeñas lagunas artificiales y estanques, esta agua se acabó infiltrando en el acuífero, siendo tomada en el muestreo.

Observando al mismo tiempo las (Fig. 26) y (Fig. 27), los valores tanto de deuterio como de oxígeno[18], siguen una tendencia similar a lo largo de nuestra zona de estudio.

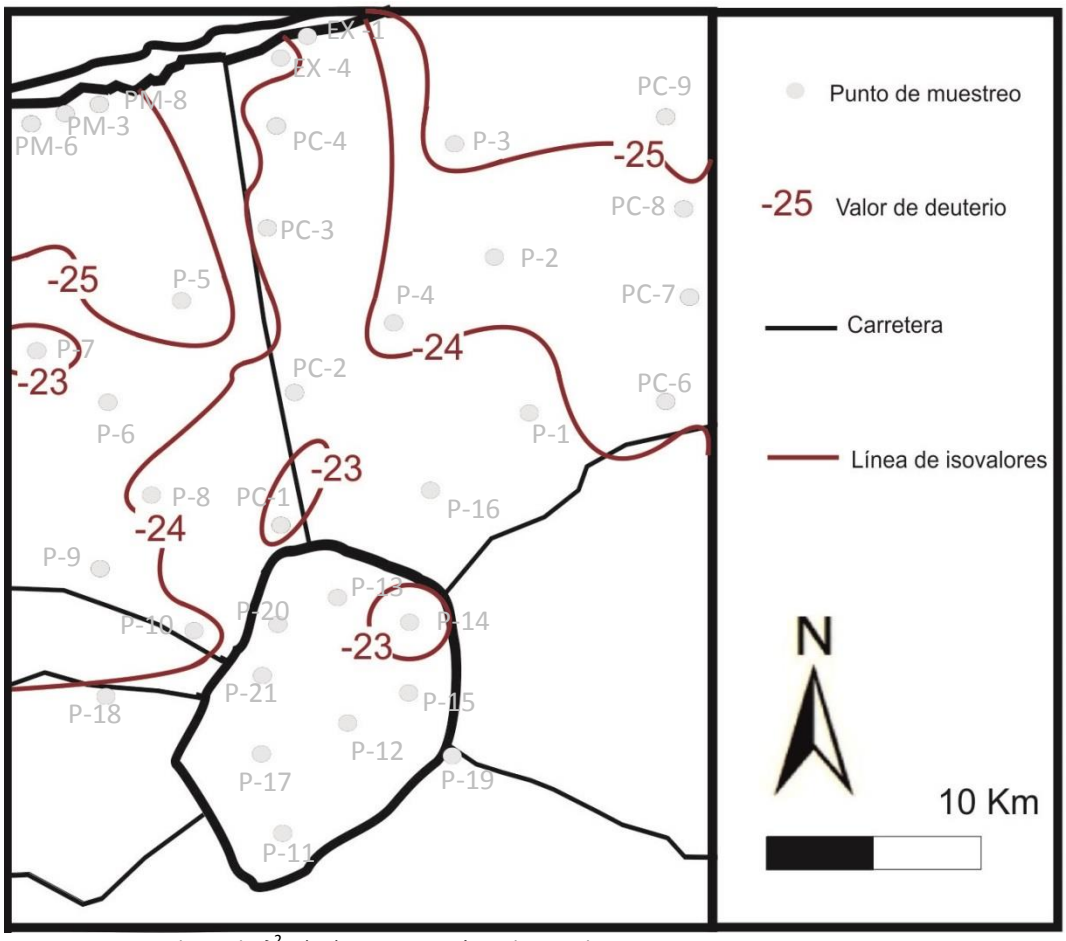


Figura 26: Isovalores de $\delta^{2}H$ (‰) en nuestra área de estudio

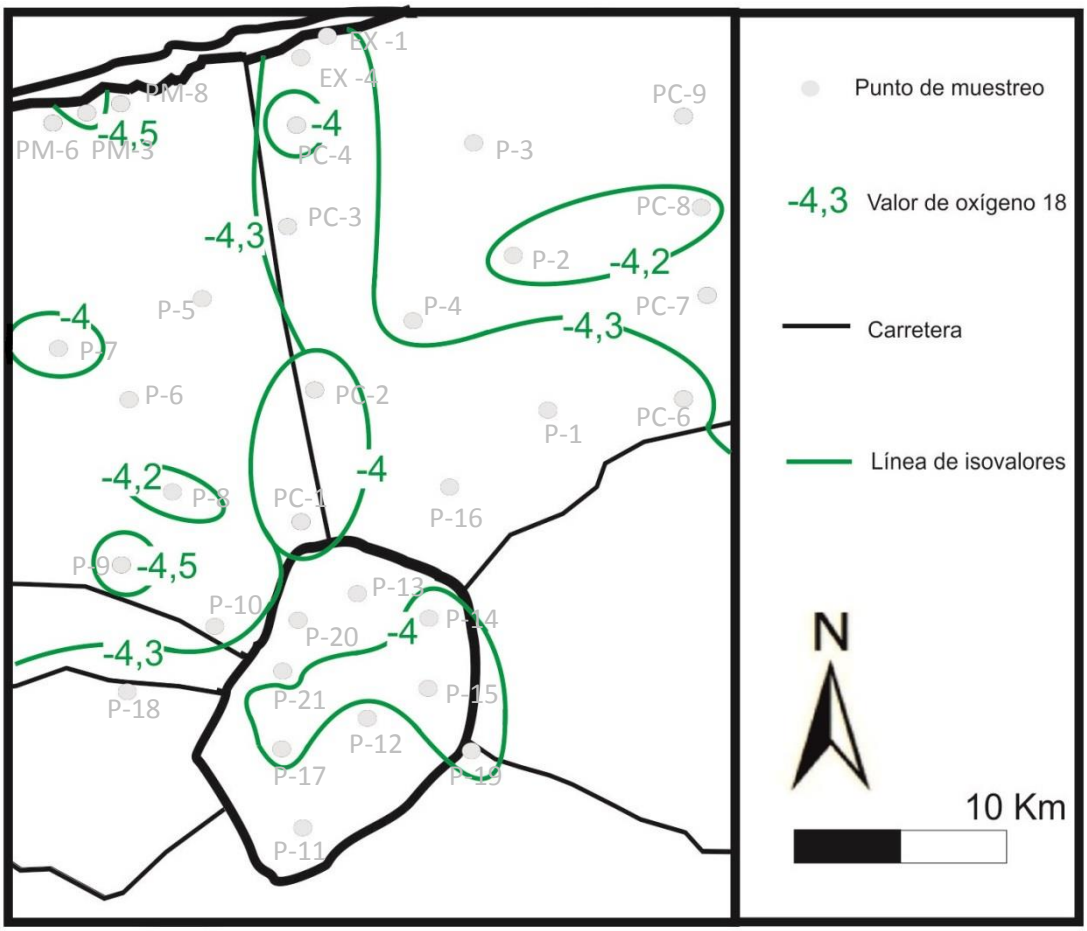


Figura 27: Isovalores de $\partial^{18}O$ (‰) en nuestra área de estudio

Los valores más ligeros de estos isótopos se encuentran en la zona Noreste y Noroeste de nuestra área de estudio, este fenómeno puede explicarse debido a que, por las características del lugar, **existe una evaporación previa a la recarga**, además se produce el **efecto de continentalidad**.

El agua subterránea tomada de las zonas con valores más ligeros, proviene de una recarga por precipitación producida mucho más al Sur y al Suereste; en esta zona, el agua de precipitación proviene de las nubes que entran desde el Golfo de México o desde el Mar Caribe (Fig. 28), a medida que estas avanzan hacia el interior (tierra adentro), su contenido en $\partial^{18}O$ y $\partial^{2}H$ disminuyen alcanzando valores extremadamente ligeros debido a que el ^{18}O y el $\partial^{2}H$ son más pesados que el ^{16}O y el $\partial^{1}H$ respectivamente.

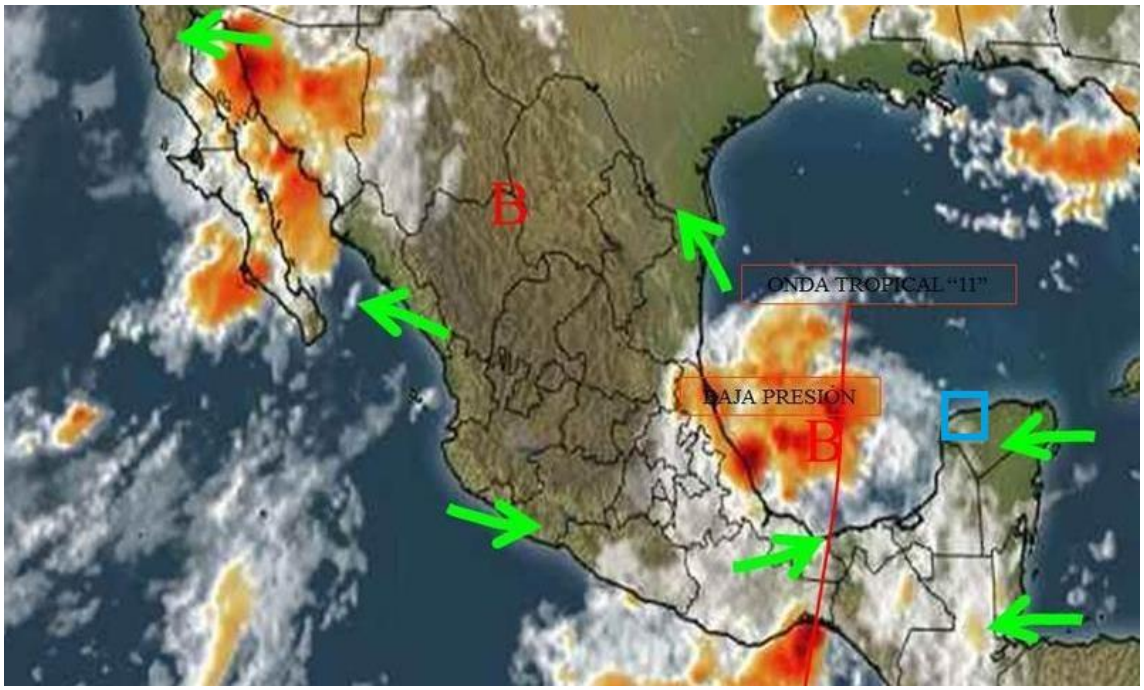


Figura 28: Distribución y movimiento general de las bajas presiones en México. (www.huracanesyucatan.com)

A medida que las nubes avanzan se vuelven progresivamente más ligeras, perdiendo $\partial^{18}O$ y $\partial^{2}H$ por el propio peso de los isótopos pesados y por pérdida de humedad, haciendo que su relación con ^{16}O y ^{1}H alcancen valores negativos importantes.

Se observa mucho mejor en el $\partial^{2}H$ que en el $\partial^{18}O$.

Al comparar las (Fig. 26) y (Fig.27) con las obtenidas con anterioridad, las altas concentraciones de Cl^{-}, Na^{+}, K^{+} y Conductividad Eléctrica, coinciden con los valores más ligeros de los isótopos analizados, con esto podemos reforzar que se está produciendo una intrusión marina en el acuífero.

3.4 Resultados de organofosforados y plaguicidas organoclorados

Durante la campaña de muestreo de Mayo 2013, fueron tomadas en cada pozo, en los manantiales y en los exbasureros, cierta cantidad de agua subterránea para evaluar la concentración de los diferentes compuestos organofosforados y de plaguicidas organoclorados.

Los resultados obtenidos (Tabla 8) se muestran a continuación, así como su comparación con los límites máximos establecidos en la **NOM-127-SSA1-1994, "*Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*"**, que es la que se encuentra actualmente en vigor:

		ORGANOFOSFORADOS								
Ubicación	Profundidad	ooo-trifenilfosfonato	Thionazin	sulphotec	forate	Dimetoato	Disulfoton	Metilparation	paration	Famfur
ACUAPARQUE	25	9,5	7,5	21,2	20,9	7,7	183,0	4,3	11,3	51,5
BAAG	20	5,7	3,5	2,3	12,3	4,2	0,9	16,6	4,3	10,1
BOMBEROS	25	7,4	6,5	1,7	0,3	0,4	0,1	7,6	0,9	4,2
CHALMUCH	25	7,2	6,3	14,1	0,1	1,0	0,1	8,9	8,2	10,1
CHENKU	20	4,6	6,3	3,5	8,5	3,6	0,0	13,5	13,6	5,0
CHEUMAN	10	4,8	1,6	21,8	11,8	3,1	2,3	13,4	4,6	6,7
CONAGUA	20	8,2	7,2	4,9	0,0	1,3	0,1	14,5	0,1	5,3
CONTENEDORES	6	22,3	10,0	12,3	9,7	9,9	45,3	24,9	11,8	0,0
CRIO	10	6,3	5,8	16,9	14,4	1,4	1,3	19,5	410,3	12,6
DZIDZILCHE	10		5,4	34,5	36,5	6,6	3,5	2,6	13,1	0,4
EXBASURERO 01		2,1	7,0	6,1	1,5	0,2	25,2	8,7	7,7	93,0
EXBASURERO 04		1,2	8,6	10,2	73,3	1,6	91,6	11,5	5,2	2,5
HACIENDA ANICABIL	10	3,4	5,6	17,3	8,8	0,8	0,8	10,7	0,2	37,1
HACIENDA TOO	20	7,0	7,4	3,7	0,0	5,2	4,3	20,4	0,1	76,2
KOMCHEN	20	3,9	7,7	10,3	18,4	1,4	0,0	20,6	0,0	16,0
MATEMATICAS	20	20,2	12,6	23,0	25,9	21,1	322,8	6,2	107,3	9,2
MEGALITA	20	4,7	5,4	16,6	7,3	2,1	191,4	11,3	242,5	14,6
MOCOCHA	20	5,0	6,2	4,2	0,0	2,9	0,0	16,6	4,4	12,9
OBSERVATORIO	20	1,9	3,4	14,1	0,0	0,5	1,3	9,2	5,1	4,2
PACABTUN	20	6,3	7,9	10,2	3,4	3,4	0,0	13,9	3,5	6,0
PMANANTIAL 3		11,0	13,9	18,7	13,3	1,8	9,2	21,3	5,4	1,3
PMANANTIAL 6		7,6	14,7	21,6	9,0	9,7	41,6	17,6	5,8	0,2
PMANANTIAL 8			166,8	16,4	0,2	50,8	0,9	2,2	59,1	2,3
PREDECO	15	7,3	7,7	3,9	0,0	6,8	0,1	10,2	4,7	4,7
RANCHO VAZQUEZ	10	4,5	7,5	40,2	0,0	4,3	0,1	19,4	0,1	13,9
SAC NICTE	20	5,9	5,6	3,8	4,2	3,7	4,3	32,5	10,1	7,4
SAGARPA	20	23,0	5,6	10,6	43,4	3,5	307,2	11,3	34,1	29,9
SAN MIGUEL	10	6,7	5,9	0,7	7,2	3,2	5,5	22,0	4,4	5,9
SIERRA PAPACAL	10	6,7	7,0	5,0	0,0	7,7	952,9	8,7	2,2	3,0
TECNOLOGICO	20	17,1	6,6	51,3	48,7	3,6	393,8	11,2	35,5	8,9
TIXCUYTUN	20	6,5	7,0	27,5	0,0	0,4	0,0	12,0	6,6	5,3
UCU	10	8,3	6,9	2,2	1,2	2,6	0,0	5,4	8,1	8,6
U.D. DEL SUR	20	2,9	7,8	4,3	2,6	11,9	3,9	46,3	4,3	0,8
X´LUCH	15	3,8	4,5	1,4	0,0	2,9	6,6	13,8	1,8	7,6

Tabla 8: Concentración de organofosforados (ppb)

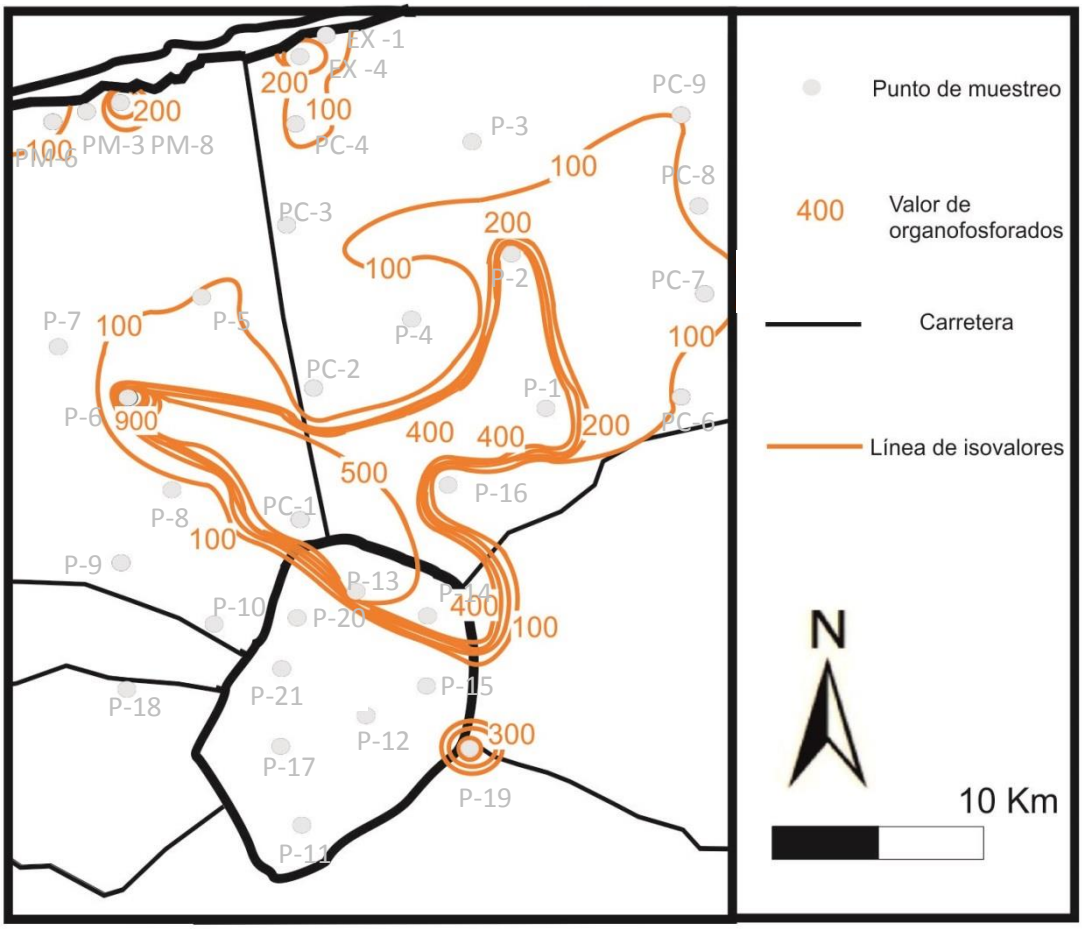


Figura 29: Concentración total de organofosforados (ppb)

Estos organofosforados son utilizados para realizar diversas funciones, como para la fabricación de nitrocelulosa y acetato de celulosa (000-trifenilfosfonato), bien como nematicidas (Thionazin), como agroquímicos (Forate) o también como insecticidas (Dimetoato, Disulfoton, Metilparation y Paration).

Ubicación	suma Drines	Suma de clordanos	suma Heptacloro	Suma de endosulfan	Suma de DDT	Metoxicloro
ACUAPARQUE	74,1	7,5	12,5	135,7	25,8	1,5
BAAG	10,7	7,6	2,9	13,5	41,9	2,2
BOMBEROS	2,9	4,3	0,7	7,5	15,2	1,1
CHALMUCH	5,0	4,6	2,2	10,4	32,3	2,1
CHENKU	6,0	1,6	2,5	7,4	19,5	1,7
CHEUMAN	136,0	3,4	2,2	8,1	26,3	2,3
CONAGUA	6,9	10,3	1,9	14,5	20,8	1,9
CONTENEDORES	15,9	31,8	17,8	55,1	20,8	2,5
CRIO	13,7	20,6	2,6	19,1	66,4	2,5
DZIDZILCHE	12,7	13,7	10,0	30,7	9,2	2,7
EXBASURERO 01	169,9	36,4	4,3	21,1	35,0	1,6
EXBASURERO 04	36,7	14,5	5,7	55,5	14,0	2,2
HACIENDA ANICABIL	54,1	8,6	1,8	10,4	15,3	2,3
HACIENDA TOO	172,6	82,0	4,7	19,9	49,0	3,1
KOMCHEN	13,6	73,5	2,0	19,3	53,4	3,4
MATEMATICAS	22,1	127,8	55,6	188,6	50,8	1,8
MEGALITA	13,4	15,5	3,1	19,3	53,9	2,9
MOCOCHA	12,6	9,7	3,7	22,8	54,2	3,8
OBSERVATORIO	7,1	1,6	11,5	14,7	2,4	1,1
PACABTUN	8,7	6,8	3,1	29,4	24,9	3,0
PMANANTIAL 3	11,4	10,7	9,4	24,3	20,3	1,3
PMANANTIAL 6	11,2	14,1	6,7	23,5	12,2	1,4
PMANANTIAL 8	74,2	90,9	34,9	190,2	53,6	37,8
PREDECO	8,5	7,3	3,4	2,0	8,4	4,1
RANCHO VAZQUEZ	15,5	91,8	3,5	28,0	133,0	2,4
SACNICTE20M	16,0	8,4	1,3	26,0	9,3	2,7
SAGARPA	65,7	216,2	17,2	274,2	43,4	1,2
SAN MIGUEL	9,5	5,3	3,7	13,2	26,1	2,2
SIERRA PAPACAL	41,1	5,1	2,2	16,4	14,8	1,7
TECNOLOGICO	29,2	172,0	25,8	229,0	56,4	2,7
TIXCUYTUN	5,9	41,3	1,7	53,9	31,5	1,7
UCU	2,4	12,1	1,6	8,1	40,9	1,2
UDS	14,1	9,3	4,6	12,9	4,3	12,1
X´LUCH	9,7	20,5	2,4	18,5	37,7	1,5

Tabla 9: Suma de Drines, Clordanos, Heptacloro, Endosulfan, DDT y Metoxicloro (ppb)

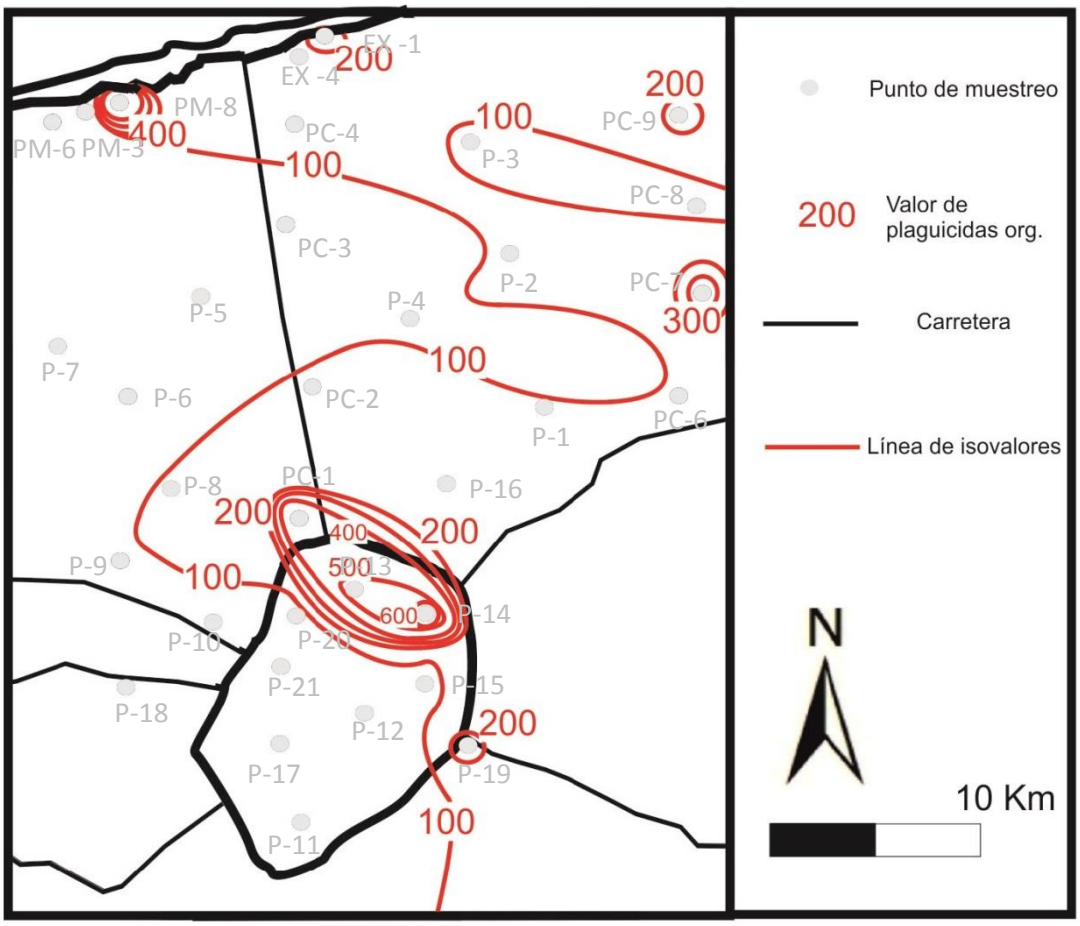


Figura 30: Concentración total de plaguicidas organoclorados (ppb)

Para los plaguicidas organoclorados como los DDT, Metoxicloro y Clordano no existen puntos de muestreos en donde se superen los límites legales establecidos, no es el caso para los restantes, en donde esto si ocurre.

Para el Heptacloro, se ha superado el límite legal de 30 ppb en el manantial correspondiente a PM-8 y en Matemáticas (PC-1). Los Drines, con un límite legal de concentración de también 30 ppb, se concentran superando el mismo en el manantial PM-8, en los dos exbasureros correspondientes a EX -1 y EX -4, en Sierra Papacal (P-6), Cheuman (P-8), Anicabil (P-10), Sagarpa (P-14), Acuaparque (P-19) y por último en la Hacienda Too (PC-7).

El plaguicida organoclorado Endosulfan, también con un límite máximo permisible de 30 ppb, se ve superada su legalidad en los dos exbasureros (EX -1 y EX -4), en Sierra Papacal (P-6), CHeuman (P-8), Anicabil (P-10), Sagarpa (P-14), Acuaparque (P-19), Hacienda Too (PC-7) y en el manantial correspondiente a PM-8.

Para observar al detalle la tabla completa de los compuestos organosfosforados y plaguicidas organoclorados, consultar los anexos de contenidos (Página 69).

4. CONCLUSIÓN FINAL

El acuífero de Yucatán se caracteriza por poseer una cantidad de agua subterránea suficiente como para abastecer las necesidades y las demandas de toda la población yucateca, ya sea para el abastecimiento urbano, agrícola, industrial y demás.

Es sabido que el problema principal de este acuífero no es la cantidad del recurso hídrico sino la calidad del mismo, al ser un terreno completamente kárstico, hace que este sea muy vulnerable a la contaminación, la facilidad con la que el agua proveniente de la precipitación se infiltra, hace que cualquier contaminante depositado en la superficie sea una amenaza seria a la calidad de las aguas.

Durante este trabajo fin de Máster RHYMA, se han analizado diversos componentes contaminantes y se han especulado sobre sus posibles focos a lo largo de nuestra zona de estudio que hemos establecido:

- Conductividad Eléctrica: Mantiene una tendencia similar con el Cl^- y con el SO_4^{2-} y se concentra más en la zona Norte del acuífero y en zonas puntuales en donde estos dos elementos mencionados de encuentran presente en una concentración elevada y considerable.

- Temperatura: Es elevada en la zona Norte del acuífero, pero sobre todo dentro de la ciudad de Mérida, en donde la concentración por coliformes, NO_3^- y Cl^- son bastante importante.
  La temperatura es un buen indicador del ambiente físico-químico en el interior de la zona saturada de los acuíferos.

- pH: Al igual que la temperatura, su valor es más elevado en la ciudad de Mérida.

- Coliformes fecales y coliformes totales: Son sin duda, uno de los contaminantes más importantes y preocupantes de la zona, su mayor concentración se encuentra dentro de la misma ciudad de Mérida y en las poblaciones del lugar.
  Hemos de mencionar que a lo largo de toda el área de estudio, la concentración es elevada.

  Su presencia se debe a la deficiente infraestructura del tratamiento de las aguas fecales e incluso a la inexistencia de las mismas, además del depósito de abonos.

  Esto provoca que en el mismo suelo se encuentren los desechos fecales, que con la precipitación del lugar, sumado a la alta vulnerabilidad del acuífero, hace que se infiltren rápidamente estos coliformes.

  Son uno de los problemas más importantes que presentan la calidad de estas aguas, este tipo de contaminación causa grandes enfermedades e incluso la muerte en algunas personas.

- Na^+ y K^+: Poseen una tendencia muy similar estos dos cationes, al mismo tiempo también coinciden la distribución de sus concentraciones a lo largo de la zona de estudio con la del Cl^- y es también muy parecida a la de la conductividad eléctrica.

  Su concentración elevada en la zona Norte se debe a la contaminación urbana, industrial, abonos e intrusión marina.

- Compuestos nitrogenados (NO_3^-, NO_2^- y NK): Su concentración elevada está relacionada con la actividad urbana sobre todo, ya que su mayor concentración se encuentra en la ciudad de Mérida.

  Existen también puntos elevados de concentración a lo largo de la zona de estudio, en ocasiones se debe a la actividad ganadera y agrícola de la zona, que no es muy elevada.

- SO_4^{2-}: Las mayores concentraciones de sulfato a medida que avanzamos al Norte de la zona de estudio, en la zona Norte, cerca de Progreso, se encuentra la mayor parte de la industria, en este lugar este contaminante proviene de los factores urbanos e industriales.
  Observamos pequeños focos de alta concentración de sulfato en Mérida, se deben a las actividades urbanas de la misma ciudad.

- Cl^-: La tendencia que sigue es muy parecida a la del K^+ y a la del Na^+. Su concentración es elevada en la zona Norte de nuestra área de estudio.
  La contaminación por este ión se debe a la actividad urbana de los alrededores y también a la intrusión marina que se produce desde el Golfo de México hacia el acuífero.

- Mg^{2+} y Ca^{2+}: Sus tendencias de concentración siguen presentando una distribución muy similar entre ellas y entre los diferentes componentes iónicos mayoritarios analizados.

- ∂^2H y $\partial^{18}O$: El análisis de estos isótopos de agua ha mostrado una tendencia muy similar en los mismos, se averiguó la procedencia del agua subterránea, que se ha infiltrado más al Sur y Sureste de nuestra área de estudio y que proviene de un agua que rápidamente se ha evaporado. También se ha reforzado la hipótesis de la intrusión marina con los isótopos.

- Organofosforados y plaguicidas organoclorados: En algunas de las muestras obtenidas en los diferentes puntos de muestreo, algunos de estos elementos superan los límites máximos establecidos por la normativa en vigor: NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

En resumen, vemos que la mayor concentración de contaminantes del lugar está formada por SO_4^{2-}, Cl^-, coliformes fecales y coliformes totales.

Los focos contaminantes más importantes son sin duda, la ineficaz estructura de tratamiento de aguas fecales e incluso la inexistencia de ella, las actividades urbanas tanto de la ciudad de Mérida, de la ciudad de Progreso como de los pequeños pueblos y aldeas de la zona, la actividad industrial, especialmente la localizada en la zona Norte, y las actividades ganaderas.

Todo esto sumado a la vulnerabilidad del acuífero debido a sus condiciones kársticas, hacen que el Acuífero Kárstico de Yucatán posea unas aguas contaminadas.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcocer J., Escobar E. (1999) Contaminación del agua subterránea en la Península de Yucatán, México. Trabajo interno UADY

Argamasilla M. (2011). Uso de índices e indicadores de estado cuantitativo y cualitativo en el acuífero aluvial del Río Verde y Señorío de Marbella (Marbella). Trabajo interno fin de máster

Battllori-Sampedro E., González J.I., Díaz J., Febles J.L. (2005). Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del Estado de Yucatán (México).Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía (UNAM). Vol 59 pp 74-92

Cervantes A. (2007) El balance hídrico en cuerpos de agua cársticos de la Península de Yucatán. Teoría Y Praxis. Pp 143-152

Cuevas E., Pacheco J., Cabrera A., Coronado V., Vázquez J., Comas M. Calidad Química y bacteriológica del agua subterránea del principal pozo de abastecimiento de Mérida. Trabajo interno UADY

Gaona S., Gordillo T., Villasuso M. (1980) Cenotes, karst característico. Mecanismo de formación. Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología. Revista Vol 4 nº1 pp.32-36

García G., Oliva Y., Ortíz R. (2011) Distribución espacial de la marginación urbana en la ciudadde Mérida, Yucatán, México. Investigaciones Geográficas, Vol 77, pp.89-106

Geyh M. (2000) Groundwater saturated and unsaturated zone. Environmental isotopes in the hydrological cycle Vol 4, pp 1-154

Gobiernos de Yucatán, Campeche y Quintana Roo trabajan conjuntamente con el Organismo de Cuenca Península de Yucatán de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para proteger la principal fuente de agua de la región, el acuífero de Yucatán. (2011). Artículo periodístico

González R., Pérez Y., Sánchez I., Graniel E. (2010) Resistividad eléctrica aplicada en un acuífero cárstico para detectar contaminación. Revista Latino-Americana de Hidrogeología. Vol.7 pp.79-82

González R., Rodríguez R., Coronado V. (2007) Atenuación Natural en el Acuífero Yucateco. Revista Internacional de Contaminación ambiental. Vol.23 pp 5-15

Graniel E., Macario C., González R., Sánchez y Pinto I. Dispersión de solutos en la costa Noreste de Yucatán (México). Trabajo interno UADY

Graniel E., Carrillo J., Cardona A. (2003). Dispersividad de solutos en el karst de Yucatán. Ingeniería Revista Académica. Vol 7 número 003 pp 49-56

Graniel E., Pacheco A., Coronado V. (2009) Origen de los sulfatos en el agua subterránea del Sur de la Sierrita de Ticul, Yucatán. Ingeniería Revista Académica de la FI-UADY, 13-1, pp. 49-58, ISSN: 1665-529X

Graniel E. Recursos hídricos en el Estado de Yucatán. Trabajo interno UADY

Hernández A., Hassen A. (2011) Uso de plaguicidas en dos zonas agrícolas en México y evaluación de la contaminación de aguas y sedimentos. Rev. Int. Contam. Ambie. Vol 27 pp.115-127

Lizarraga I. (2013).Evaluación espacio-temporal de plaguicidas organoclorados en el transecto Mérida-Progreso (Yucatán). Trabajo interno UADY

Mancera E. (2006). Estudios de los compuestos nitrogenados en el acuífero del bajo Guadalhorce. Trabajo interno fin de máster

Neftaly G., Pacheco J., Euán I., Pérez R. (2009). Análisis espacial de la vulnerabilidad y riesgo del agua subterránea a la contaminación en el Estado de Yucatán, México. Trabajo interno UADY

Pacheco J., Cabrera A., Calderón L., Marín L., Steinich B., Escolero O. Delineación de una zona de protección para el abastecimiento de agua en Mérida, Yucatán, Mexico. Trabajo interno UADY

Pacheco J., Marín L., Cabrera A., Steinich B., Escolero O. (2011) Nitrate temporal and spatial patterns in 12 water-supply wells. Enviormental Geology, Vol 40, pp 708-715

Ramírez J. (2009). Actualización del modelo hidrogeológico e hidrogeoquímico de la cuenca del Salar de Michincha Región de Tarapacá, Chile. Trabajo interno fin de máster Rhyma

Ruiz V. (2012) Estudio Hidrogeoquímico de escenarios de recarga artificial en el acuífero del Río Vélez. Trabajo interno fin de máster Rhyma

Seller K. (2001) Man's impact on groundwater systems. Environmental isotopes in the hydrological cycle, Vol 5, pp. 1-103

Silvero D. (2012) Caracterización Hidrogeoquímica del acuífero kárstico de Puerto Morelos Estados de Quintana Roo, México. Trabajo interno fin de máster Rhyma

Villasuso M., Sánchez I., Canul C., Casares R., Baldazo G., Souza J., Poot P., Pech C. (2011) Hydrogeology and conceptual model of the karstic coastal aquifer in northern Yucatan State, Mexico. Tropical and Subtropical Agroecosystems. Vol 13, pp. 243- 260

Villasuso M., Casares R., Canúl C., Baldazo G., Souza J., Poot P., Pech C. (2011). Validación del modelo de trayectorias del flujo del agua subterránea y estimación de los volúmenes de descarga del acuífero de la Península de Yucatán

Páginas web consultadas:

www.bitacoraordenamiento.yucatan.gob.mx
www.bvsde.ops-oms.org
www.centrogeo.org.mx
www.cicy.mx
www.conagua.gob.mx
www.huracanesyucatan.com
www.inegi.org.mx
www.japay.yucatan.gob.mx
www.salud.gob.mx
www.tierra.rediris.es

6. ANEXOS DE CONTENIDOS

6.1 Detalle de la obtención de las muestras de agua

A la hora de obtener las muestras de agua, se han llevado a cabo una serie de pasos en cada punto de muestro.

Cada uno de estos pasos se ha realizado de manera repetitiva a excepción de los manantiales (PM-8, PM-6 y PM-3) y del basurero (EX -1 y EX-4), que en estos, la extracción fue lógicamente manual desde el punto de origen.

Pasos seguidos en los puntos de muestreo para la obtención de agua y su posterior análisis de pesticidas e isótopos:

I) ***Apertura de los pozos de extracción y medición del nivel piezométrico con una sonda***

II) ***Extracción del agua mediante una botella WILDCO, con capacidad de 1,5 litros***

III) ***Muestreo de los parámetros de temperatura, pH y conductividad eléctrica***

IV) ***Relleno de la botella con el fin de análisis de pesticidas***

V) ***Filtrado de muestras de agua para isotopía*** **y** ***relleno de los viales para isotopía, envuelto en parafina y posterior introducción en un recipiente a baja temperatura***

La metodología utilizada para la extracción de agua en los pozos, con el objetivo de los análisis de elementos trazas y elementos mayores, ha sido la siguiente:

I) Apertura de los pozos y medición del nivel piezométrico de los mismos mediante una sonda

II) Medición de los parámetros de conductividad eléctrica, pH, temperatura, oxígeno disuelto, potencial redox y sólidos en suspensión, en una fracción de minutos determinada, mediante un Hydrolop directamente desde el pozo

III) Extracción, mediante la botella WILDCO (1,5 litros), del agua subterránea

IV) Filtración de las muestras

V) Adicción de unas gotas de ácido sulfúrico a las mismas

VI) Introducción de las muestras en recipientes a baja temperatura

6.2 Detalle del análisis en el laboratorio

Para la obtención de la concentración de sodio y potasio en la muestra de agua, ha sido necesaria la realización de los siguientes pasos:

I) Filtración de la muestra en campo. La muestra es filtrada a través de un filtro miliporo de celulosa; de 0,45µm de diámetro por cada poro

II) Acidificación de la muestra en el laboratorio con Ácido Nítrico, hasta llegar a obtener un valor de pH de 2

III) Toma de una cierta cantidad determinada de la muestra (Esta cantidad de la muestra es dependiente del valor de la conductividad eléctrica)

IV) Introducción de cada una de las muestras en un Espectrómetro de Absorción Atómica, modelo AA240FS VARIAN

V) Obtención de la curva de sodio y potasio

A la hora de proceder al análisis de los pesticidas, los siguientes puntos reflejados a continuación representan el procedimiento que se llevó a cabo para el mismo:

I) Almacenamiento de las muestras en frascos de borosilicato color ámbar, con sobretapas de teflón y tapas de baquelita. Mantenidas a una temperatura de 4^{o}C hasta su análisis. (El tiempo de procesamiento de la muestra no excedió de los 15 días tras su toma)

II) Lavado del material de cristalería del laboratorio mediante detergente "extran", seguido de un enjuague con agua destilada caliente

III) Secado y posterior enjuago con un solvente no polar (Hexano) seguido de un solvente polar (Acetona)

IV) Enjuago con agua destilada

V) Deposición en el ultrasonido con detergente "extran" al 20%

VI) Enjuagado final con agua destilada

VII) Deposición en el horno para secado

VIII) Preparación de la curva de calibración del aparato (CLP Organochlorine Pesticide Mix, marca Sigma-Aldrich, No. de catálago 47426-U) con una solución estándar interna de 4-clorofenil-4-clorobencensulfonato (OVEX), a una concentración de 500 ppb *{Para el método de extracción de plaguicidas se utilizaron los siguientes solventes: hexano grado cromatográfico, metilterbutileter grado cromatográfico, metanol grado reactivo, diclorometano grado cromatográfico, agua destilada y agua MiliQ o grado HPLC}*

IX) Extracción de los plaguicidas en fase líquida: En un embudo de separación se toman 500 mL de agua y se extrae con 3x100 ml de CH_2Cl_2

X) Secado con Na_2SO_4 de anhídro, continuando con la filtración

XI) Remoción a presión reducida y cambio gradual por metilterbutiléter hasta obtener un volumen de 5 mL

XII) Secado de la muestra con una corriente de nitrógeno y posterior adicción de 1 mL de hexano grado cromatográfico

XIII) Inyección de los viales con las muestras al cromatógrafo de gases, tras la adicción de 20µl a partir de una solución de estándar interno de 5 ppm y tras aforar los concentrados con 1 mL de hexano grado cromatográfico

XIV) Análisis de las muestras en un cromatógrafo de gases acoplado un detector de captura de electrones

XV) Extracción de los plaguicidas en fase sólida: Filtrado de las muestras para eliminar impurezas

XVI) Acondicionamiento de los cartuchos C18 CHROMABOND de Macherey-*Nagel* *{Con 500 mg de sílice y con un volumen de 6 mL, con un poro de 60 Å, con un tamaño de partícula de 45 µm, con una superficie específica de 500 m^2/g, que cuenta con estabilidad en pH entre 2 y 8}* **Colocando el mismo en en una cámara de vacío, adicionando 5 mL de metanol, seguido de 5 mL de metilterbutileter y 3 mL de agua destilada**

XVII) Secado del cartucho durante un periodo de 5 minutos

XVIII) Retención de los compuestos organoclorados a través de un cartucho de C18, adicionando 500 ml de cada muestra

XIX) Lavado del cartucho C18 con 10 mL de agua destilada para quitar impurezas no deseadas

XX) Elución de los compuestos organoclorados. (Estos son recuperados con 5 mL de metilterbutileter)

XXI) Evaporación del eluato utilizando vacío durante una hora hasta quedar completamente seco

XXII) Adicción de 20µl de una solución estándar interna de 5ppm en los viales donde fue evaporado el eluato y posterior aforado del concentrado con 1 mL de hexano grado cromatográfico.

XXIII) Análisis de las muestras en un cromatógrafo de gases acoplado a un detector de captura de electrones

XXIV) Evaluación del método de extracción con una fortificación de agua destilada con 50, 100 y 500 ppb de cada plaguicida por sextuplicado para cada uno de los métodos de extracción, analizando los porcentajes de recuperación

XXV) Comparación de medias para discernir el método adecuado para su aplicación en este trabajo

XXVI) Análisis de las curvas de calibración, que consta de (1, 10, 50, 100, 500 ppb) a partir de un estándar de 20ppm de Organochlorine Pesticide Mix y una adicción a cada punto de la curva de 20 µL del estándar interno

XXVII) Cuantificación de los plaguicidas mediante el cálculo de las concentraciones de analitos con la siguiente fórmula:

$$[\boldsymbol{analito}] = \frac{\text{á}\boldsymbol{rea\ del\ analito}}{\text{á}\boldsymbol{rea\ OVEX}}\ \boldsymbol{x}\ [\boldsymbol{ovex}]\ \boldsymbol{x}\ (\boldsymbol{FR})$$

Siendo:

[analito] = Concentración de plaguicida

[ovex] = concentración de OVEX

FR = Factor de respuesta

Análisis por cromatografía de gases:

Las muestras fueron analizadas en un Cromatografo de gases marca THERMO SCIENTIFIC acoplado un detector de captura de electrones, los componentes son separados en una columna capilar marca Altech Heliflex® AT-5ms, 30 m de longitud x 0.25 mm de diámetro interno con espesor de la fase de 0,25 µm. Se utiliza como gas de arrastre el Helio, y para "Make up" el Nitrógeno. La rampa de temperatura para el horno durante el primer minuto fue de 60°C. Posteriormente se realizaron incrementos de 30°C/min hasta llegar a 130°C manteniéndose un minuto. Después, se realizaron incrementos de 2°C/min hasta llegar a una temperatura de 200°C y se mantuvo un periodo de tiempo de unos 15 minutos. Finalmente, se realizaron incrementos de 10°C/min hasta alcanzar los 240°C y se mantuvieron por 3,50 minutos.

Se utilizó un flujo de 1 mL/min en la columna, para el inyector se utilizó una temperatura de 250°C con un flujo de 50 mL/min en la modalidad Splitless, con un tiempo de espera de 1 min. Para el detector de captura de electrones se utilizaron temperaturas de 300 y 330 °C para la base y el detector respectivamente, con una corriente de 1 nA y una amplitud del pulso de 50 V. Finalmente el flujo de Nitrógeno empleado como Make up fue de 40 mL/min.

Para el análisis de los elementos trazas en el laboratorio, se llevó a cabo un procedimiento determinado que se muestra a continuación: ***(Dicho análisis se realizó en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí)***

I) Ionización para la extracción de un electrón de la capa exterior del átomo, produciéndose junto al electrón, un ión con carga positiva

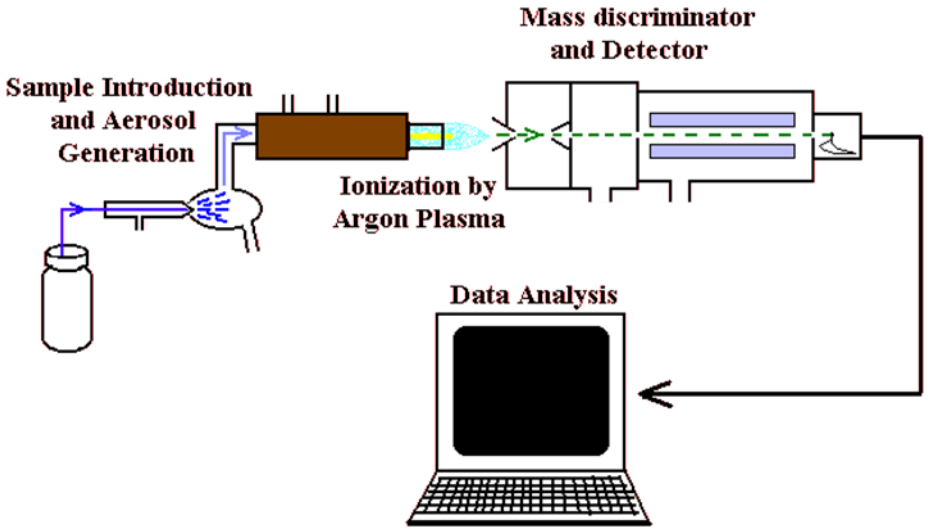
II) Detección a través de la separación de los iones positivos mediante un filtro de masas

La técnica del ICP-MS combina dos propiedades analíticas que la convierten en un potente instrumento en el campo del análisis de trazas multielemental (ver la figura). Por una parte, obtiene una matriz libre de interferencias debido a la eficiencia de ionización del plasma de Ar, por otra parte, presenta una alta relación señal-ruido característica de las técnicas de espectrometría de masas.

El plasma de acoplamiento inductivo de argón es usado como una fuente muy eficaz de iones en su estado M^+. El espectro de masas de esta fuente de iones es medido por medio de un espectrómetro de masas cuadrupolar. Esto es posible mediante una zona de interfase capaz de introducir los iones del plasma a través de un orificio por medio de una unidad de vacío diferencial y posteriormente dentro del filtro cuadrupolar de masa.

El sistema de inyección de la muestra líquida se realiza mediante un sistema nebulizador.

Este sistema consigue la atomización, por efecto Venturi, de la vena líquida que entra en el dispositivo por medio de una bomba peristáltica.



6.3 Tablas de los organofosforados y plaguicidas organoclorados

		ORGANOFOSFORADOS								
Ubicación	Profundidad	ooo-trifenilfosfonato	Thionazin	sulphotec	forate	Dimetoato	Disulfoton	Metilparation	paration	Famfur
ACUAPARQUE	25	9,4805	7,4622	21,2097	20,8872	7,6703	182,9548	4,2725	11,3440	51,4674
BAAG	20	5,6581	3,5084	2,2804	12,2926	4,1520	0,8774	16,6298	4,3008	10,1088
BOMBEROS	25	7,3628	6,4864	1,7231	0,3055	0,4196	0,0625	7,6457	0,8734	4,1956
CHALMUCH	25	7,1644	6,2980	14,1204	0,0637	1,0135	0,0617	8,8563	8,2138	10,1313
CHENKU	20	4,6021	6,3331	3,5197	8,4816	3,5918	0,0355	13,4965	13,6287	5,0103
CHEUMAN	10	4,8408	1,5976	21,7760	11,8201	3,1003	2,3188	13,3962	4,5729	6,6649
CONAGUA	20	8,2033	7,1896	4,9074	0,0109	1,3115	0,0872	14,5219	0,1345	5,2613
CONTENEDORES		22,2765	10,0316	12,2643	9,7424	9,9450	45,3492	24,8848	11,7607	0,0309
CRIO	10	6,2695	5,8480	16,9251	14,3880	1,4421	1,3409	19,5463	410,3275	12,5816
DZIDZILCHE	10		5,4228	34,4826	36,5025	6,5910	3,4898	2,6263	13,1438	0,3628
EXBASURERO 01		2,0589	7,0106	6,0853	1,4648	0,2055	25,1843	8,7471	7,6580	92,9515
EXBASURERO 04		1,2108	8,6313	10,1727	73,2508	1,5955	91,5880	11,5076	5,1536	2,4608
HACIENDA ANICABIL	10	3,4238	5,6427	17,3035	8,8254	0,7880	0,7580	10,7090	0,2147	37,1458
HACIENDA TOO	20	7,0427	7,4156	3,6964	0,0102	5,2141	4,3375	20,4027	0,0559	76,2385
KOMCHEN	20	3,9297	7,7039	10,3399	18,4115	1,3980	0,0327	20,5961	0,0442	16,0268
MATEMATICAS	20	20,1671	12,5913	23,0175	25,9278	21,0512	322,8083	6,2452	107,3114	9,1691
MEGALITA		4,6741	5,3527	16,5635	7,3080	2,1137	191,4484	11,3246	242,4964	14,6450
MOCOCHA		5,0411	6,1969	4,1683	0,0081	2,8510	0,0329	16,5926	4,3638	12,8748
OBSERVATORIO	20	1,9438	3,3747	14,0846	0,0108	0,4768	1,2584	9,1525	5,0898	4,1726
PACABTUN	20	6,3327	7,8927	10,2079	3,3963	3,4499	0,0229	13,8855	3,5028	5,9703
PMANANTIAL 3		11,0466	13,9085	18,7467	13,3120	1,7680	9,1843	21,3239	5,3617	1,2547
PMANANTIAL 6		7,6054	14,7472	21,5658	9,0431	9,7489	41,5650	17,6111	5,8352	0,1927
PMANANTIAL 8			166,7950	16,4083	0,1884	50,7877	0,8863	2,1614	59,1054	2,3469
PREDECO	15	7,2928	7,7442	3,8759	0,0177	6,7853	0,0687	10,1662	4,7110	4,6747
RANCHO VAZQUEZ	10	4,4986	7,5350	40,2356	0,0054	4,3086	0,0622	19,3551	0,0859	13,8928
SAC NICTE	20	5,8830	5,6330	3,7592	4,1700	3,6825	4,3070	32,4828	10,1436	7,4320
SAGARPA	20	22,9517	5,6134	10,5722	43,3660	3,4811	307,1705	11,3106	34,0649	29,9428
SAN MIGUEL	10	6,7464	5,8995	0,6991	7,2487	3,1508	5,4939	21,9678	4,4152	5,8528
SIERRA PAPACAL	10	6,6732	6,9691	4,9837	0,0367	7,7491	952,9007	8,7225	2,1500	3,0175
TECNOLOGICO	20	17,0787	6,5503	51,2594	48,7415	3,6161	393,8468	11,1826	35,4977	8,9489
TIXCUYTUN	20	6,5376	7,0239	27,5202	0,0410	0,4464	0,0271	12,0034	6,6072	5,2780
UCU	10	8,3061	6,9304	2,2315	1,2420	2,5887	0,0210	5,4028	8,1444	8,6247
UDS	20	2,8886	7,7677	4,2760	2,5660	11,9294	3,8638	46,2665	4,2645	0,8363
X´LUCH	15	3,8309	4,5107	1,3558	0,0074	2,8780	6,5985	13,8275	1,8367	7,5765

Ubicación	Profundidad	a-lindano	b-lindano	d-lindano	g-lindano	**Suma de lindanos**	Aldrín	Dieldrín	Endrín	Endrín aldehído	Endrín cetona	**suma Drines**
ACUAPARQUE	25	9,1628	1,3430	1,1911	0,9999	12,6967	0,0047	38,2412	9,2298	9,6537	16,9318	74,0612
BAAG	20	9,2576	0,2348	2,8483	0,0524	12,3931	0,7129	1,2320	2,1918	0,0337	6,5393	10,7097
BOMBEROS	25	7,9920	0,2438	1,7823	0,0437	10,0617	0,3164	1,5121	0,1136	0,1977	0,8087	2,9485
CHALMUCH	25	4,3987	0,3190	2,7154	0,1351	7,5682	0,5800	0,1033	2,8601	0,0158	1,4498	5,0091
CHENKU	20	8,6489	0,2577	5,1464	0,1696	14,2227	0,8067	2,6296	0,7294	0,8906	0,9531	6,0095
CHEUMAN	10	11,0013	0,0431	2,5088	0,2322	13,7855	0,5538	133,7566	0,0043	0,3454	1,3313	135,9914
CONAGUA	20	12,1643	0,0224	3,2140	0,1235	15,5241	1,9083	2,1242	1,9229	0,0245	0,9473	6,9272
CONTENEDORES		8,6597	2,9858	53,6280	0,6178	65,8913	1,1603	11,7861	2,4606	0,0254	0,4978	15,9302
CRIO	10	14,5541	0,5129	4,2451	0,1040	19,4161	3,6539	2,4704	1,1382	0,2330	6,2335	13,7290
DZIDZILCHE	10	10,3695	1,7022	43,1926	0,3897	55,6540	0,4255	7,5154	2,4425	0,0322	2,2481	12,6636
EXBA SURERO 01		5,9896	6,7779	1,8527	0,3474	14,9675	0,4143	165,9298	1,9045	0,0135	1,5941	169,8562
EXBA SURERO 04		4,2661	6,0214	49,9643	0,2097	60,4616	1,8930	7,4483	16,4698	9,4310	1,4559	36,6980
HACIENDA ANICABIL	10	13,0610	0,4776	4,0799	0,0737	17,6922	0,5701	52,2100	0,2861	0,0203	1,0423	54,1289
HACIENDA TOO	20	14,5450	0,7280	4,0039	0,0529	19,3297	2,3847	158,2504	4,4431	0,2453	7,2883	172,6117
KOMCHEN	20	18,0703	0,6903	6,1056	0,3401	25,2063	0,9022	0,0236	2,8271	0,0594	9,8347	13,6470
MATEMATICAS	20	5,8426	17,1365	0,9797	0,2927	24,2515	0,2212	0,0043	15,0986	2,5656	4,1852	22,0749
MEGALITA		11,0595	1,0144	4,9797	0,0693	17,1229	7,6579	0,1728	3,3184	0,0825	2,1711	13,4027
MOCOCHA		15,4693	0,4943	4,4295	0,0603	20,4535	0,7809	4,1460	0,8009	0,0116	6,8361	12,5755
OBSERVATORIO	20	8,7156	0,3491	2,3286	0,0638	22,1069	0,3716	56,0958	1,7348	0,1408	5,1814	7,1438
PACABTUN	20	16,8296	0,3092	4,3077	0,1832	21,6298	0,7769	5,1145	1,5175	0,0253	1,2388	8,6730
PMANANTIAL 3		8,2363	0,7940	31,9491	0,6809	41,6602	0,4256	8,7778	1,9417	0,0106	0,2575	11,4132
PMANANTIAL 6		7,3165	6,8183	39,4739	0,8173	54,4260	1,3191	7,5131	1,9530	0,0567	0,3687	11,2106
PMANANTIAL 8		1,5420	7,6010	0,3625	0,8122	10,3177	0,9243	46,6394	21,8438	1,4078	3,3683	74,1835
PREDECO	15	8,8375	0,0191	4,7295	0,1283	13,7143	1,0795	4,2984	1,2805	1,1149	0,6936	8,4669
RANCHO VAZQUEZ	10	16,4182	0,6602	4,0470	0,0667	21,1922	2,7743	3,5534	1,2050	0,0343	7,9186	15,4855
SAC NICTE	20	6,2235	0,4861	2,8093	0,2374	9,7564	0,7610	3,3342	3,8431	0,0322	7,9952	15,9657
SAGARPA	20	13,3944	2,3882	2,6184	0,4658	18,8668	0,2075	4,8173	26,1314	18,7137	15,7921	65,6621
SAN MIGUEL	10	14,9894	0,2404	4,6007	0,1395	19,9700	0,9473	3,9566	2,2663	0,9622	1,3497	9,4822
SIERRA PAPACAL	10	9,1036	0,2441	3,5316	0,1217	13,0010	38,1160	2,3448	0,0035	0,0478	0,5589	41,0709
TECNOLOGICO	20	12,4173	11,8682	2,2840	0,4694	27,0389	0,1827	0,0081	21,4475	1,2625	6,3416	29,2424
TIXCUYTUN	20	13,3902	0,3876	3,1672	0,0880	17,0329	0,7399	3,5059	0,0037	0,3392	1,3462	5,9349
UCU	10	1,4053	1,0994	2,1480	0,0820	4,7348	0,4526	0,0146	0,6404	0,0382	1,2383	2,3841
UDS	20	7,0430	1,1135	9,9555	0,4724	18,5844	1,9782	3,2417	2,1638	0,0073	6,6850	14,0760
X´LUCH	15	8,4043	0,2913	2,2490	0,0138	10,9584	2,6333	1,0526	0,6322	0,1388	5,2576	9,7144

Ubicación	a-clordano	g-clordano	**Suma de clordanos**	Heptacloro	Heptacloro epoxido	**suma Heptacloro**	Endosulfan I	Endosulfan II	Endosulfan sulfato	**Suma de endosulfan**
ACUAPARQUE	7,1411	0,3868	7,5279	0,7004	11,7531	12,4535	108,5117	27,1150	0,1063	135,7329
BAAG	7,6099	0,0061	7,6160	0,0067	2,8802	2,8869	1,8327	5,1000	6,5563	13,4890
BOMBEROS	4,2629	0,0095	4,2724	0,3258	0,4094	0,7353	0,0725	2,4166	5,0544	7,5436
CHALMUCH	4,4219	0,1980	4,6199	0,0480	2,1728	2,2208	0,4055	8,4313	1,6064	10,4433
CHENKU	1,3678	0,1857	1,5534	0,3163	2,1838	2,5001	0,1761	6,6075	0,6558	7,4394
CHELMAN	3,4155	0,0267	3,4422	0,0487	2,1160	2,1647	1,4163	6,0853	0,6116	8,1133
CONAGUA	10,2635	0,0142	10,2777	0,6420	1,2680	1,9100	0,1551	6,2601	8,0510	14,4661
CONTENEDORES	31,6106	0,2056	31,8162	2,0914	15,6646	17,7560	30,3089	22,4339	2,3677	55,1104
CRIO	20,1759	0,3925	20,5684	0,0838	2,5065	2,5903	0,4152	9,4150	9,2358	19,0660
DZIDZILCHE	13,5065	0,1791	13,6856	2,0241	7,9876	10,0117	0,3910	20,6332	9,7134	30,7376
EXBASURERO 01	36,4275	0,0036	36,4311	0,4366	3,8956	4,3321	12,3865	5,5097	3,2100	21,1062
EXBASURERO 04	13,5938	0,9146	14,5083	1,0822	4,5894	5,6717	19,2981	11,4597	24,7288	55,4866
HACIENDA ANICABIL	8,5758	0,0131	8,5890	0,6160	1,1432	1,7592	0,8562	3,0627	6,5213	10,4402
HACIENDA TOO	81,5712	0,4722	82,0434	0,3962	4,3171	4,7133	0,8383	10,9253	8,1631	19,9266
KOMCHEN	73,4025	0,1028	73,5053	0,5557	1,4622	2,0179	0,2443	10,3943	8,6944	19,3330
MATEMATICAS	127,7549	0,0076	127,7626	0,3290	55,2744	55,6035	154,7092	33,1487	0,7615	188,6194
MEGALITA	15,4939	0,0450	15,5388	0,0089	3,0971	3,1059	0,2179	10,2066	8,8535	19,2781
MOCOCHA	8,9500	0,7040	9,6540	0,2587	3,4296	3,6883	1,1519	12,1562	9,4725	22,7807
OBSERVATORIO	16,9175	0,0125	1,5592	0,3151	3,7269	11,4927	0,5240	8,4571	5,5276	14,7401
PACABTUN	6,7960	0,0189	6,8149	0,9469	2,1738	3,1208	8,9205	9,6368	10,8463	29,4036
PMANANTIAL 3	10,5938	0,0689	10,6628	1,5199	7,8909	9,4108	7,5367	7,0458	9,6840	24,2665
PMANANTIAL 6	13,8755	0,1843	14,0599	1,5577	5,1376	6,6952	16,4221	4,8685	2,2258	23,5164
PMANANTIAL 8	90,6396	0,2304	90,8700	6,8067	28,1257	34,9324	89,7296	95,0617	5,4224	190,2137
PREDECO	6,1355	1,1584	7,2939	1,4303	2,0010	3,4313	0,0997	1,3144	0,5890	2,0031
RANCHO VAZQUEZ	91,7020	0,0499	91,7519	0,0383	3,4821	3,5205	0,3100	17,8973	9,7797	27,9870
SAC NICTE	8,3863	0,0438	8,4301	0,0294	1,3095	1,3389	1,4031	7,8514	16,7108	25,9652
SAGARPA	215,4205	0,8125	216,2330	3,6889	13,5460	17,2349	225,1106	37,0159	12,1117	274,2381
SAN MIGUEL	5,2260	0,0463	5,2723	0,9417	2,7932	3,7349	0,3305	10,7732	2,0671	13,1708
SIERRA PAPACAL	5,0875	0,0492	5,1367	0,2409	1,9241	2,1650	0,1772	8,3639	7,8229	16,3640
TECNOLOGICO	171,9954	0,0539	172,0493	0,4200	25,3978	25,8178	174,8015	44,5250	9,6417	228,9682
TIXCUYTUN	41,2498	0,0170	41,2669	0,0290	1,7177	1,7467	44,8167	8,0197	1,0896	53,9260
UCU	12,0689	0,0455	12,1144	0,0110	1,5436	1,5546	0,0119	7,5157	0,5332	8,0608
UDS	9,2117	0,0737	9,2854	1,9447	2,6291	4,5739	0,7732	3,0190	9,1478	12,9401
X' LUCH	20,1858	0,2995	20,4853	0,5767	1,8378	2,4145	1,2555	11,8563	5,3683	18,4801

Ubicación	DDT	DDD	DDE	Suma de DDT	Metoxicloro
ACUAPARQUE	6,0725	12,1219	7,6403	25,8347	1,5120
BAAG	5,6539	12,3226	23,8922	41,8686	2,1511
BOMBEROS	2,1423	4,6301	8,4293	15,2018	1,1307
CHALMUCH	1,4607	7,0563	23,7823	32,2993	2,1226
CHENKU	1,4257	5,7946	12,2896	19,5099	1,6601
CHEUMAN	6,7576	8,4250	11,1222	26,3049	2,2917
CONAGUA	4,4689	4,3785	11,9131	20,7606	1,8787
CONTENEDORES		20,5914	0,2317	20,8231	2,4865
CRIO	6,0317	7,4493	52,8924	66,3734	2,4699
DZIDZILCHE	0,4070	8,5297	0,2548	9,1915	2,7300
EXBASURERO 01	4,7677	6,0273	24,1885	34,9835	1,6325
EXBASURERO 04	1,2396	9,1302	3,6293	13,9991	2,1973
HACIENDA ANICABIL	1,9877	5,4491	7,8769	15,3138	2,2560
HACIENDA TOO	6,5360	12,1282	30,3287	48,9929	3,0671
KOMCHEN	3,3809	12,6227	37,4429	53,4465	3,4275
MATEMATICAS	3,9149	17,8902	28,9918	50,7969	1,7540
MEGALITA	7,4927	9,1428	37,2861	53,9216	2,8998
MOCOCHA	6,5321	11,9045	35,8040	54,2405	3,8325
OBSERVATORIO	2,6197	20,8265	12,1341	2,4372	1,0915
PACABTUN	4,2184	6,7656	13,9611	24,9451	2,9957
PMANANTIAL 3	3,9409	16,0747	0,2366	20,2522	1,2917
PMANANTIAL 6	6,1695	0,7365	5,3186	12,2246	1,4255
PMANANTIAL 8	2,1966	39,3018	12,1160	53,6143	37,8315
PREDECO	0,5392	0,0018	7,8506	8,3916	4,1270
RANCHO VAZQUEZ	8,7013	14,5413	109,7484	132,9910	2,3966
SAC NICTE	4,1785	1,0560	4,0241	9,2586	2,7102
SAGARPA	2,3207	15,6683	25,4129	43,4018	1,1779
SAN MIGUEL	4,3706	7,4465	14,2486	26,0658	2,1798
SIERRA PAPACAL	2,9913	5,0392	6,7359	14,7664	1,6803
TECNOLOGICO	9,1865	23,0558	24,1282	56,3704	2,7203
TIXCUYTUN	5,8523	11,4056	14,2880	31,5459	1,7038
UCU	4,0321	10,0866	26,7553	40,8740	1,1910
UDS	0,0653	3,1150	1,0956	4,2760	12,0931
X´LUCH	4,8271	9,8501	23,0538	37,7309	1,5169