



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias del Agua

**IMPACTO DE COMPUESTOS ORGANICOS
PERSISTENTES (COP's) EN LA ZONA SUR DEL
ACUÍFERO DE QUINTANA ROO, MÉXICO**

Tesis que presenta

ABRAHAM AGUSTÍN VARGAS HERNÁNDEZ

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

CANCÚN, QUINTANA ROO, FEBRERO 2015



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis titulado “**Impacto de compuestos orgánicos persistentes (COP’s) en la zona sur del acuífero de Quintana Roo, México**” fue realizado en los laboratorios de la Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección de la Dra. Rosa María Leal Bautista, perteneciente a la Maestría en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente,

Dr. Manuel Martínez Estévez

Director de Docencia

Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.

Cancún, Quintana Roo, México; a Marzo de 2015.

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

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

Firma: _____

Abraham Agustín Vargas Hernández

AGRADECIMIENTOS

A mi directora de tesis Dra. Rosa Ma. Leal Bautista, por su apoyo y empuje para que llegara al final de esta meta.

A mi comité tutelar y jurado, Dra. Cecilia Hernández Zepeda, Dr. Luis E. Marín Stillman, Dr. Ismael Orozco Medina y Dr. Diego Armando Casas Beltrán por el apoyo personal y científico que fue de gran ayuda para la conclusión de este proyecto.

A la M.C. Laura Fernández Pérez agradezco su apoyo y disposición a escuchar mi crecimiento profesional.

A todo el grupo de técnicos de la Unidad de Ciencias del Agua, en especial a la M.C. Cinthya Denisse Grimaldo Hernández. Por su apoyo en laboratorio para la conclusión de este proyecto.

Al Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP)

A la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) Chetumal

A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

DEDICATORIA

A mis padres Marco Antonio Vargas Colín y María Antonieta Hernández Mellado por su amor, apoyo, enseñanzas y consejos he forjado mi camino personal y profesional.

A Laura Fernández Pérez, por el amor, comprensión, alegría y todo el apoyo en las buenas y en las malas, a pesar de la distancia. Mil gracias, eres una gran mujer!

A todas mis hermanitas Athenea, Thalia, Hebe, Mildred y Najla cuya unión y amor han acompañado mi camino, las quiero mucho.

A mi abuelita, a mis tíos y primos por todo su apoyo y cariño

A todos mis amigos de la Universidad: Aglae, Eduardo, Abraham, Paco, Yazid y a mi hermano Erick por todo su apoyo a pesar de la distancia.

A mis compañeros de la maestría Paulina, Fayco , Alejandro, Paloma, Ali, Lucia, Rocio, Damaris, Juan y Gino por todos los buenos momentos que compartimos a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.

A Alex, Robert, Nico, Jon, Marifer, Victor, Zyan, Diego por su apoyo y amistad para hacer de mi estancia en Quintana Roo más amena.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPITULO I	3
1.1. IMPORTANCIA DE LA PROBLEMÁTICA	3
1.2. ANTECEDENTES	4
1.2.1. Importancia de la Actividad Agrícola	4
1.2.2. Importancia del Sistema Subterráneo: Suelo	9
1.2.3. Importancia del Sistema Subterráneo: Agua	13
1.2.4. Geología	14
1.2.5. Edafología.....	19
1.2.6. Hidrogeología.....	21
1.2.7. Vulnerabilidad del sistema subterráneo.....	27
1.3. ALCANCES	29
1.4. HIPÓTESIS	29
1.5. OBJETIVO GENERAL	30
1.6. OBJETIVOS PARTICULARES	30
1.7. REFERENCIAS	30
CAPITULO II COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES PRESENTES EN EL SISTEMA SUBTERRÁNEO POR LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS	37
2.1. INTRODUCCIÓN	37

2.2. METODOLOGIA	38
2.2.1 Selección de sitios de muestreo	38
2.2.2. Precipitación y temperatura	41
2.2.3. Parámetros físico-químicos	41
2.2.3.1. Suelo	41
2.2.3.2. Lixiviados.....	41
2.2.3.3. Agua Subterránea	41
2.2.4. Detección de compuestos orgánicos persistentes COP´s.....	42
2.2.4.1. Sistema subterráneo: Suelo	42
2.2.4.2. Sistema subterráneo: Agua	42
2.2.5. Análisis cromatográfico Presencia/Ausencia COP´s	43
2.3. RESULTADOS	44
2.3.1. Precipitación y Temperatura.....	44
2.3.2. Parámetros físico-químicos	49
2.3.2.1. Suelos	49
2.3.2.2. Lixiviados.....	49
2.3.2.3. Agua Subterránea	49
2.3.3. Detección de compuestos orgánicos persistentes COP´s.....	50
2.3.3.1. Generación de lixiviados	50
2.3.3.2. Identificación de los COP´s (Lixiviados)	53
2.3.3.3. Sistema subterráneo: Suelo	54
2.3.3.4. Identificación de los COP´s (Suelos)	56
2.3.3.5. Sistema Subterráneo: Agua	57
2.4. DISCUSION	63
2.5. CONCLUSIONES	64
2.6. REFERENCIAS	65

CAPITULO III EVIDENCIA DEL USO DE COP´s COMO INDICADORES DE LA DIRECCION DE FLUJO SUBTERRANEO	68
3.1. INTRODUCCIÓN	68
3.1.1. Importancia del uso de trazadores en la hidrogeología	71
3.2. METODOLOGIA	72
3.2.1 Identificación de condiciones hidrogeológicas.....	72
3.3. RESULTADOS	76
3.4. DISCUSION	79
3.5. CONCLUSION	80
3.6. REFERENCIAS	80
CAPITULO IV	83
4.1. CONCLUSIONES	83

LISTADO DE ABREVIATURAS

CICOPLAFEST- Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas

CONAGUA - Comisión Nacional del Agua

COP's - Contaminantes Orgánicos Persistentes

EPA - Environmental Protection Agency (Agencia de protección ambiental)

FAO - Food and Agriculture Organization (Organización de la naciones unidas para la agricultura y alimento)

GC-ECD – Gas Chromatography- Electron Capture Detector (Cromatografía de gases- detector de captura de electrones)

GC-FID – Gas Chromatography- Flame Ionization Detector (Cromatografía de gases- detector iónico de flama)

GPS- Geo Posicionador Satelital

INEGI – Instituto Nacional de Estadística y Geografía

INIFAP – Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias

LDC- Límite de detección de calidad

LMP- Límite máximo permisible

OMS- Organización Mundial de la Salud

ONG- Organización no gubernamental

OPS- Organización Panamericana de la Salud

PAN- Pesticide Action Network

PY- Península de Yucatán

SGM- Servicio Geológico Mexicano

SPME- Solid Phase Micro Extraction (Micro extracción de fase sólida)

UCIA-CICY- Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Zona vadosa o no saturada y zona saturada que distingue el transporte de contaminantes por infiltración (Univ. Complutense, 2013).	11
Figura 1. 2 Proceso de lixiviación (Reporte INIFAP 2012-2013).	13
Figura 1. 3 Estratigrafía en la zona de estudio.	16
Figura 1. 4 Mapa Geológico de la PY (Tomado de SGM).	17
Figura 1. 5 Mapa Geológico del Sur de Quintana Roo (Tomado de SGM).	18
Figura 1. 6 Edafología del estado de Quintana Roo (INEGI, 2012).	20
Figura 1. 7 Hidrogeología en la zona de estudio.	23
Figura 1. 8 Trayectorias del flujo preferencial a una escala regional (Bauer-Gottwein <i>et al.</i> , 2011).	25
Figura 1. 9 Dirección de flujo en aguas subterráneas para la PY (Tomado de Bauer-Gottwein <i>et al.</i> , 2011).	26
Figura 1. 10 Mapa de direcciones de flujo en zona de estudio (CONAGUA, 2009).	27
Figura 2. 1 Pozos de distribución (Azul), pozos de uso agrícola (Rojo) y puntos de monitoreo de lixiviados y suelos (Anaranjado); zona cañera, sur de Quintana Roo.	40
Figura 2. 2 Precipitación y Temperatura 2012 en estaciones agroclimáticas ubicadas en la zona cañera.	45
Figura 2. 3 Precipitación y Temperatura 2013 en estaciones agroclimáticas ubicadas en la zona cañera.	47

Figura 2. 4 Precipitación y Temperatura 2014 en estaciones agroclimáticas ubicadas en la zona cañera.....	48
Figura 3. 1 Cortes Litológicos efectuados en el 2009 se definió el espesor de la zona de suelos y sedimentos, por lo que los colectores de lixiviados captaron la migración de lixiviado generado en la superficie y que se infiltró al subsuelo.	69
Figura 3. 2 Direcciones de flujo en la PY. (Tomado de Bauer-Gottwein <i>et al.</i> , 2011).....	73
Figura 3. 3 Dirección del flujo que representa el movimiento del agua subterránea de oeste a este donde descarga hacia la zona de río Hondo en la parte extrema de la zona de estudio.	74
Figura 3. 4 Mapa de la zona cañera con pozos agrícolas (rojo) y pozos de distribución de agua potable (blanco), donde se observa que se obtuvieron con los trazadores involuntarios (Figura 3.4 a) coincide con las señaladas por CONAGUA (Figura 3.4 b)	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Límites máximos permisibles de compuestos orgánicos en agua potable.	8
Tabla 1. 2 Unidades sedimentarias de la PY.....	17
Tabla 2. 1 Coordenadas UTM de los sitios de colecta de suelo y lixiviado en la Zona Cañera.....	39
Tabla 2. 2 Coordenadas UTM de los pozos potables y agrícolas en la zona cañera.	39
Tabla 2. 3 Listado de plaguicidas identificados por grupo.....	43
Tabla 2. 4 Límites de detección para los tres grupos de plaguicidas analizados.	44
Tabla 2. 5 Tipos de suelo en puntos de muestreo.....	49
Tabla 2. 6 Parámetros fisicoquímicos en Pozos agrícolas y de distribución de agua potable.....	50
Tabla 2. 7 COP's de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en lixiviados (Lluvias- Julio).....	51
Tabla 2. 8 COP's de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en lixiviados (Lluvias- Octubre).....	52
Tabla 2. 9 Número de plaguicidas encontrados en lixiviados a diferentes profundidades en temporada de lluvias.....	53
Tabla 2. 10 Organoclorados presente en las temporadas de lluvias y secas en los suelos de la zona cañera.....	54
Tabla 2. 11 Organofosforados presentes en las temporadas de lluvias y secas en los suelos de la zona cañera.	55

Tabla 2. 12 Piretroides presentes en las temporadas de lluvias y secas en los suelos de la zona cañera.....	55
Tabla 2. 13 Numero de plaguicidas encontrados en suelos por tipos de compuesto orgánico (lluvias y secas).....	56
Tabla 2. 14 Numero de plaguicidas encontrados en suelos a diferentes profundidades en temporada de lluvias.....	57
Tabla 2. 15 COP´s de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en Agua Subterránea de Pozos de Uso Agrícola y Pozos de Agua Potable.	59
Tabla 2. 16 COP´s de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en Agua Subterránea de Pozos de Uso Agrícola (Secas).	61
Tabla 2. 17 COP´s de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en Agua Subterránea de Pozos de Agua Potable (Lluvias- Secas).	61
Tabla 3. 1 Comparativo de contaminantes orgánicos en suelos, lixiviados y agua subterránea.	75
Tabla 3. 2 Concentración de organofosforados en pozos de uso agrícola y agua potable.	76

RESUMEN

En México existen pocos estudios relacionados con el impacto de las actividades agrícolas en la calidad del agua subterránea. Ubicado en la Península de Yucatán (PY); Quintana Roo, es el estado con el desarrollo turístico más rápido del país; sin embargo, la actividad agrícola desarrolla el 4.3% de los ingresos para el estado. Situado en la frontera de México y Belice se encuentra la cuenca de Río Hondo, donde se realizan actividades agrícolas como el cultivo de caña de azúcar, en un área de aproximadamente 22.000 hectáreas de terreno, que año tras año, se fertiliza y riega con compuestos orgánicos (organoclorados, organofosforados y piretroides) que son clasificados como contaminantes orgánicos persistentes (COP's) por la Organización Mundial de la Salud. Dadas las características de la vulnerabilidad de los acuíferos cársticos costeros (porosidad y permeabilidad) de la PY, éstos corren un alto riesgo de contaminación del recurso, en específico por los lixiviados orgánicos generados durante la temporada de lluvias, enriquecida por los plaguicidas y herbicidas utilizados en los cultivos de caña de azúcar al sur del estado de Quintana Roo.

Por lo tanto, se planteó evaluar el impacto de los COP's en el agua subterránea, mediante la determinación de COP's en suelos y lixiviados, los resultados de este estudio muestran que los COP's alcanzan el acuífero y la influencia de la dirección de flujo indica que son transportados al río Hondo impactando algunos de los pozos de distribución de las ciudades conforme avanza.

ABSTRACT

In Mexico there are few studies related to the impact of agricultural activities on groundwater quality studies. Located in the Yucatan Peninsula (PY); Quintana Roo, is the state with the nation's fastest rate of tourism development, however, the agricultural activity represents only 4.3% of the total revenue for the state. Located on the border of Mexico and Belize is the basin of Rio Hondo, where sugarcane is the main agricultural activity for the state, in approximately 22,000 hectares of land. Year after year, this activity use organic compounds to fertilized and protect the crops with organic compounds (such as organochlorides, organophosphates and pyrethroids) all of them which are classified as persistent organic pollutants (POPs) by the World Health Organization. Given the characteristics of the vulnerability of the coastal karstic aquifers (porosity and permeability) of the PY, there is a high risk of contamination of the water resource, specifically due to the organic leachate generated during the rainy season, enriched by these organic compounds (POP,s) as pesticides and herbicides used in sugarcane crops in the southern state of Quintana Roo.

The results of this study show that POPs reach the aquifer and the influence of the flow direction are transported to the Hondo river impacting some of the wells distribution of cities as it moves.

CAPITULO I

1.1. IMPORTANCIA DE LA PROBLEMÁTICA

En el mundo, uno de los graves problemas de la agricultura es el deterioro ambiental y su consecuente afectación a la salud humana, ya sea de forma directa o a través de la cadena trófica; un componente importante de este fenómeno es la contaminación del agua superficial en ríos y manantiales y del agua subterránea extraída en pozos de bombeo, (Silva *et al.*, 2002) que constituyen una fuente de contaminación por la falta de control en la aplicación de diferentes compuestos (fertilizantes, pesticidas y herbicidas) que son transportados por escorrentía o infiltración (lixiviación) debido a los volúmenes de precipitación y riego presente en la zona (Delgado- Carranza, 2010).

Por otra parte, el acuífero en la PY es reconocido por la gran reserva de agua dulce que contiene, ya que es el principal abastecedor de agua utilizada en las actividades humanas. Para preservar estos acuíferos es necesario reconocer, estudiar y evaluar las amenazas (niveles y tipos de contaminantes) la vulnerabilidad (la protección natural del medio físico-biótico hacia el acuífero) y el riesgo de contaminación del acuífero (integración de las amenazas y la vulnerabilidad) (Bautista *et al.*, 2011).

Ubicada en la cuenca del Río Hondo, al Sur del estado de Quintana Roo, se encuentra la zona cañera, con una extensión agrícola de aproximadamente 22,000 has., que ocupa la mayor parte de los municipios de Álvaro Obregón y Pucté, en la cual, se aplican compuestos orgánicos para evitar las plagas que se generan con la producción de caña, (CONAGUA, 2009).

El creciente desarrollo de las actividades agropecuarias en la cuenca y la falta de una red de medición de la dinámica del acuífero en esa zona, han generado preocupación por parte de las dependencias involucradas en la administración y explotación de las aguas nacionales ante los posibles descensos del nivel de agua subterránea lo que podría repercutir directamente en los caudales de explotación o en la calidad del agua extraída con el consiguiente impacto en la actividad y por ende en la economía de la zona (CONAGUA, 2009).

Las características hidrogeológicas (porosidad y permeabilidad), lo somero de los suelos y la heterogeneidad presente en diferentes puntos a lo largo de la zona cañera, permiten una rápida infiltración del agua hacia el acuífero, por consiguiente, en el presente trabajo se estudió la presencia de compuestos orgánicos en el agua subterránea, debido a que son transportados por lixiviación a través de la zona vadosa hasta llegar a recargar al acuífero; y una vez presentes en el agua subterránea, estos son transportados con la dirección de flujo, desde los campos agrícolas hasta los pozos de distribución de agua potable ubicados en los poblados de la zona cañera y continuar desplazándose hasta desembocar en el Río Hondo, provocando un riesgo tanto para la salud humana, así como del ambiente.

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. Importancia de la Actividad Agrícola

A nivel mundial la agricultura es la actividad que consume la mayor cantidad de agua, lo que conlleva a la aplicación de fertilizantes y plaguicidas en exceso, que junto con la descomposición de residuos orgánicos pueden producir contaminación en dichos sitios (USDA-SCS, 1992) y ocasionar un deterioro en los acuíferos, llegando a ser irreversibles o su saneamiento extremadamente costoso (Reynoso *et al.*, 2005).

En México, el riego agrícola consume más del 78% del agua que se extrae y produce poco más del 50% de la producción agrícola nacional. La eficiencia de riego en México es de sólo el 45%, debido a pérdidas de agua durante la conducción y por el manejo en el cultivo (Coll-Hurtado, 2003).

Por otra parte, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2007) los contaminantes orgánicos persistentes (COP's), son un grupo de compuestos químicos que han sido producidos y liberados en el medio ambiente de manera intencional o accidental; y a raíz de su estabilidad y propiedades de transporte, los encontramos ampliamente distribuidos en todo el mundo, hasta en lugares en los que nunca han sido utilizados, como son, las regiones árticas, y que se caracterizan por ser móviles y persistentes.

Los COP's más conocidos son los plaguicidas, como el DDT, los productos químicos industriales, como los bifenilos policlorados (PCB) y las dibenzodioxinas policloradas (PCD), estas últimas utilizadas como intercambiadores de calor y fluidos dieléctricos en sistemas eléctricos, como transformadores. En conjunto, los COP's por su toxicidad, además de poner en peligro la salud de quienes los manipulan, en ciertas condiciones son capaces de afectar la fauna, provocando la muerte en peces y aves ya sea por envenenamiento agudo o provocar la acumulación en sus tejidos, ocasionando un envenenamiento crónico y por consiguiente afectar el medio ambiente ya sea en el aire, suelo y agua en diferentes ecosistemas (Baddi, *et al.*, 2006).

Sin embargo, se reconoce que son sustancias químicamente complejas, que una vez aplicadas en el ambiente, están sujetas a una serie de transformaciones a nivel físico, químico y biológico (OMS, 2007). Estas transformaciones pueden conducir a la generación de fracciones o a la degradación total de los compuestos que en sus diversas formas pueden llegar a afectar en los diferentes niveles de un ecosistema (Garrido *et al.*, 1998). En la actualidad, uno de los mayores problemas es el uso indiscriminado y sin control de estos compuestos (López-Geta *et al.*, 1992), además de que pueden ser arrastrados por las corrientes de aire y agua permitiendo su transporte a grandes distancias; además los residuos volátiles pasan a la atmósfera y regresan con la lluvia a otros lugares (López-Geta *et al.*, 1992).

Por otra parte, desde 1985, la organización Pesticides Action Network (PAN), están trabajando en lo que se denominó "La Campaña contra la Docena Sucia", siendo los compuestos orgánicos presentes: DDT, Lindano, Los "drines" (Aldrin, Dieldrin, Endrin), Clordano/Heptacloro, Paration, Paraquat, 2-4-5-T, Pentaclorofenol, Dibromocloropropano, Dibromuro de etileno, Canfecloro y Cloridimeformo que son los compuestos que más dañan el ambiente.

Dentro de estos grupos químicos, los plaguicidas son sustancias o mezcla de sustancias que se siguen utilizando de manera intensiva para matar, reducir o repeler plagas, y se denominan según el tipo de plaga (OMS, 2004).

La misma OMS, clasifica estos compuestos en base a su peligrosidad siendo la clasificación: sumamente peligroso (IA), moderadamente peligroso (II) y ligeramente peligroso (III).

Para México, la Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICOPLAFEST), nos indica que los compuestos orgánicos se pueden clasificar en cuanto a su concentración, persistencia y uso al que se destinan.

En cuanto a su “*concentración*” puede ser un “plaguicida técnico” que tiene la máxima concentración del ingrediente activo obtenida como resultado final de su fabricación de la cual se parte para preparar un “plaguicida formulado” el cual es la mezcla de más de un plaguicida técnico cuyo objetivo es dar estabilidad al ingrediente activo y hacerlo más útil, constituyendo la forma usual de aplicación.

Su “*persistencia*”, se basa en si son ligeramente persistentes (menos de cuatro semanas), poco persistentes (de cuatro a veintiséis semanas), moderadamente persistentes (de veintiséis a cincuenta y dos semanas), altamente persistentes (más de un año a menos de veinte años) y permanentes (más de veinte años).

El “*uso que se les destina*”, puede ser forestal, urbano, para jardinería, pecuario, domestico, industrial o agrícola.

Finalmente, en base a su “*familia química*”, los plaguicidas se dividen en 11 grupos principales, como son: Arsenicales, Carbamatos, Derivados de cumarina, Derivados de urea, Dinitrocompuestos, Organoclorados, Organofosforados, Organometálicos, Piretroides, Tiocarbamatos y Triazinas. En la producción de la caña de azúcar se utilizan principalmente cuatro grupos: carbamatos, organoclorados, organofosforados y piretroides (Ramírez y Lacasaña, 2001).

Estos tres últimos en especial se puede decir que los “organoclorados” son compuestos orgánicos de difícil degradación, debido a sus características fisicoquímicas, que persisten en los ecosistemas y representan una seria amenaza para la salud humana, debido a que son altamente tóxicos, inducen mutagénesis, teratogénesis y alteraciones de funciones

reproductivas y metabólicas (Goldberg, 1995). Otro aspecto importante es que son poco solubles en el agua, se adhieren a los tejidos en plantas, se acumulan en los suelos y en la atmosfera una vez volatilizados los plaguicidas se distribuyen por todo el mundo, contaminando áreas silvestres a gran distancia de las regiones agrícolas, incluso en la zona Ártica y Antártica (Aguilar, 2007), además en mayor o menor medida, todos los suelos absorben estos compuestos; lo que depende del contenido de materia orgánica. Así los suelos ricos en humus con frecuencia absorben mayor cantidad de insecticidas que los suelos arenosos (Nava, 2012).

En la mayoría de los países desarrollados, los plaguicidas organoclorados han sido sustituidos por insecticidas con propiedades menos adversas; sin embargo, hay países que todavía los utilizan, por ello, se siguen encontrando en el medio ambiente muchos años después de su aplicación.

Por lo anterior, debido a que los organoclorados son productos altamente tóxicos, se ha optado por otros productos con menor persistencia pero con mayor toxicidad denominados “organofosforados”, entre los cuales se puede mencionar el paratión metílico, malatión, benzoate, tionazine y clorpirifos.

Los organofosforados, al igual que los carbamatos inhiben la enzima acetil colinesterasa, su alta toxicidad, su baja estabilidad química y su nula acumulación en los tejidos, lo posiciona en ventaja con respecto a los organoclorados de baja degradabilidad y gran bioacumulación (Eto, 1974).

Por último, los “piretroides” son plaguicidas desarrollados artificialmente para controlar plagas de insectos. Este grupo surgió para imitar los efectos de las piretrinas naturales obtenidas de las plantas (Hayes, 1975; Wilkinson, 1976).

Aktar. *et al.* (2009) indica que cuando un plaguicida es aplicado a un cultivo agrícola, aproximadamente el 1% del compuesto químico alcanza al organismo blanco, mientras que el 99% restante es retenido en el follaje o se dispersa en el ambiente por volatilización, escorrentía y lixiviación. Las pérdidas por volatilización o fotodescomposición son insignificantes, pero es descompuesto por microorganismos, reportándose vidas medias en el suelo (tiempo que tarda en desaparecer la mitad de un

compuesto del ambiente) aproximadamente de 2 meses, según la Agencia de Protección al Ambiente (EPA), de casi 6 meses para los piretroides y en el caso de organoclorados puede ser de décadas.

La preocupación por el impacto ambiental del uso de plaguicidas ha provocado repetidas investigaciones sobre el destino medioambiental de estos agentes, que pueden emigrar de los campos tratados al aire, la tierra y a los diferentes cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos.

Las normas creadas para el control o prohibición de estos compuestos, son mínimas. En México solo existen normas para compuestos organoclorados, presentes en agua potable en las que se manejan los límites máximos permisibles, sin embargo para organofosforados y piretroides, no existen (Tabla 1.1).

Tabla 1. 1 Límites máximos permisibles de compuestos orgánicos en agua potable.

	Como son	Limites permisibles
Organoclorados	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos orgánicos de difícil degradación • Compuestos altamente tóxicos • Representan una seria amenaza para la salud por ser bioacumulables. 	La NOM-127 maneja LMP en rangos de 0.03 a 50.00 mg/l de diferentes organoclorados
Organofosforados	<ul style="list-style-type: none"> • Alta toxicidad • Baja estabilidad química • Nula acumulación en los tejidos 	La NOM-127 no maneja LMP para Organofosforados
Piretroides	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos muy tóxicos para insectos y peces • Alta permanencia en el medio ambiente • Relativamente biodegradables • No causan resistencia en insectos 	La NOM-127 no maneja LMP para Piretroides

Polanco *et al.*, (2014) realizaron un estudio de contaminación por plaguicidas organoclorados en el anillo de cenotes en Yucatán, indicando que existe una contaminación en la zona en concentraciones por arriba de la norma. Estas concentraciones peligrosas representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, dado que la manipulación y la venta de los plaguicidas para la agricultura se realizan sin una regulación o control. El análisis espacial de la distribución de los plaguicidas organoclorados permitió visualizar que las concentraciones más altas se encuentran en la zona de recarga al centro del anillo de cenotes y cerca de la zona costera o de descarga.

1.2.2. Importancia del Sistema Subterráneo: Suelo

A nivel mundial se ha considerado a la Pedósfera (Suelo) como un elemento del ambiente que debe ser valorado, ya que permite el intercambio de materia y energía entre la Litósfera y la Atmósfera, siendo un cuerpo natural, dinámico y que constituye el medio natural en donde se inicia y se termina la cadena alimentaria, por lo tanto su uso adecuado influye en la conservación de los cuerpos de agua, además de funcionar como reactor, filtrando, amortiguando y transformando los contaminantes (Bautista *et al.*, 2005).

En México, el estudio del transporte de contaminantes es reciente (Hoke y Wicks, 1997), por lo que el distinguir el comportamiento de los contaminantes orgánicos en el sistema de la PY contribuirá al mejor entendimiento en el transporte de los contaminantes.

Arias *et al.* (2007) revisaron la influencia de las características físicas y químicas del sistema del suelo, tales como el contenido de humedad, materia orgánica y el contenido de arcilla y pH, en la adsorción / desorción y degradación de los plaguicidas y su acceso a las aguas subterráneas y aguas superficiales, este estudio sirvió para la comprensión del destino de los plaguicidas que se reflejó en la gestión de las autoridades para su autorización de uso o su prohibición.

El tiempo que los plaguicidas se quedan en el suelo depende de la fuerza con que está vinculado por los componentes del suelo y de cómo rápidamente se degradan. El uso de plaguicidas debe garantizar la seguridad pública y la protección del medio ambiente en lo que respecta tanto a la propia química y a sus metabolitos potencialmente dañinos

Por otra parte, los suelos poseen una capacidad natural para amortiguar el paso de los contaminantes y depurar el agua (Bautista *et al.*, 2011). Algunas propiedades edáficas que influyen en esta capacidad de amortiguamiento son: la capacidad de intercambio de cationes, arcillas, materia orgánica, pH y carbonatos por esta razón se deben considerar a los suelos en el análisis de la vulnerabilidad, ya que es información elemental en la península.

Un aspecto importante a tratar es la velocidad de infiltración en el subsuelo, así como su capacidad de atenuación ante contaminantes orgánicos e inorgánicos. El clima es otro aspecto que se debe tomar en cuenta, en estudios de vulnerabilidad además de la precipitación anual o el índice de humedad anual, que se utiliza para estimar de forma general el agua disponible para las plantas (Bautista *et al.*, 2011).

Por otra parte, las características físico químicas de los suelos varían ampliamente en el tiempo y en el espacio dependiendo principalmente del material de origen, el clima y la topografía. La materia orgánica en el suelo actúa como un estabilizador, manteniendo partículas inorgánicas unidas con agregados. De tal forma, el manto del suelo está formado por agregados, cada uno conteniendo arena, limo, arcilla y materia orgánica. Vale la pena destacar que el tamaño y la estructura de los agregados varían considerablemente. El movimiento de agua a través de los poros entre agregados como de los poros intra- agregados. El transporte de contaminantes es extremadamente dependiente del movimiento de las aguas.

En este sentido, el movimiento de los contaminantes se ve afectado por la distribución temporal y espacial del agua, esta al alcanzar la superficie del suelo, se mueve por la acción de la gravedad hacia los puntos más bajos del terreno, alcanzando directamente los ríos, lagos y océanos. Una parte de ella se infiltra a través del suelo o rocas (zona no saturada), (Figura 1.1).

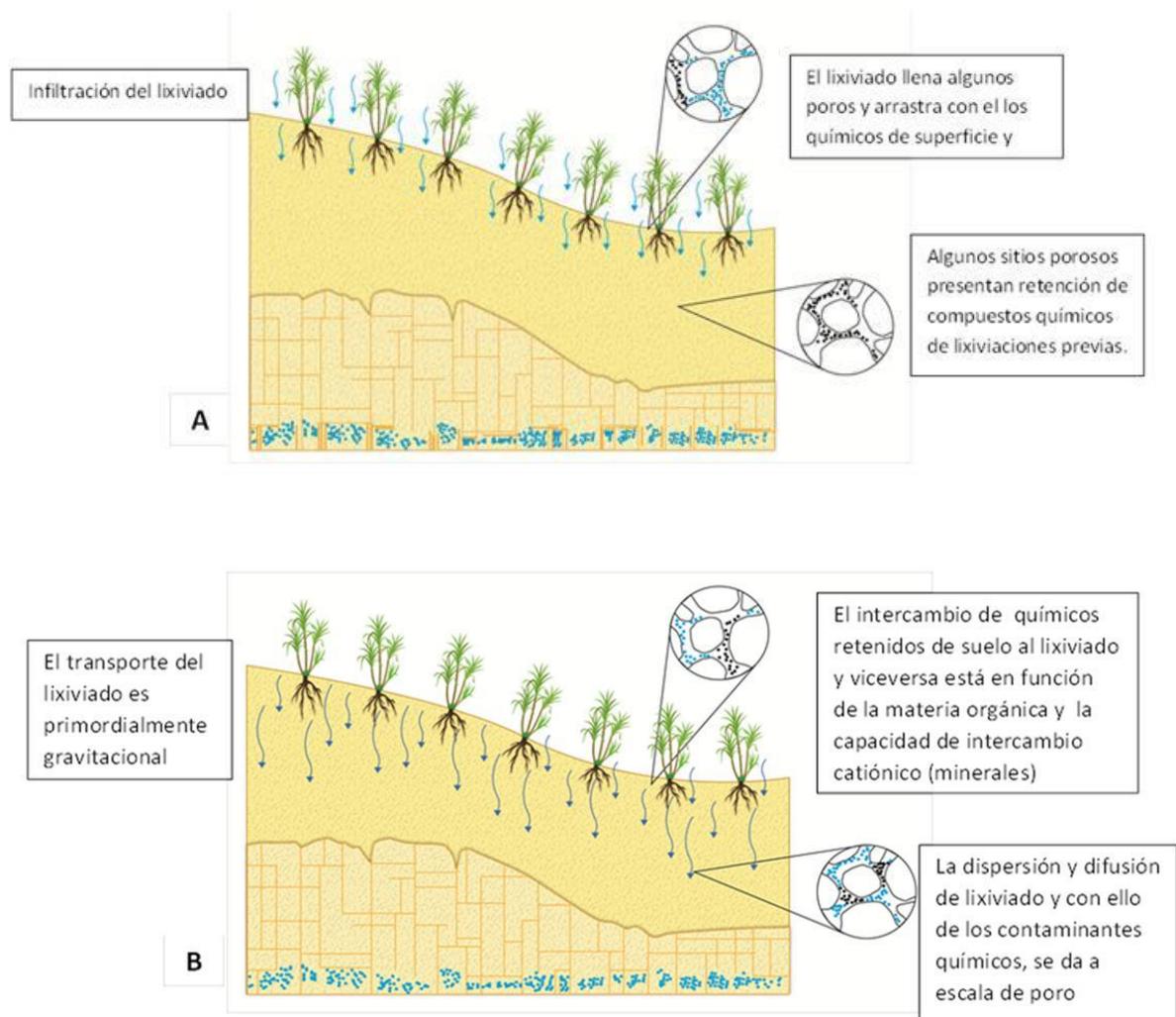


Figura 1. 1 Zona vadosa o no saturada y zona saturada que distingue el transporte de contaminantes por infiltración (Univ. Complutense, 2013).

En México, los materiales parentales de los suelos se clasifican en 2 grupos: en *materiales residuales* que son depósitos de rocas, expuestos a la intemperie un tiempo suficiente para permitir el desarrollo del suelo, y por otra parte están los *materiales transportados* que son minerales o fragmentos de rocas que han sido removidas de un lugar a otro por la acción del agua, del viento y de la gravedad (Ortiz *et al.*, 1990).

En el estado de Quintana Roo, se presentan suelos poco profundos asociados a dos o más tipos, donde predominan los litosoles y las rendzinas. En la zona sur del estado, se encuentran suelos: *Leptosoles*, *Vertisoles*, *Luvisoles* y *Gleysoles* (INEGI, 2005), que se utilizan como sustrato para el cultivo de mayor importancia en el estado, que es la caña de azúcar, empleando altas cantidades de fertilizantes, plaguicidas y herbicidas químicos, que contaminan el suelo y agua de la zona.

De las sustancias agrícolas utilizadas no todas son absorbidas por los cultivos, el excedente es lixiviado o lavado de tierras agrícolas, los cuales, tarde o temprano entran a los cuerpos de agua (Figura 1.2). De esta manera un lixiviado transporta los residuales de compuestos químicos agrícolas en el espesor de la capa de material antes de arribar a la tabla de agua.



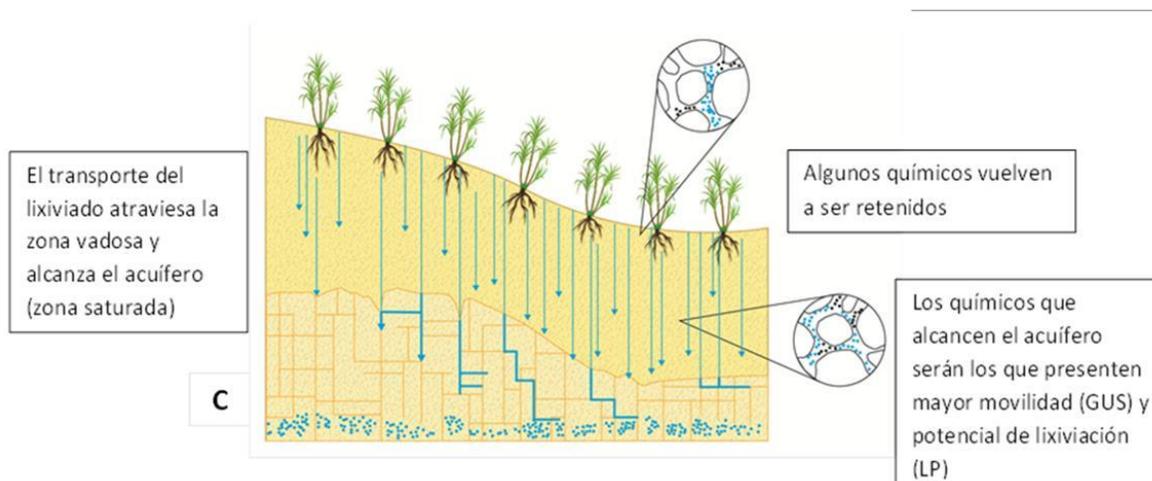


Figura 1. 2 Proceso de lixiviación (Reporte INIFAP 2012-2013).

El lixiviado recorre los perfiles de suelo más profundos hasta alcanzar un acuífero. Se mueven en el suelo por transporte capilar y en el agua por difusión molecular (sin flujo de agua) o mediante flujo dispersivo-conectivo (con flujo de agua).

1.2.3. Importancia del Sistema Subterráneo: Agua

El término de “agua subterránea” es usualmente utilizado para el agua subsuperficial que se encuentra por debajo de la tabla de agua en los suelos y las formaciones geológicas que están completamente saturadas y son mejor conocidos como “acuíferos” (Freeze y Cherry, 1979).

Por esta razón, Fetter (1988), define a los “acuíferos”, como unidades geológicas que pueden almacenar y transmitir el agua a velocidades lo suficientemente rápidas, suministrando cantidades razonables para pozos y estos, a su vez, pueden estar cerca de la superficie de la tierra, con capas continuas de materiales de alta permeabilidad que se extienden desde la superficie de la tierra a la base del acuífero.

Los acuíferos en la PY son reconocidos por la gran reserva de agua dulce que contienen y estos acuíferos son los principales abastecedores de agua en las actividades humanas (Bautista *et al.*, 2011).

Para el caso de la PY, se presenta un acuífero carbonatado, que muestra una amplia gama de características hidrológicas, existiendo una serie de conductos de disolución

donde fluye el agua a través de cavidades como flujo en un canal abierto y algunos acuíferos carbonatados se comportan casi como un medio poroso, isotrópico y homogéneo (Fetter, 1988).

Los acuíferos cársticos costeros presentan gran interés para el humano por sus importantes recursos y frecuentemente por ubicarse en zonas de gran demanda de agua. En estos acuíferos litorales ocurren procesos geoquímicos, que pueden acelerar el incremento de la permeabilidad secundaria, a través de disolución de conductos cársticos (Fernández *et al.*, 2002).

El modelo convencional de los acuíferos costeros de lentes de agua dulce supone condiciones homogéneas e isotrópicas, sin embargo, desde hace tiempo se ha reconocido que estas suposiciones no son válidas en acuíferos carbonatados donde las trayectorias de flujo preferenciales evolucionan a través de la disolución ubicada (Beddows, 2004).

En el caso particular de zonas costeras carbonatadas, con sistemas cársticos, la mayor parte del transporte ocurre en forma de soluciones en el subsuelo, lo cual dificulta su observación; además de los flujos de tierra hacia el océano, existen grandes flujos subterráneos en dirección opuesta, del mar hacia la tierra. Los acuíferos cársticos tienen características complejas, como una alta heterogeneidad creada y organizada por el flujo de agua subterránea, espacios grandes y altas velocidades de flujo (Bakalowicz, 2005).

1.2.4. Geología

Geológicamente la PY está cubierta casi en su totalidad por sedimentos marinos calcáreos de edad terciarias con un espesor máximo de 1,000 m, es una plataforma de piedra caliza (con una superficie total aproximada 300.000 km²) la cual fue formada hace millones de años, y que se considera tectónicamente estable (Back y Henshaw, 1970; Weidie, 1985).

Sin embargo, durante la era Cenozoica se originaron plegamientos y fallas que provocaron estructuras que han influido en el desarrollo de la morfología actual. Las rocas más antiguas aflorantes son las calizas y evaporitas del Paleoceno – Eoceno

indiferenciado (Back y Henshaw, 1970; Weidie, 1985), mostrando dos unidades morfológicas principales: la primera está ubicada en el norte, donde predominan las planicies y las rocas sedimentarias neogénicas; en el sur, las planicies alternan con lomeríos de hasta 400 m.s.n.m. en rocas sedimentarias oligogénicas (Lugo *et al.*, 1992).

Lugo *et al.*, (1992), señalan que la carstificación se presentó en el relieve poco tiempo después de que los sedimentos marinos se elevaron, constituyendo la tierra firme, así mismo, indican que el desarrollo de la porción meridional (Sur) de la península, se presentó del Mioceno hasta nuestros días, semejante a la planicie septentrional actual, por lo cual es probable que la carstificación se haya iniciado con dolinas y en la medida que se produce el ascenso continental, el relieve pasa a planicies onduladas y, finalmente, a lomeríos.

Por lo tanto y de acuerdo por lo señalado por Lugo *et al.*, (1992), las dos grandes zonas de la península, diferenciadas por su morfología, expresan dos etapas principales de formación del relieve y del cárst, una joven, esencialmente del Cuaternario, en el norte y una antigua, del Mioceno al Cuaternario, en el sur.

En el Mioceno-Plioceno cubre la mayor parte del área estudiada con algunas partes en discordancia. En ciertos lugares se encuentra en forma de caliza blanca recristalizada con microfauna, en otras se presenta como una caliza coquinoide, más o menos cementada con carbonato de calcio y restos de bivalvos, también se presenta en forma de conglomerados, pero en ninguna se puede apreciar estratificación definida y su aspecto estructural es aparentemente horizontal (López- Ramos, 1975).

Para el estado de Quintana Roo, las unidades litológicas descritas por el INEGI (2005) están compuestas por rocas sedimentarias originadas desde el Terciario (Paleoceno) hasta el Cuaternario, aflorando las más antiguas en el suroeste y conforme avanza rumbo al norte estas unidades se van haciendo más jóvenes y su litología está formada por rocas calizas, yesos, margas y dolomitas de una edad que varía del Terciario al Cuaternario, predominando las calizas del Terciario.

La “*parte sureste*” a la que estuvo enfocado este estudio, específicamente la zona cañera del Municipio de Othón P. Blanco (Figura 1.3), está constituida por una llanura rocosa

suavemente ondulada y con una altura sobre el nivel del mar poco significativa, en la que se formaron extensas zonas de inundación temporal, caracterizándose la franja litoral por presentar numerosas lagunas y áreas pantanosas (INEGI, 2005).

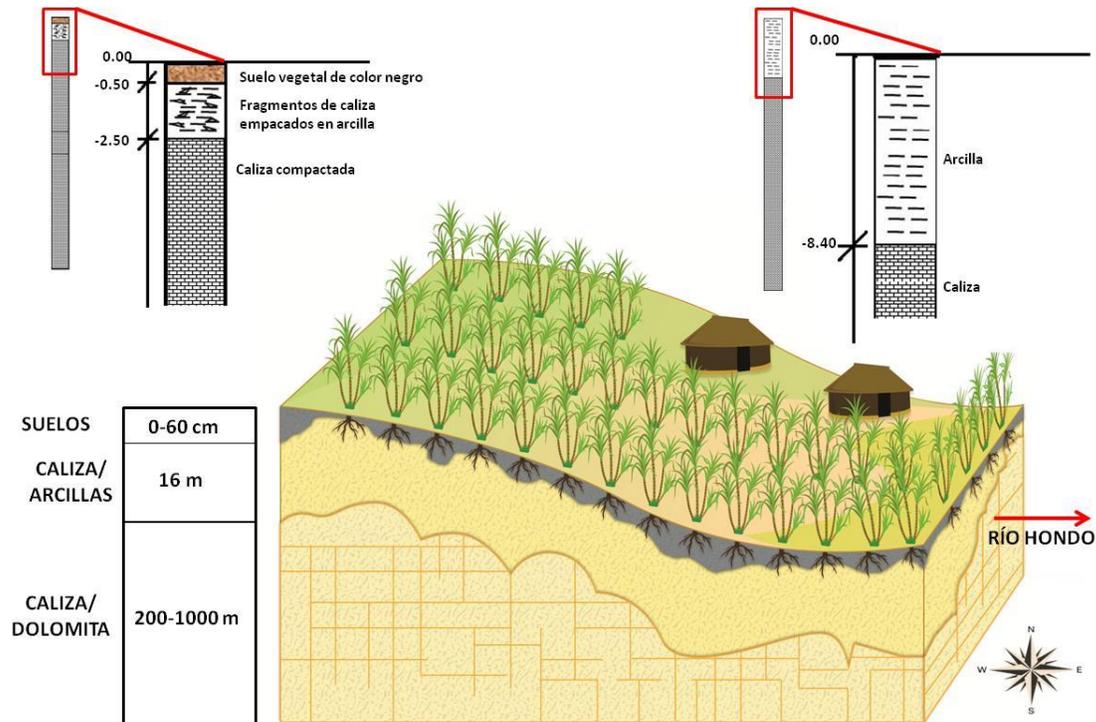


Figura 1.3 Estratigrafía en la zona de estudio.

En la zona de estudio se encuentran principalmente rocas del Paleoceno-Eoceno no diferenciado y las de la formación Icaiche que está constituida por calizas microcristalinas con yeso y anhidrita, calizas dolomitizadas o silicificadas, margas y estratos medianos y gruesos de yeso, y esta unidad se ubica en el sur del estado con afloramientos en el poblado de Nicolás Bravo (Tabla 1.2) y que presentan un espesor de varios metros de profundidad, alcanzando en algunos pozos de exploración, más de 500 m (INEGI, 2005).

Los mapas geológicos empleados fueron obtenidos del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2013) y se encuentran en una escala de 1:500,000 (Figura 1.4) para toda la PY y para la zona sur del estado de Quintana Roo con escala 1:250,000 (Figura 1.5), para la zona de estudio, las unidades sedimentarias están clasificadas de la siguiente manera, comenzando desde la más antigua:

Tabla 1. 2 Unidades sedimentarias de la PY.

Formación	Era Geológica	Materiales
Icaiche (TpaCz-Y)	Paleoceno	Caliza con Yeso, horizontes de arcilla fragmentos de sílice
Chichén Itzá (TeCz-Mg)	Eoceno	Caliza y Marga
Estero Franco (TmCz-Do)	Mioceno	Caliza y Dolomitas
Formación Bacalar (TmCz)	Mioceno	Caliza
Formación Carrillo Puerto (Tmpl CzCq) (Qhoal, Qhola, Qhopa)	Plioceno Pleistoceno	Caliza y Coquina Depósitos Aluviales (Limos y Arcillas) Depósitos lacustres (Restos vegetales, limos y arcillas) Depósitos Palustres (Arcillas y limos con alto contenido de materia orgánica, raíces y tallos)

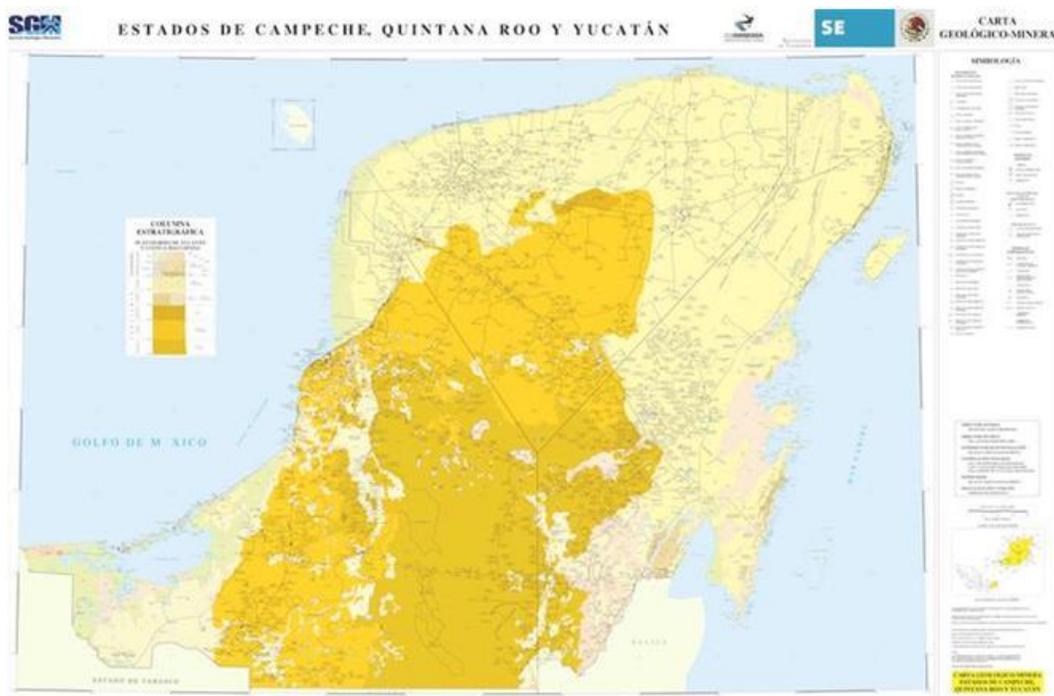


Figura 1. 4 Mapa Geológico de la PY (Tomado de SGM).

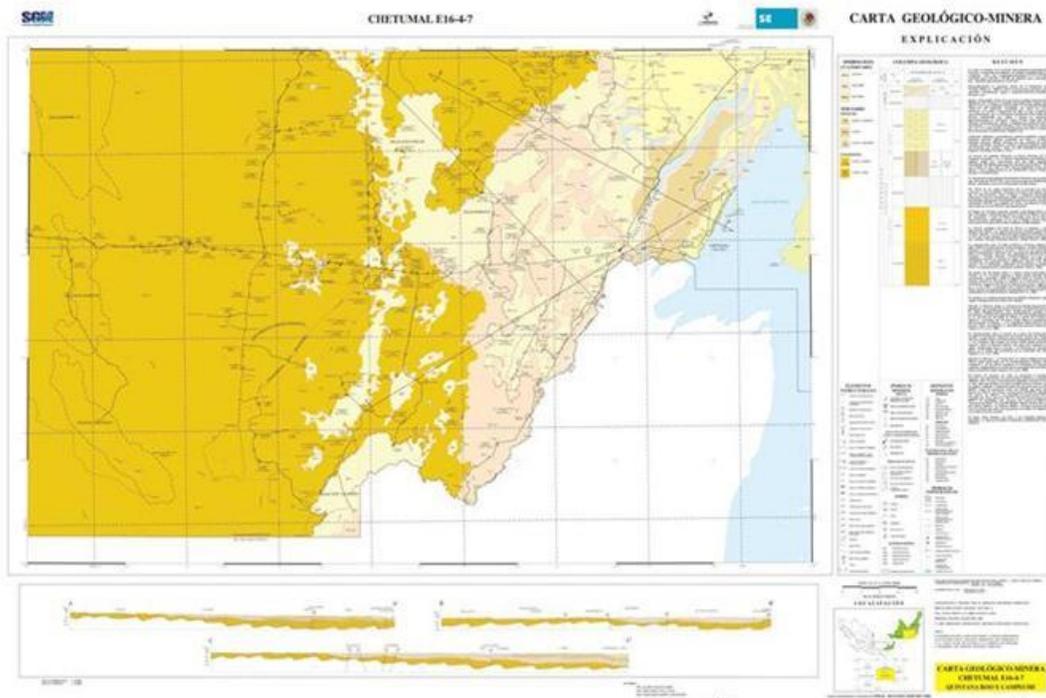


Figura 1. 5 Mapa Geológico del Sur de Quintana Roo (Tomado de SGM).

Beddows en 2004, indica que en referencia al fracturamiento que existe en la zona, se observa una falla regional denominada Río Hondo, que se compone de fallas normales, que se extienden desde el margen sur de la península entre los 50 y 100 km al sur de la bahía de Chetumal, en el municipio de Othón P. Blanco. La expresión en la superficie de este conjunto de fallas se ve en la alineación de los lagos poco profundos y bahías costeras particularmente en el sur de la región en la que la zona de falla se produce hacia el interior de la costa.

A continuación hacia el norte la falla puede estar indicada por la orientación de la isla de Cozumel, que se interpreta como un fallo limitado de bloque. Soutworth, 1985; sugirió que la expresión en la superficie situada más al norte de este conjunto de falla puede ser dos líneas de cenotes a 15 km hacia el interior desde la Isla de Cozumel. Así, el río Hondo y los lineamientos Holbox pueden cruzarse (Beddows, 2004).

La plataforma de rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas presenta un grosor de incluso más de 3500 m descansando sobre un basamento paleozoico. Encima de este se

inicia la columna con rocas jurásicas, reconocidas en el subsuelo profundo de la porción centro septentrional de Belice (López-Ramos ,1975).

1.2.5. Edafología

En relación a la edafología de la PY se han identificado 3024 unidades de mapeo, 187 asociaciones y 13 unidades de suelo. Solo un 2.6% presentan perfiles descritos y datos analíticos. El centro, sur y sureste tienen el mayor número de unidades de mapeo (Colunga *et al.*, 2003).

Las asociaciones de suelos con mayor extensión son Rendzinas y Litosoles 67%, en zonas cársticas recientes y juveniles; Gleysoles, 15.5%, en zonas costeras; Luvisoles 4.44%, en planicies cársticas maduras; Vertisoles 3.03%, al sur y Noreste; Solonchack, en la costa; Regosol e Histosol, en litoral y planicie costera. Dominan los suelos poco profundos, de reciente formación y escaso grado de desarrollo pedogenético (Colunga *et al.*, 2003).

En Quintana Roo, se registran varios tipos de suelo, de ellos destacan por su importancia, los de “gley”, que son arcillosos y como ocupan las zonas más bajas se inundan durante la época de lluvias, son aptos para los cultivos como el arroz y la caña de azúcar (Figura 1.6). Existen también suelos “leptosoles”, que son poco aptos para la agricultura y los “luvisoles”, que por su profundidad permiten una agricultura mecanizada (Colunga *et al.*, 2003).

Tipos de suelos de Quintana Roo

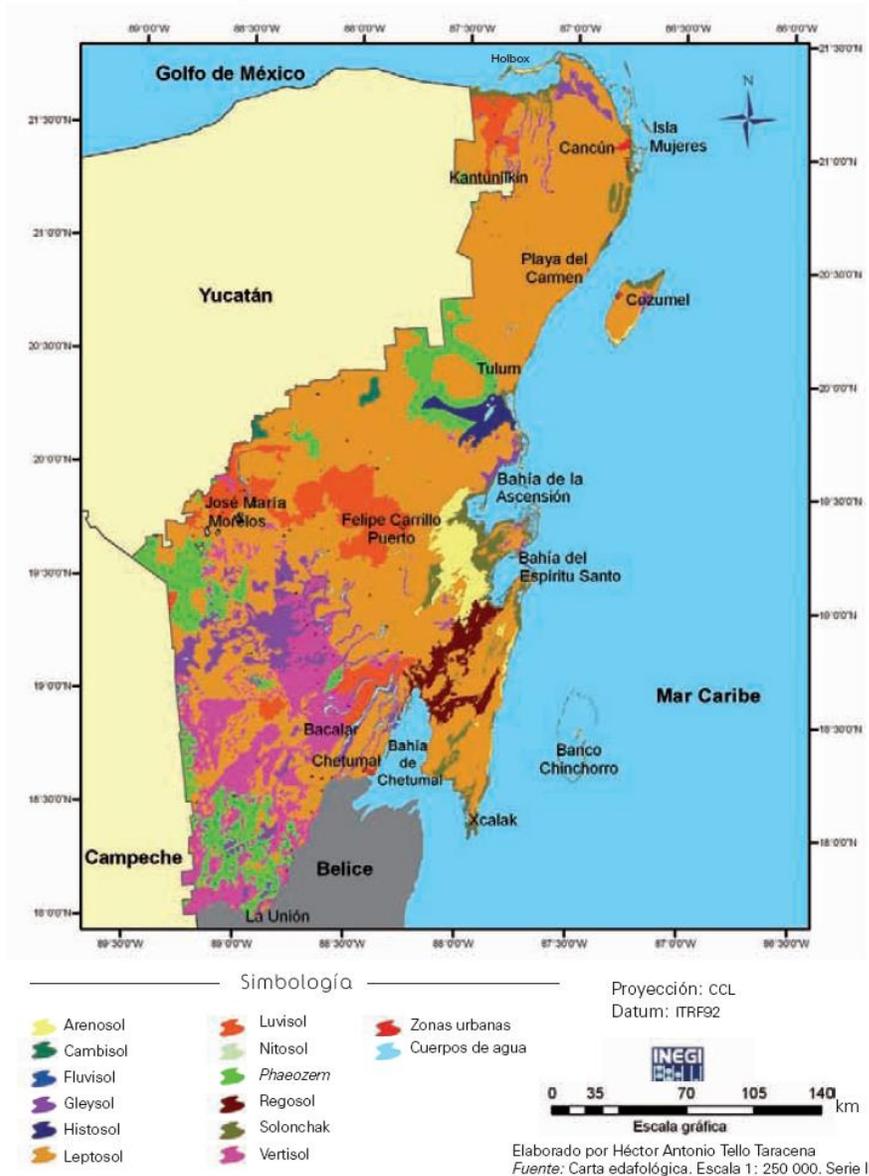


Figura 1. 6 Edafología del estado de Quintana Roo (INEGI, 2012).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) describe los principales suelos de la siguiente manera: los “leptosoles” como suelos jóvenes formados de varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos de 20 por ciento (en volumen) de tierra fina; los “vertisoles” que son suelos pesados arcillosos, que se mezclan, son sedimentos que

contienen una alta proporción de arcillas expandibles, o arcillas expandibles producidas por neoformación a partir de meteorización de rocas; los “gleysoles” son suelos con signos claros de influencia del agua freática; tiene un amplio rango de materiales no consolidados, principalmente fluviales, marinos y lacustres del Pleistoceno u Holoceno, con mineralogía básica a ácida y finalmente los suelos “phaeozem”, caracterizados por ser suelos oscuros ricos en materia orgánica; del griego phaios (oscuro) y ruso zemlja (tierra), contienen materiales no consolidados, predominantemente básicos.

1.2.6. Hidrogeología

Desde el punto de vista hidrogeológico la PY ha sido caracterizada en tres regiones: *zona cárstica plana del norte, zona sur de “lomeríos” en la planicie cárstica y el distrito de fallas del bloque este*. La parte norte se extiende desde la línea de costa donde la inclinación se incrementa tierra adentro de los 35 m hasta los 40 m cerca de la base de la Sierrita de Ticul (Back y Henshaw, 1970; Lesser, 1976 y Lesser y Weidie ,1988).

Según la CONAGUA (2009) la PY constituye una provincia hidrogeológica integrada principalmente por calizas y dolomitas de alta permeabilidad; hacia la parte sur central de ésta se encuentran yesos y anhidritas. La elevada precipitación pluvial, la gran capacidad de infiltración del terreno y la reducida pendiente topográfica favorecen la renovación del agua subterránea y propician que los escurrimientos superficiales sean nulos o de muy corto recorrido.

Moore *et al.*, (1992), indican que la zona costera oriental de la PY, existen dos principales tipos de sistemas de flujo en el acuífero costero. Éstos presentan gradaciones entre ellos: un sistema en medios granulares el cual está integrado por las rocas del Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno) y un sistema en fracturas y cavidades cársticas en los materiales del Terciario, “Pre-pleistoceno, F. Carrillo Puerto”.

Al sur de la península se manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o en pequeños cuerpos de agua superficial. Gran parte de la precipitación pluvial se infiltra al subsuelo a través de fracturas, cavidades y conductos de disolución en las calizas y evaporitas, posteriormente, es extraída mediante la evapotranspiración y el resto

fluye por el subsuelo alcanzando las costas por donde es descargada al mar (CONAGUA, 2009).

Perry *et al.*, (1989) señalaron que en la zona norte existe una superficie calcárea cerca de la costa que presenta un alto fracturamiento debido a erosión, lo que permite una rápida infiltración del agua de precipitación, sin promover la formación de corrientes superficiales, lo que da lugar a una zona no-saturada de agua que origina el proceso de disolución.

Existen varias formaciones del tipo cárstico en la zona debido a la fluctuación de agua que ocurre en esta región, que tiene lugar en profundidades de 3 a 15 m de los 4 a 20 m de la superficie de elevación.

La disolución en fisuras y cavidades produce largas cavidades y cavernas, los colapsos arriba de estas cavidades produce la formación de cenotes y dolinas. Los cenotes son la característica principal de la zona, la cual ha sido propuesta como de alta permeabilidad y con condiciones hidrogeológicas especiales (Velázquez, 1995).

Worthington *et al.*, (2000), señalan que la importancia del sistema hidrogeológico de la PY se debe a su similitud con aquellos sistemas cársticos donde la porosidad y la distribución de la permeabilidad corresponden con un sistema continental cárstico diagenéticamente maduro y compactado.

La alta permeabilidad de las calizas, aunada a las características topográficas, morfológicas y litológicas de la zona, hacen de la PY una región típica para estudiar y comprender el comportamiento del agua subterránea en este tipo de acuíferos (Lesser, 1976).

En particular la zona sur del estado, es una unidad de material consolidado con posibilidades altas de funcionar como acuífero, y en esta zona el material consolidado se encuentra ampliamente distribuido en toda el área, constituida por calizas y en donde encontramos un acuífero libre, cuya recarga se lleva a cabo por la infiltración directa del agua de lluvia, siendo tolerable en cuanto a la calidad del agua (INEGI, 2005).

Las familias químicas del agua presentes en la zona sur son: la mixta carbonatada con tendencia a magnésica sulfatada en la zona que comprenden las poblaciones de Xul-Ha y González Ortega por la presencia de yesos y la cálcica bicarbonatada a magnésica-sulfatada en la zona del ingenio Álvaro Obregón (INEGI, 2005).

Para la zona sur de estado, se encuentra la unidad de riego Álvaro Obregón que pertenece al distrito de riego número 102 Río Hondo en donde se tienen 42 pozos para el riego de 3141 hectáreas de caña de azúcar (INEGI, 2005) por lo que las aguas residuales, descargadas directamente al terreno, aportan a la fuente de abastecimiento grandes cantidades de materia orgánica y compuestos químicos.

Finalmente para los núcleos de población, las descargas y las captaciones están intercaladas, gran parte del agua residual infiltrada, circula hacia éstas bajo los efectos de bombeo, en lugar de seguir las trayectorias naturales de flujo (INEGI, 2005).

La CONAGUA (2009), reporta que el acuífero en la zona cañera en el sur del estado de Quintana Roo, presenta un espesor de agua dulce de 400 a 800 m de profundidad (Figura 1.7).

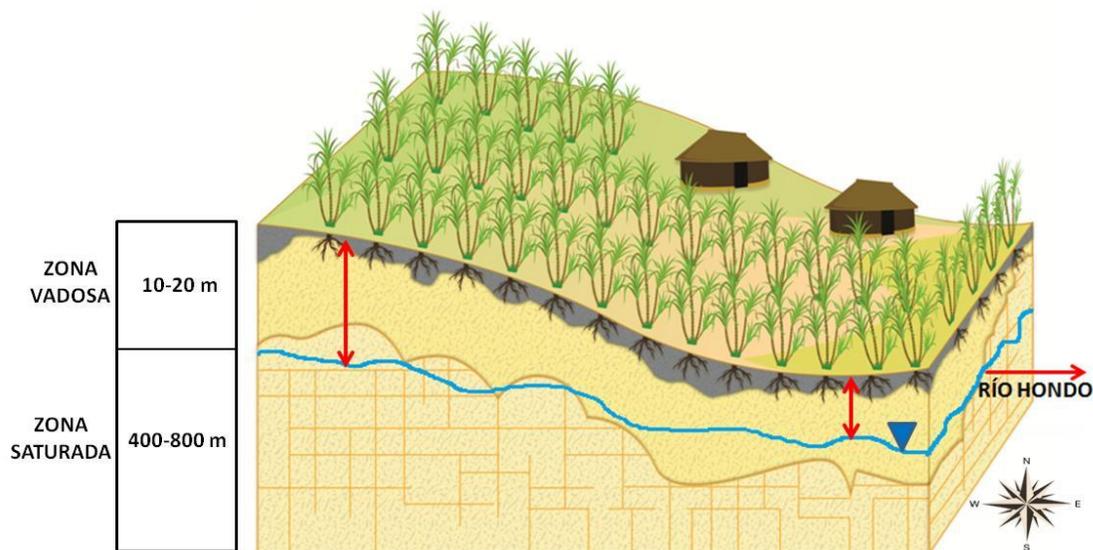


Figura 1. 7 Hidrogeología en la zona de estudio.

En relación a los modelos de flujo que se han realizado en Yucatán y en Quintana Roo se conoce también que:

- El acuífero cárstico es una lente de agua dulce que flota sobre agua salada más densa (Perry *et al.*, 2002).
- El sistema acuífero recibe iones de dos fuentes naturales de gran magnitud, la disolución de minerales y la mezcla con la intrusión de agua de mar (Perry *et al.*, 2002).
- El espesor de la zona de transición es variable y no proporcional a la distancia al mar (Perry *et al.*, 2009).

En cuanto a la dirección del flujo, para la PY, Isphording (1975), divide la parte emergida de la PY en cinco regiones fisiográficas distintas: *la zona costera, la planicie costera del noroeste, la llanura costera del noreste, el distrito central y la falla oriental*. Las diferentes regiones se caracterizan por un grado variable de fracturación. La escala regional más notable son las zonas de fractura del Anillo de Cenotes, la línea de falla en la Sierrita de Ticul, la zona de fractura de Holbox, la zona de bloqueo en la “*falla del Río Hondo*” y la zona de la falla de La Libertad (Figura 1.8).

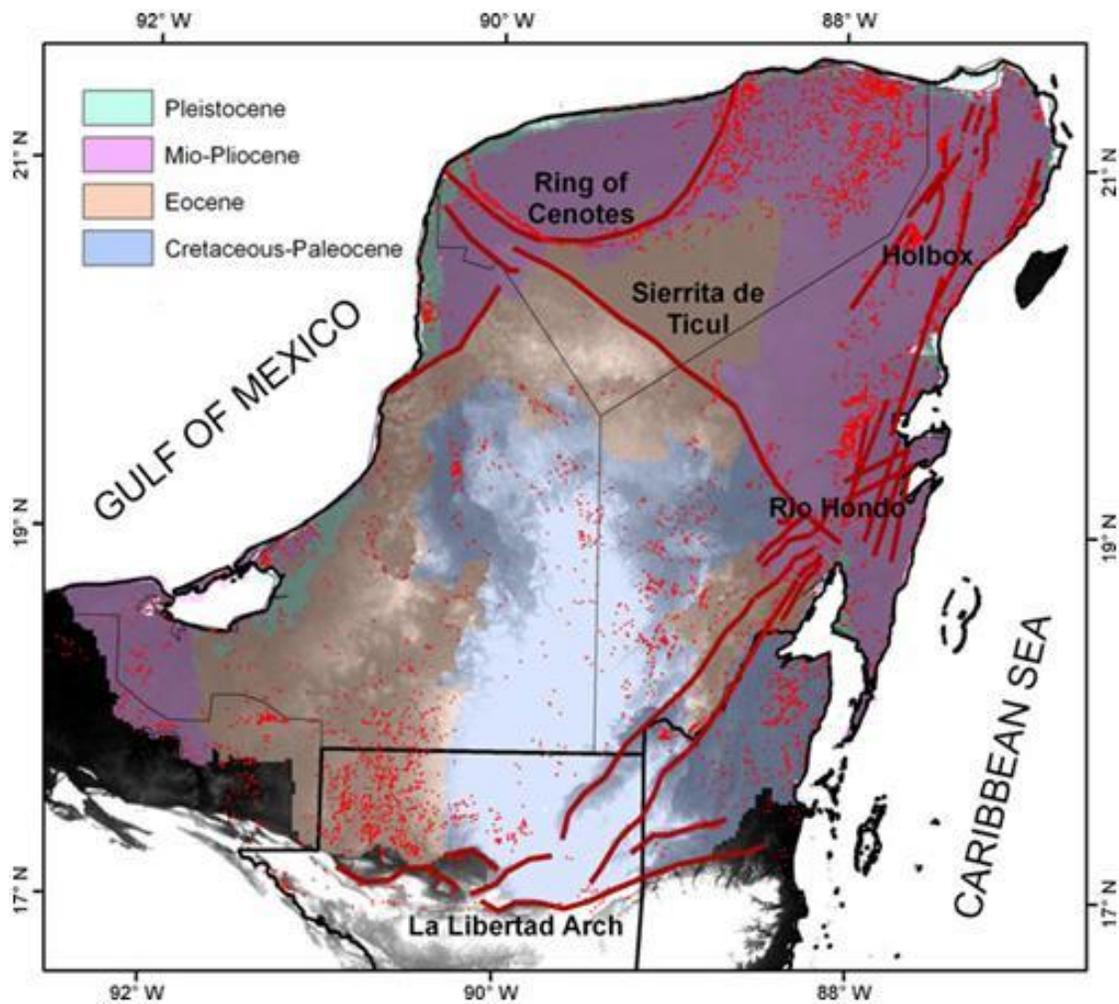


Figura 1. 8 Trayectorias del flujo preferencial a una escala regional (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

En 2003, en base a información de diferentes dependencias e investigadores, la ONG Amigos de Sian Ka'an elaboró un mapa de los patrones de flujo de aguas subterráneas a escala regional en la PY (Figura 1.9), mostrando que para la zona sur del estado, teóricamente la dirección de flujo se dirige a la zona de Río Hondo y Bahía de Chetumal.

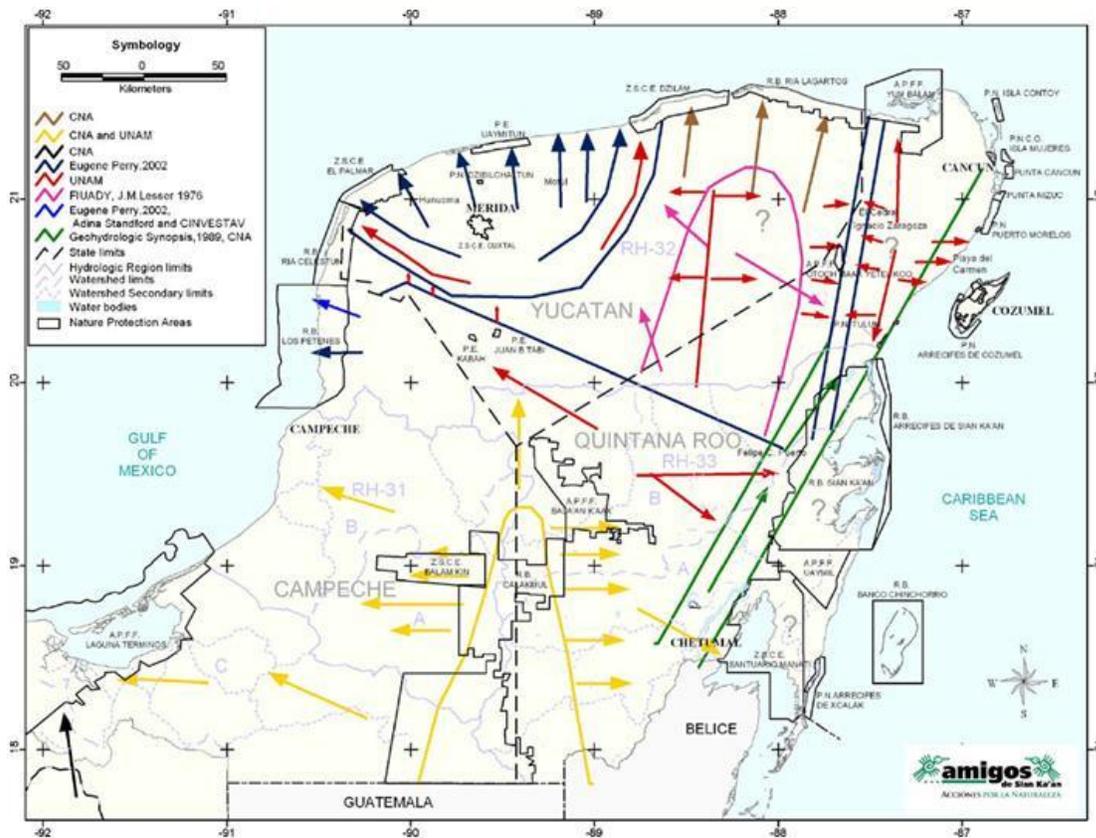


Figura 1. 9 Dirección de flujo en aguas subterráneas para la PY (Tomado de Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

En la zona de estudio el agua subterránea fluye hacia el este (Figura 1.10), con dirección al Río Hondo, tiene una profundidad promedio del nivel estático entre 20 y 50 m, aunque cerca de las costas es hasta de un metro, el espesor medio del acuífero es de 50 m y la elevación del nivel estático va de los 20 m, hasta casi cero en las costas (CONAGUA, 2009).

contaminantes, esta sensibilidad se relaciona además, con factores asociados con la fuente contaminante en el subsuelo como:

- a) Modo de disposición del contaminante en el subsuelo
- b) La carga contaminante que afecte al acuífero
- c) clase del contaminante en términos de su movilidad y persistencia.

Becerril (2013), también argumenta que la vulnerabilidad no es una característica que se pueda medir en campo, sino una propiedad natural del sistema acuífero que depende de su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga de contaminantes antropogénicos o naturales.

A pesar de la importancia en los estudios de vulnerabilidad, solamente se han reportado trabajos para el estado de Yucatán a escalas regionales y para la ciudad de Chetumal a escala local, desafortunadamente, no tienen reconocimiento a nivel de ordenamientos ecológicos del territorio en ambos estados, y al igual que en otros estudios falta mucho por hacer en cuanto a la vulnerabilidad de la contaminación de las aguas subterráneas en la PY (Bautista *et al.*, 2011).

Auge (2004), cita a (Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos – USEPA, por sus sigla en inglés), donde definen a la vulnerabilidad de un sistema subterráneo respecto a un plaguicida, como la facilidad con que este contaminante aplicado en la superficie, puede alcanzar al acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas.

En cuanto a la vulnerabilidad específica de una área determinada de estudio, se debe contar con mediciones de carga de contaminantes en muestras del acuífero ya sea mediante la colecta en pozos de la región durante un periodo determinado o en la construcción de pozos de monitoreo (piezómetros) (Reynoso *et al.*, 2005).

En general el riesgo ambiental se ha definido como el grado de pérdida de la calidad o cantidad potencial de un recurso natural o un hábitat, en el caso del agua subterránea debido a las amenazas de contaminación, a la modificación de los flujos a la

sobreexplotación y al cambio climático etc., presentando también los riesgos ambientales que se reflejan en niveles de vulnerabilidad (Bautista *et al.*, 2011).

La contaminación de aguas superficiales y subterráneas, podría tener efectos negativos en la salud de la población, en la estabilidad y preservación de la diversidad biológica en sistemas hídricos interiores y costeros, así como en la sobreexplotación del acuífero costero que origina desplazamiento tierra adentro de la interfase agua salada-agua subterránea provocando no solo la degradación de las aguas para consumo, sino también de las tierras agrícolas costeras, implicando un estrés del recurso hídrico en el estado.

Finalmente, Gutiérrez-Aguirre *et al.*, (2008) en un estudio hidrogeológico y evaluación de fuentes contaminantes del acuífero norte de Quintana Roo, México considero el análisis de parámetros indicadores de las características del agua en campo: 1) concentración de nutrientes indicadores de contaminación orgánica (nitritos, nitratos, fosfatos), iones (calcio, magnesio, sodio, fierro, cloro, sulfatos) y graduación vertical del contenido iónico y térmico del agua (temperatura y conductividad).

1.3. ALCANCES

En México, existen pocos estudios sobre como la infiltración de la contaminación de las zonas agrícolas degrada la calidad de los cuerpos de agua cercanos a esta actividad, principalmente la de agua subterránea.

Por ello, se determinaron los compuestos orgánicos (plaguicidas y herbicidas) que impactan con mayor rapidez el recurso hídrico (acuífero), en la zona cañera del sur de Quintana Roo. Esta información servirá de referencia para que a corto plazo, la zona cañera reduzca considerablemente la cantidad de agroquímicos utilizados, continuando con estudios para futuras investigaciones, ya que es escasa la información científica generada en esta zona del país.

1.4. HIPOTESIS

Dadas las características de vulnerabilidad del “*acuífero cárstico costero*” (porosidad y permeabilidad), existe un alto riesgo de contaminación del recurso hídrico, debido a los

residuos orgánicos generados por plaguicidas y herbicidas utilizados en las actividades agrícolas desarrolladas en la zona sur del estado de Quintana Roo, como resultado de la actividad cañera.

1.5. OBJETIVO GENERAL

Determinar la presencia de contaminantes orgánicos persistentes relacionados a las actividades agrícolas que afectan el acuífero en la zona cañera.

1.6. OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar que compuestos orgánicos persistentes de los plaguicidas se presentan en el sistema subterráneo suelo, generación de lixiviados y agua subterránea de la zona cañera al sur del estado de Quintana Roo.
- Identificar si los compuestos detectados en lixiviados alcanzan a presentarse en los pozos de la zona agrícola (tanto de uso agrícola como potable).
- Identificar si estos compuestos son evidencia de transporte en la dirección de flujo subterráneo.

1.7. REFERENCIAS

- Aguilar, M.J. (2007). Determinación de plaguicidas organoclorados en *Cyprinus carpio* Linneus, 1758 del lago de Tecocomulco, Hidalgo. Tesis Licenciatura. 91.
- Aktar W., Sengupta D y Chowdhury A (2009). Impact of pesticide use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*. 2(1), 1-12.
- Arias, E. M., López, P.E., Martínez, C.E., Simal, G.J., Mejuto, J.C y García, R.L. (2007). The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 14 p.
- ASK (Amigos de Sian Ka'an) (2003) Tratamiento de Aguas Residuales: construyendo las Bases Para la Conservación del Agua y su Biodiversidad Asociada en la Península de Yucatan [Wastewater treatment: constructing the basis for the conservation of water and the associated biodiversity on the Yucatan Peninsula]. CD-ROM, Amigos de Sian

Ka'an, The Nature Conservancy y la Comisión de Áreas Naturales Protegidas, Cancún, Quintana Roo, México

Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de Acuíferos. Revista Latinoamericana de Hidrogeología. No. 4, 85-103.

Back, W y Henshaw, B. (1970). Comparison of Chemical Hydrogeology of the Carbonate Peninsulas of Florida and Yucatan. Journal of Hydrology 10. 330-368.

Baddi, M., Garza, V y Landeros, J. (2006). Efecto de los plaguicidas en la fauna silvestre. CULCyT Año 3 No 14-15.

Bakalowicz, M. (2005). Karst Groundwater: a Challenger for new resources. Hydrogeol J. (13), 148-160.

Bauer-Gottwein, P., Gondwe R. N. B., Charvet, G., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M y Merediz-Alonso G. (2011). Review: The Yucatan Peninsula karst aquifer, México. Hydrogeology Journal. 18.

Bautista, F. (2005). Información edafológica para el manejo de recursos naturales. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán 1-(8), 282.

Bautista, F., Aguilar, DY., Batllori, E. (2011). Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Península de Yucatán. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Gobierno de Yucatán. 9-31

Becerril-Díaz, MA. (2013). Vulnerabilidad natural del agua subterránea en el Valle de Tula, Hidalgo. Tesis de Maestría, Ingeniería Ambiental-Suelo y Aguas Subterráneas, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Beddows, P.A. (2004). Groundwater hydrology of a coastal Conduit carbonate aquifer: Caribbean Coast of the Yucatán Peninsula, México, PhD Thesis, University of Bristol, UK.
- Coll-Hurtado A. y M. L. Godínez Calderón (2003). La agricultura en México: un atlas en blanco y negro. Temas selectos de geografía de México. UNAM, México, D. F. 152 p.
- Colunga-García Marín, P y Larque-Saavedra, A. (2003). Naturaleza y sociedad en el Área Maya. Pasado, Presente y Futuro. Academia Mexicana de Ciencia y Centro de Investigación Científica de Yucatán. pp. 21-35.
- CONAGUA, (2009). Establecimiento de una red piezométrica de la zona cañera de Álvaro Obregón, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo. <http://www.conagua.gob.mx/DLQroo07/Noticias/InformeRedPiezometrica.pdf> consultado Julio 2013.
- Delgado-Carranza, M.C. (2010). Zonificación agroecológica del estado de Yucatán con base en índices agroclimáticos y calidad agrícola del agua subterránea. Tesis de Doctorado, Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Eto M. (1974). Organophosphorus pesticides: organic and biological chemistry. CRC Press, USA.
- FAO, IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. Roma.
- Fernández Rubio, R., Baquero Úbeda, J.C. y Eraso Romero, A. (2002). Introducción al conocimiento de los acuíferos cársticos costeros. Los Acuíferos Costeros y las Desaladoras (eds. Pulido Bosch, Vallejos Izquierdo, Pulido Leboeuf). pp.11- 27. Almería.
- Fetter, C.W. (1988), Applied Hidrogeology. Columbus, Ohio: Merrill Publishing Company. 592.
- Freeze, A.R. y Cherry, J.A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Englewood cliffs, NJ, 604.

- Garrido, T., C. Costa., J. Fraile., E. Orejudo., J. Niñerota., A. Ginebreda., L. Olivilla., M. Figueras. (1998). Análisis de la presencia de plaguicidas en diversos acuíferos de Cataluña. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente. Valencia, España. 7.
- Goldberg, D.E. (1995). Emerging Problems in the Coastal Zone for the Twenty First Century. *Mar. Pollut. Bull.* 31:152-158.
- Gutiérrez-Aguirre, MA y Cervantes-Martínez, A. (2008). Estudio Geohidrológico del Norte de Quintana Roo, México. Universidad de Quintana Roo, Unidad Cozumel. CONACYT, FOMIX 1ª Edición. 107.
- Hayes, W.J. Jr. (1975). *Toxicology of pesticides*. The Williams & Wilkins Company, USA.
- Hoke J. A. y Wicks C. M. (1997). Contaminant transport in karst aquifers. In: Beck B. F. y Stephenson J. B. (Eds.), *The Engineering Geology and Hydrogeology of Karst Terranes*. Rotterdam: A.A. Balkema, 189-192.
- INEGI. (2005). Estudio Hidrológico del estado de Quintana Roo. Primera Reimpresión, México. 79.
- INIFAP (2012-2013). Informe de la segunda etapa del proyecto: Determinación de agroquímicos lixiviados en la zona cañera de Quintana Roo. 61.
- Isphording, W.C. (1975). The physical geology of Yucatan. *Trans Gulf Coast Assoc Geol Soc* 25:231–262
- Lesser, J.M. (1976). Resumen del estudio Geohidrológico e Hidrogeoquímico de la Península de Yucatán. *Boletín de Divulgación Técnica* No.10, 11.
- Lesser J. M., y Weidie, A.E. (1988). Region 25, Yucatan Peninsula, The Geology of North America, In *Back: The Geological Society of America*, O-2 Hydrogeology. 237-241.

- López-Geta, J.A., C. Martínez-Navarrete., L. Moreno-Merino., P. Navarrete-Martínez. (1992). Las aguas subterráneas y los plaguicidas. Instituto Geológico y minero de España. 149.
- López-Ramos, E. (1975). Estudio Geológico de la Península de Yucatán.43-48
- Lugo, HJ., Aceves, JF., Espinasa-Pereña, R. (1992). Rasgos Geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. Vol. 10 No.2. 143-150.
- Moore, Y.H., Stoessell, R.K., Easley, D.H. (1992). Fresh-water sea-water relationship within a groundwater-flow system, northeastern coast of the Yucatan Peninsula. *Ground Water* 30(3):343–350
- Nava, G.J. (2012). Evaluación de técnicas de extracción para compuestos orgánicos en sedimentos. Universidad Politécnica de Quintana Roo. 6.
- OMS. (2004). Prevención de los riesgos para la salud derivado del uso de plaguicidas en la agricultura. 36 p.
- OMS. (2007). Cuarto estudio coordinado por la OMS sobre contaminantes orgánicos persistentes en la leche materna, en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 47.
- Ortiz-Villanueva, B y Ortiz- Solorio, C.A. (1990). “Edafología”. Universidad Autónoma de Chapingo, México Séptima Edición, pp. 23-34
- Perry E.C., Swift J., Gamboa J., Reeve A., Sanborn R. y Marin L. (1989). Geological and environmental aspects of surface cementation, North Coast Yucatan Mexico, *Geology* 17:818-821.
- Perry, E, Velazquez-Oliman, G. y Marín, L. (2002). The Hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review* 44 (3), 191-121.

- Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B. y Velazquez-Oliman, G. (2009). Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology. *Journal of Hydrology*. Vol 367, Issues 1-2, 27-40.
- Polanco-Rodriguez, A.G., Navarro, J.A., Solorio, S.J., Mena R.G. y Marrufo, G.J. (2014). Contamination by organochlorine pesticides in the aquifer of the Ring of Cenotes in Yucatán, México. *Water and Environment Journal*. 11p.
- Ramírez, J.A. y Lacasaña, M. (2001) Plaguicidas: clasificación, uso, toxicología y medición de la exposición *Arch. Prev. Riesgos Labor*; 4(2): pp. 67-75.
- Reynoso, L., Sasal, C., Portela, S., Andriulo, A. (2005). Vulnerabilidad del Acuífero Pampeano a la contaminación en el norte de la Provincia de Buenos Aires. Aplicación de la metodología DRASTIC. INTA, Argentina. *RIA*, 34 (1): pp. 85-99.
- Servicio Geológico Mexicano Mapa Geológico escala 1:250000
http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/pdf/118_E16-4-7_GM.pdf Consultado Septiembre 2013.
- Servicio Geológico Mexicano Mapa Geológico escala 1:500000
http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/estados/geologia/peninsula.html Consultado Septiembre 2013.
- Silva-Gómez, S.E., Muñoz, O.A., De la Isla, M.L., Infante, G.S. (2002). Contaminación Ambiental en la Región de Atlixco: 1. Agua. Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática; Instituto de Recursos Genéticos y Productividad; Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, Montecillo Estado de México. 243-251.
- Southworth, C.S. (1985). Application of remote sensing data, Eastern Yucatan in W.C. Ward, A.E. Weidie y W. Back (Eds), *Geology and hydrogeology of the Yucatán and quaternary geology of northeastern Yucatán peninsula*. 12-19. New Orleans: New Orleans Geological Society Publications.
- USDA-Soil Conservation Service. (1992). *Agricultural Waste Management Field Handbook*. Agricultural Impacts on the use of water.

Velázquez, G. (1995). Estudio geoquímico del anillo de cenotes, tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM, México.

Weidie, A.E. (1985). Geology of Yucatan Platform. In: Ward WC, Weidie AE, Back W (eds.) Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula. New Orleans Geological Society, New Orleans, LA

Wilkinson, C.F. (1976). Insecticide biochemistry and physiology. Plenum Press, USA-UK.

Worthington S.R.H., Ford D.C. and Beddows P.A. (2000). Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution, In: A.B. Klimchouk, D.C. Ford, A.N. Palmer and W. Dreybrodt edit., Spelogenesis: Evolution of Karst Aquifers, National Speleological Society, Huntsville AL, pp. 463-472.

CAPITULO II COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES PRESENTES EN EL SISTEMA SUBTERRÁNEO POR LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS

2.1. INTRODUCCION

Hernández (2011), indicó que en México, los plaguicidas llegan a los cuerpos de agua por escurrimiento, infiltración y erosión de los suelos. Además, menciona que estos químicos pueden movilizarse en la atmosfera y por escorrentía afectar suelos y cuerpos de agua superficiales.

Este tipo de compuestos en el ambiente viajan grandes distancias siendo transportados a través del agua y del aire, llegando a regiones donde nunca se aplicaron. De esta manera se ha identificado plaguicidas como el DDT en zonas del Ártico (Ritter, *et al.* 1995) por ejemplo. La Organización Panamericana de la Salud, (OPS, 2009) los identifica como contaminantes orgánicos persistentes (COP's) debido a que estos permanecen por largos periodos de tiempo.

En México la CONAGUA identifica 600 acuíferos con diferentes características de balance de agua y de actividades que ocurren en cada uno de ellos. En la PY la CONAGUA identifica un acuífero reconocido como la única fuente de agua fresca para los habitantes de la península, y por esta razón, las demandas de agua en la península se incrementan día a día debido al crecimiento poblacional y de las actividades en la zona y con ello aumenta también el riesgo de contaminación.

La preocupación sobre la contaminación de las aguas subterráneas está aumentando en todo el mundo desde hace algunas décadas. En México existen pocos estudios sobre el impacto de las actividades agrícolas en la calidad de las aguas subterráneas y más aún en la zona del sureste del país. Ubicada en la cuenca del río Hondo, al sur del estado de Quintana Roo, se encuentra la zona cañera, con una extensión aproximada de 22,000 ha de campo agrícola, localizada en los poblados de Álvaro Obregón y Pucté, la cual año con año, es fertilizada y regada con compuestos orgánicos, (organoclorados, organofosforados y piretroides) para evitar las plagas que afectan los cultivos de caña.

Por lo que en este trabajo se desarrolló una estrategia para la identificación de los compuestos orgánicos que por actividad agrícola son aplicados en una zona altamente vulnerable y que permite identificar su movimiento y con ello establecer puntos de descarga, lo que permitirá evidenciar la dirección que el flujo subterráneo puede tomar en una zona de uso continuo y de extensión difusa de contaminantes orgánicos persistentes.

2.2. METODOLOGIA

2.2.1 Selección de sitios de muestreo

Para alcanzar los objetivos de este trabajo, se enfocó la determinación de la presencia de plaguicidas en el suelo y en la formación de lixiviados para saber si estos eran transportados por lixiviación al agua subterránea en la zona cañera al sur del estado de Quintana Roo. Para lo cual se definieron los sitios de colecta de suelo en donde se colectaron también los lixiviados y se ubicaron pozos de diferente uso para la colección del agua subterránea en el área definida de estudio como se describe a continuación.

Se realizó la ubicación con GPS de los sitios de colecta de suelos y lixiviados (Tabla 2.1) y posteriormente de pozos agrícolas y de distribución de agua potable (Tabla 2.2) que se encuentran en diferentes puntos en una superficie de 220 km² que equivalen a 22,000 ha aproximadamente a lo largo de la zona cañera de Quintana Roo (Figura 2.1), la cual se encuentra ubicada en el sur del estado y delimita al norte con el municipio de “Bacalar”, al sur con el país de “Guatemala”, al este con el “Río Hondo” que es el río que delimita la frontera entre México y Belice, al oeste con el estado de “Campeche” y al noreste con la ciudad de “Chetumal”.

Estos puntos fueron seleccionados, por su cercanía con estaciones agroclimáticas distribuidas a lo largo de la zona cañera.

Tabla 2. 1 Coordenadas UTM de los sitios de colecta de suelo y lixiviado en la Zona Cañera.

Sitios		Coordenadas UTM	
Puntos de Monitoreo		Este (mE)	Norte (mN)
	INI	345962	2054026
	LAT	339522	2049859
	SX	337247	2042403
	OM	327843	2039930
	TT	335223	2036179
	FD	316390	2026410
	NF	326959	2025793
	ET	313526	2021244
	MP	312214	2016813
	EH	318614	2012186
	CH	310581	2010243
	5M	312784	2003316

Tabla 2. 2 Coordenadas UTM de los pozos potables y agrícolas en la zona cañera.

Sitios		Coordenadas UTM		Sitios		Coordenadas UTM	
No.	Pozos de Agua Agrícola	Este (mE)	Norte (mN)	No.	Pozos de Agua Potable	Este (mE)	Norte (mN)
1a	PSXA	337229	2042316	1p	PXH	342842	2053514
2a	PRA	337967	2037216	2p	PMA	338227	2046591
3a	PBF	331522	2029718	3p	PUC	339628	2046238
4a	P5EAO	326052	2023909	4p	PSXP	339292	2042223
5a	P14AO	324300	2022462	5p	PPA	338161	2040409
6a	PJH	319588	2011114	6p	PAO	323413	2022219
				7p	PCA	320582	2012294
				8p	PC2	319819	2013144

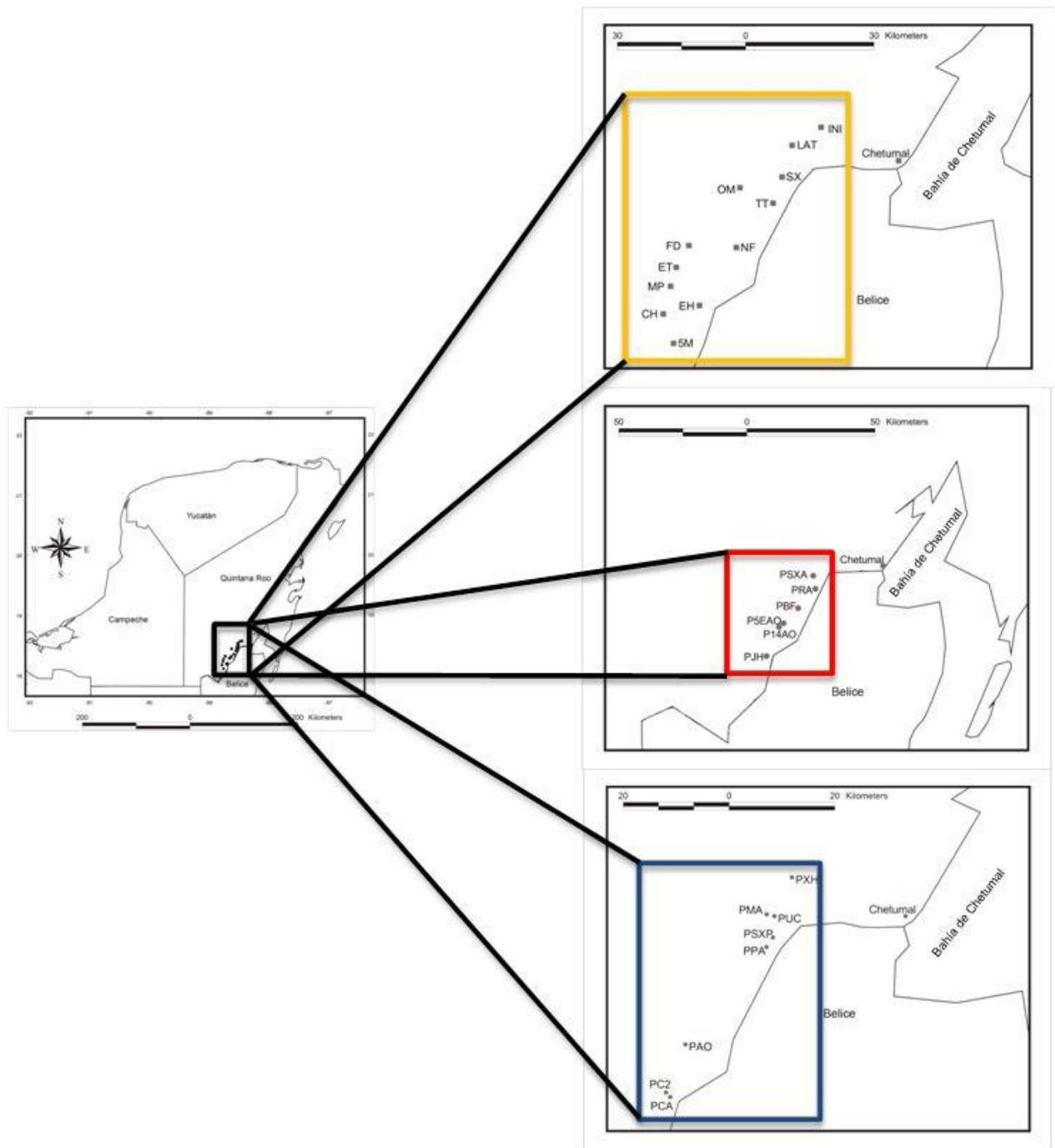


Figura 2. 1 Pozos de distribución (Azul), pozos de uso agrícola (Rojo) y puntos de monitoreo de lixiviados y suelos (Anaranjado); zona cañera, sur de Quintana Roo.

2.2.2. Precipitación y temperatura

La información de precipitación y temperatura se obtuvo del Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), con referencia en sus bases de datos de estaciones agroclimáticas distribuidas en la zona cañera.

En cuanto a la precipitación, la media estatal es de 1300 mm, estas lluvias se presentan durante todo el año, siendo más abundantes en los meses de Junio a Octubre.

La temperatura media anual del estado es de 26°C, la temperatura máxima promedio es de **33°C** y se presenta en los meses de abril a agosto, con un clima cálido subhúmedo favoreciendo los cultivos de caña.

2.2.3. Parámetros físico-químicos

2.2.3.1. Suelo

En este caso no se realizaron determinaciones físico químicas de los suelos colectados, sin embargo usando tablas descriptivas de suelos se identificaron los siguientes tipos de suelo: Gleysol, Luvisol, Leptosol y Vertisol (Fernández, P.L., Lazo G.L. y Tuz, C.C; comunicación oral, 2012).

2.2.3.2. Lixiviados

Se midió el pH y la temperatura al momento de la colecta, con la finalidad de determinar las condiciones en las que se encontraba el lixiviado al momento de su extracción.

2.2.3.3. Agua Subterránea

De los 14 pozos muestreados se realizaron análisis de pH, temperatura, conductividad eléctrica, esto fue medido en campo, utilizando un multiparamétrico “*CONDUCTRONIC PC18*”, en cada una de las muestras extraídas de los pozos agrícolas y de los pozos de uso potable con la finalidad de determinar las condiciones en las que se encontraba el agua al momento de su extracción.

2.2.4. Detección de compuestos orgánicos persistentes COP's

2.2.4.1. Sistema subterráneo: Suelo

Se obtuvieron muestras a cuatro profundidades en cuatro tipos de suelos, en 12 puntos (Figura 2.1) ubicados en la zona cañera (Tabla 2.1), en Junio del 2012, y en estos mismos puntos, se colocaron tubos colectores a la misma profundidad del suelo y se recolectaron los lixiviados de los periodos de Julio-Octubre 2012 y de Marzo-Julio 2013.

Posteriormente se realizó el análisis cromatográfico para la determinación de los compuestos orgánicos presentes tanto en suelos como en lixiviados. Para los análisis de suelos se realizó una extracción sólido-liquido, utilizando un solvente polar (Isopropanol), llevando la solución a inyección directa por cromatografía de gases y para los análisis en lixiviados y agua subterránea, se realizó una micro extracción en fase sólida (SPME) que consistió en insertar una fibra de polietilsiloxano en los viales con muestra de lixiviados y agua subterránea y se dejaron durante 35 minutos con la finalidad de que los compuestos orgánicos quedaran adheridos a la fibra.

2.2.4.2. Sistema subterráneo: Agua

Se colectaron muestras de agua en 14 pozos (Figura 2.1) ubicados en la zona cañera (Tabla 2.2), seis pozos de uso agrícola muestreados en temporada de secas (Marzo, 2013 y Abril, 2014) y ocho pozos de agua potable, muestreados en temporada de lluvias y secas (Octubre 2012 y Marzo 2013), la toma de muestras fueron realizadas de forma directa, en las que se extrajo el agua por 5 min para asegurar que fuera agua subterránea y no la contenida en el tubo de abastecimiento de un bombeo anterior, se tomaron las muestras en viales de 50 ml sin dejar burbuja y fueron transportados en una hielera para su preservación. Las muestras de agua se trasladaron al laboratorio de la UCIA-CICY para el análisis del contenido de organoclorados, organofosforados y piretroides por cromatografía de gases.

2.2.5. Análisis cromatográfico Presencia/Ausencia COP's

Una vez concluido el tiempo de sorción en la fibra SPME, ésta fue transferida al puerto de inyección del cromatógrafo de gases, donde ocurre una desorción de las moléculas, y obtener la identificación de los compuestos presentes, en base a sus límites de detección.

Los análisis cromatográficos se efectuaron en un sistema de “cromatografía de gases, con un detector de captura de electrones (ECD)” para el grupo de organoclorados y “cromatografía de gases, con un detector iónico de flama (FID)” para organofosforados y piretroides. El sistema de gases fue splitless, con una temperatura de inyección a 250° C. Para organoclorados se efectuaron los siguientes pasos: 160° C en 20°C/min durante 3 min; 275° C en 3°C/min y 310° C en 20°C/min durante 1 min, el detector alcanzo la temperatura de 320° C. Para organofosforados y piretroides el sistema inicio a 120°C durante 5 min, llevado a 310°C a 10°C/min durante 5 min para finalizar en 320°C a 10°C/min durante 1 min., detector a 320° C. (*Método modificado de Pinheiro y Andrade, 2009*). El sistema es un cromatógrafo “Thermo Finnigan Scientific GC ULTRA y la columna TG-17MS”. La fase móvil fue de nitrógeno en ambos casos.

Tabla 2. 3 Listado de plaguicidas identificados por grupo.

Organoclorados (21)	Organofosforados (18)	Piretroides (2)
4,4' DDD	Apaclor (clorfevinfos)	Cipermetrina
4,4' DDE	Azinfo-etil	Lambda-Cyaloatrina
Alachlor	Azinfo-metil	
Aldrin	DDVP (Diclorvos)	
Alfa BHC	Dimetoate	
Alfa endosulfan	Disulfoton	
Atrazine	Famfur	
Beta BHC	Fenclorfos	
Beta endosulfan	Forate	
Clordano	Malation,	
Delta BHC	Paration	
Dieldrin	Paration-etil	
Endosulfan-Sulfate	Paration-metil	
Endrin	Protiofos	
Endrin Aldehido	Sulfotep	
Heptachlor	Tionazine	
Hexaclorobenceno	Zinofos	

Ketone
Methoxychlorine
p,p' DDT
Simazine

Butaclor

Siendo los límites de detección para plaguicidas organoclorados y organofosforados los siguientes:

Tabla 2. 4 Límites de detección para los tres grupos de plaguicidas analizados.

GRUPOS	ANALITOS DETECTADOS	LDC	LMP	NORMA MEXICANA
Organoclorados	5	0.4-10	0.03-50 mg/l	NOM-127
Organofosforados	10	0.1-10		No existe
Piretroides	1	0.1-10		No existe

LDC- Límite de detección de calidad, es la menor cantidad de analito que se puede detectar (no necesariamente cuantificar) con reproducibilidad.

LMP- Límites máximos permisibles.

2.3. RESULTADOS

2.3.1. Precipitación y Temperatura

El comportamiento de precipitación para el año 2012 fue más recurrente en el periodo de Verano-Otoño (Figura 2.2), caso contrario para el año 2013 en la que la precipitación fue más recurrente en el periodo Otoño-Invierno (Figura 2.3).

La precipitación obtenida para los puntos de estudio o evaluación, no presentaron condiciones diferentes, es decir ambos ciclos muestran que la precipitación promedio no supera los 500 mm. En cuanto a la temperatura en los tres años oscilo en rangos de 22°C- 30°C. Para todos los sitios muestreados.

Para octubre del 2012, en lixiviados y pozos de distribución de agua potable, se observa que para la zona cañera hubo una precipitación cercana a los 200 mm, lo que indica un mayor desplazamiento de los compuestos orgánicos que arribaron al agua subterránea a partir de los lixiviados infiltrados desde la zona de cultivo.

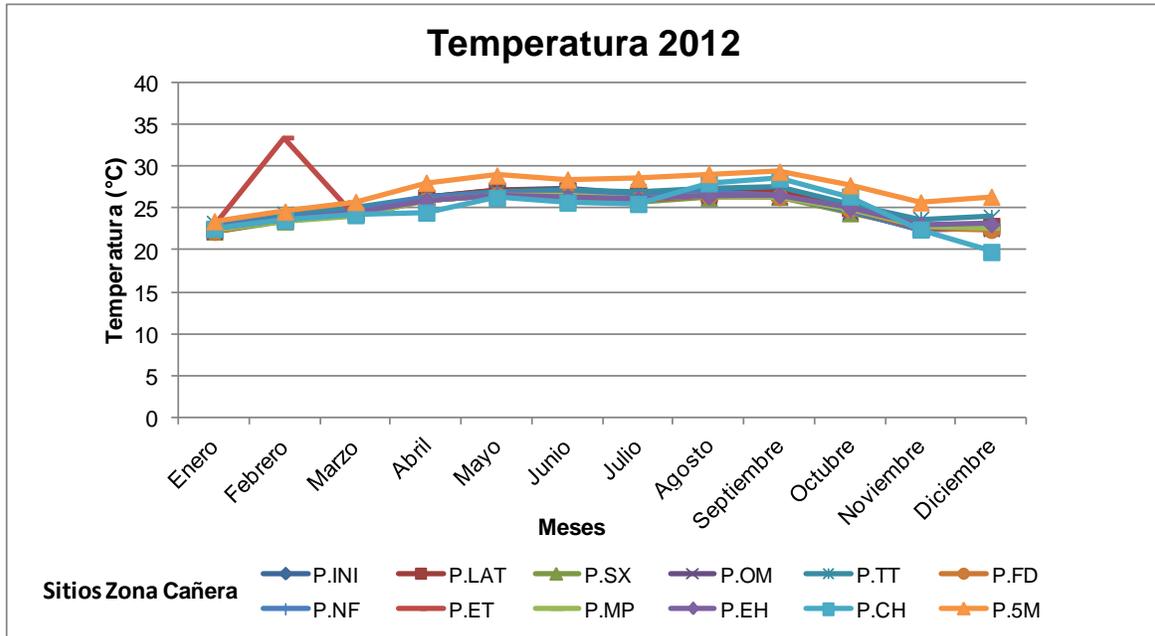
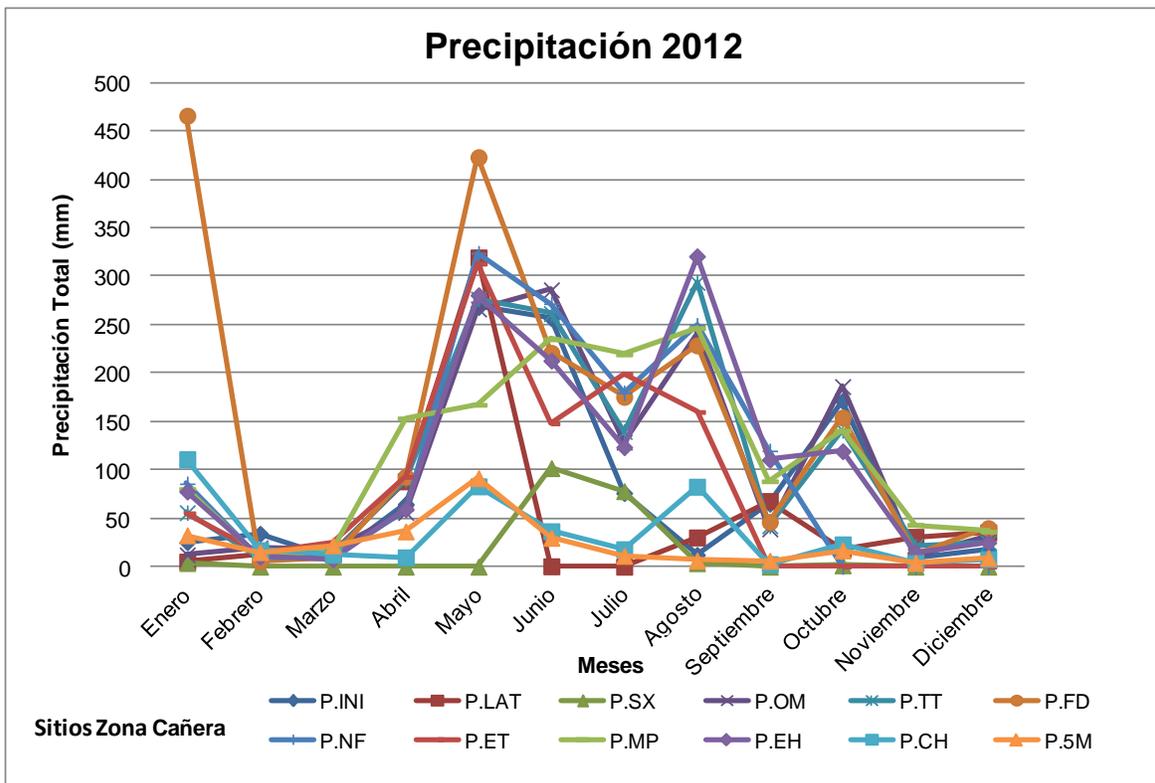
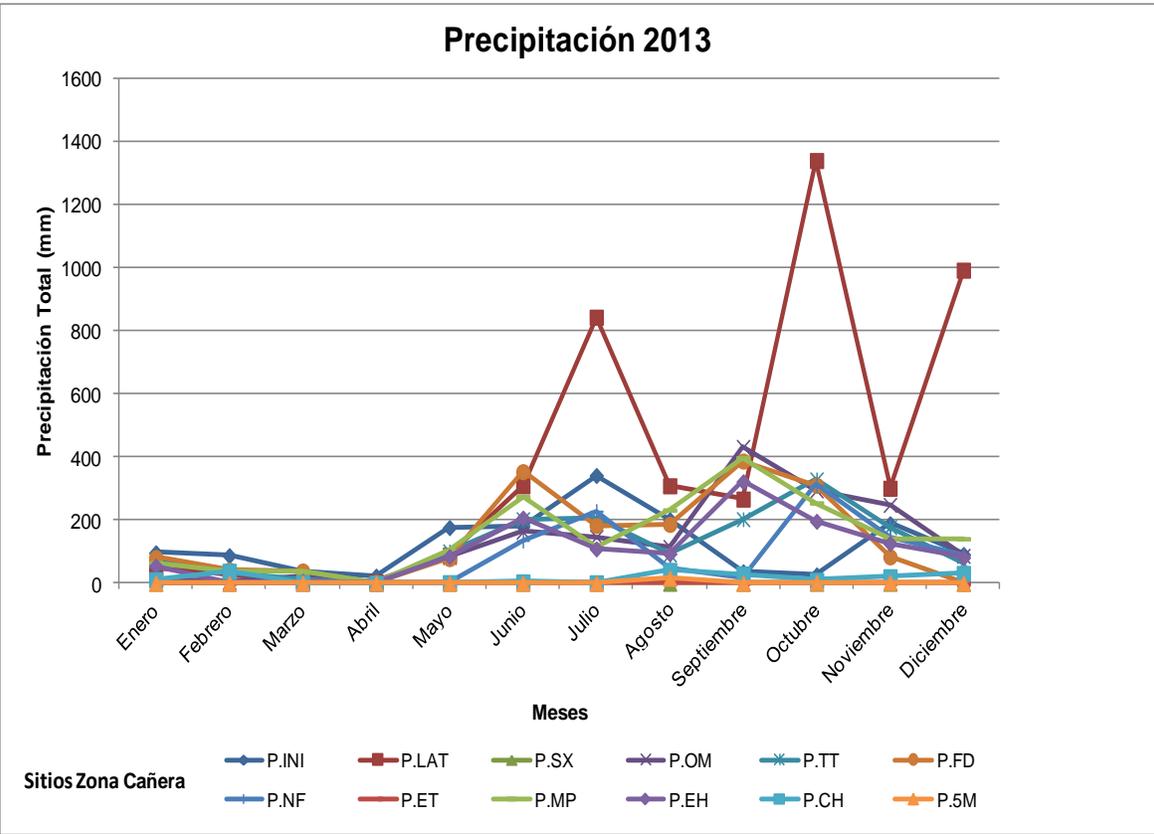


Figura 2. 2 Precipitación y Temperatura 2012 en estaciones agroclimáticas ubicadas en la zona cañera.

Para el mes de secas (marzo 2013) en pozos de distribución de agua potable y uso agrícola, se observa que para la zona cañera hubo una precipitación casi nula, es decir que la generación de lixiviados fue insuficiente, debido a que las precipitaciones en las zonas de colecta no generaron lixiviados que fuera posible colectar para análisis. Esta baja precipitación, repercute en un menor arribo de los compuestos orgánicos en lixiviados y en consecuencia a todo el sistema subterráneo: suelo y agua.

Los resultados confirman el lavado de suelos agrícolas, donde la abundancia de analitos aumenta en temporada de lluvias (Octubre 2013) ya que nos indica un mayor aporte de compuestos orgánicos que afectan la calidad del agua subterránea.



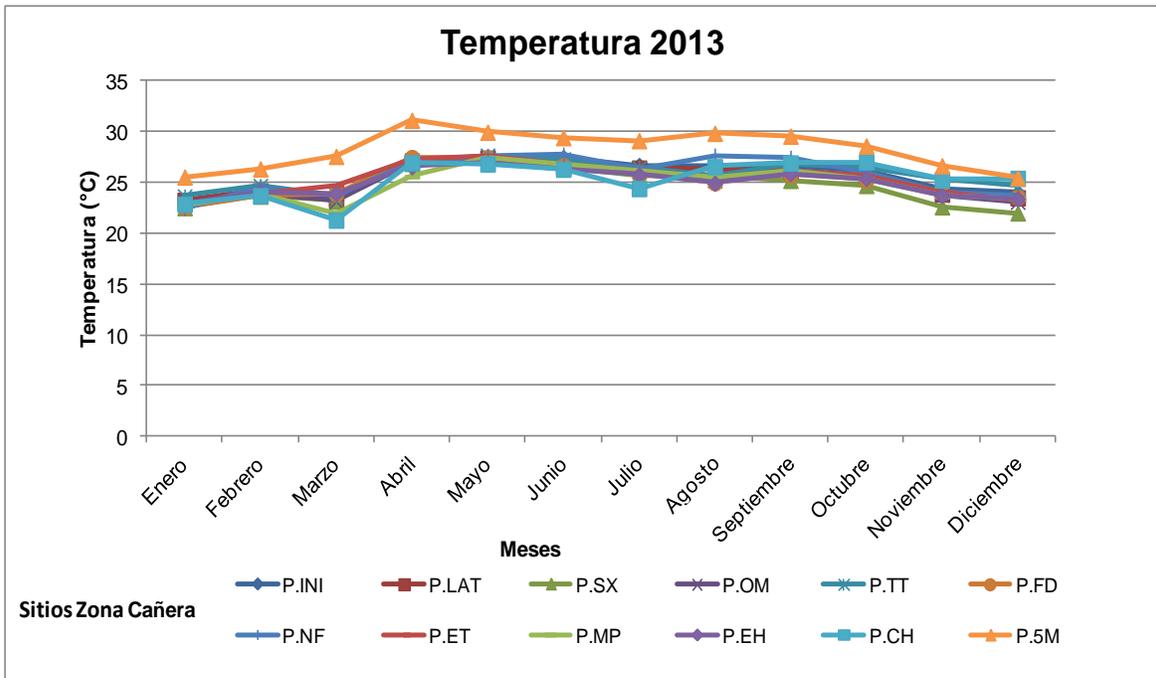


Figura 2. 3 Precipitación y Temperatura 2013 en estaciones agroclimáticas ubicadas en la zona cañera.

Finalmente, la precipitación para abril del 2014, no se conto con los datos, sin embargo se observó en la Figura 2.4 que el año comenzó con lluvias pero que a partir de febrero no hubo mayor precipitación lo que indica el inicio de la temporada de secas para este año.

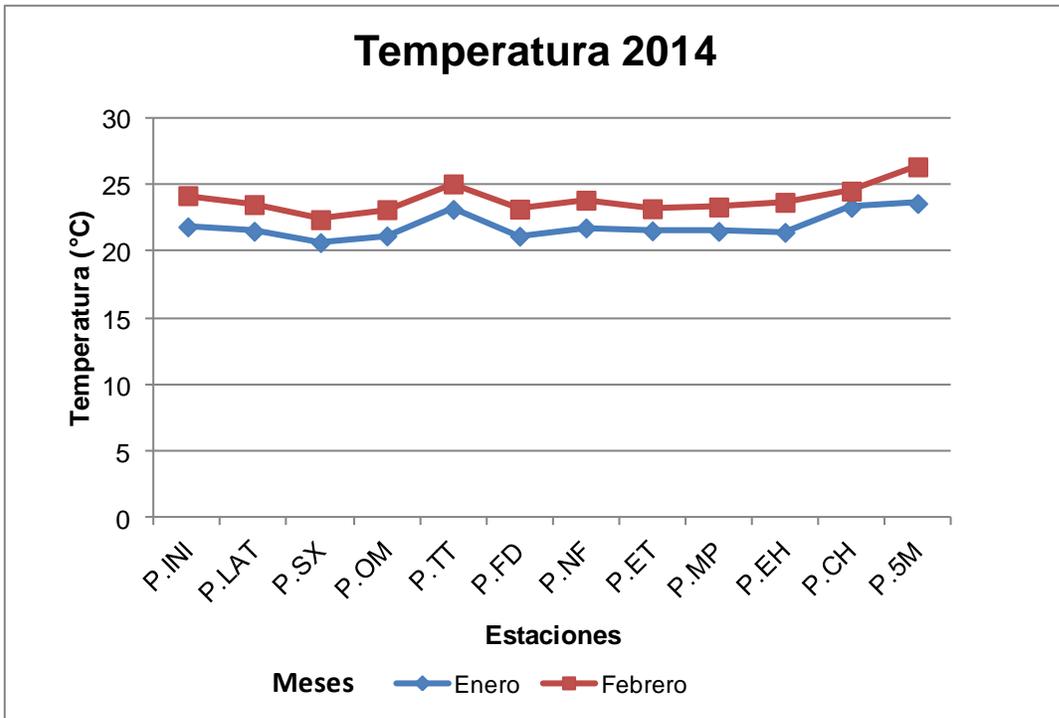
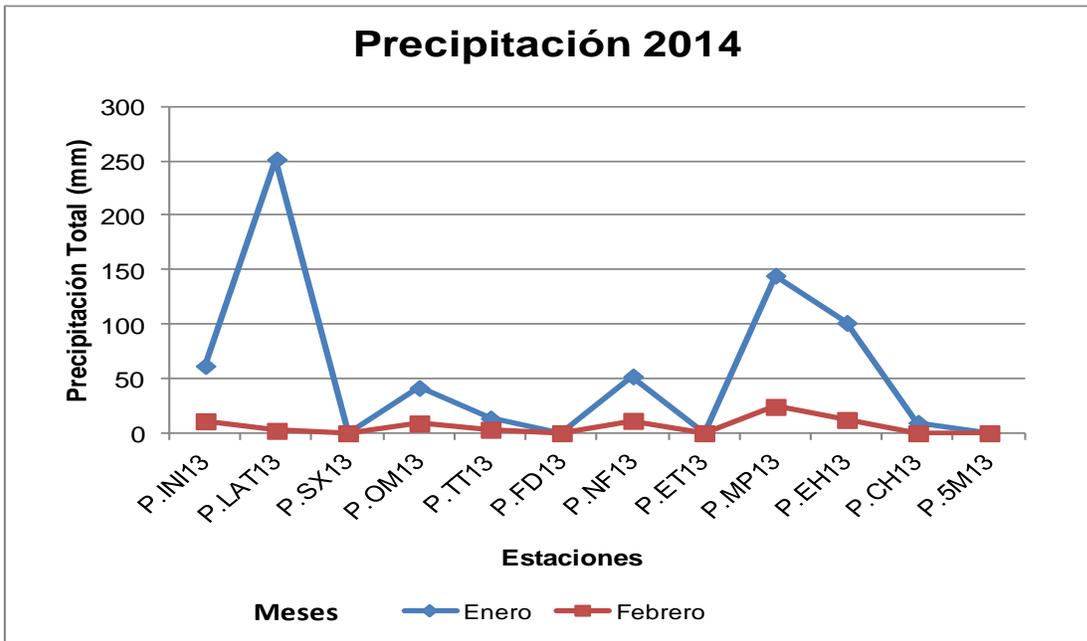


Figura 2. 4 Precipitación y Temperatura 2014 en estaciones agroclimáticas ubicadas en la zona cañera.

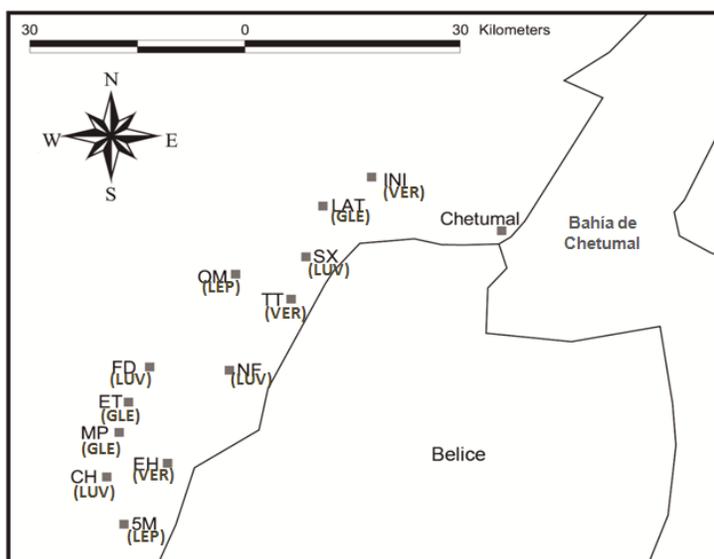
2.3.2. Parámetros físico-químicos

2.3.2.1. Suelos

Para suelos no se realizaron análisis fisicoquímicos, sin embargo se sabe que existen 4 tipos de suelos (Tabla 2.5) descritos en la zona de estudio.

Tabla 2. 5 Tipos de suelo en puntos de muestreo.

Estación	Tipo de suelo
5M	Leptosol
CH	Luvisol
EH	Vertisol
NF	Luvisol
TT	Vertisol
SX	Luvisol
OM	Leptosol
LAT	Gleysol
INI	Vertisol
FD	Luvisol
MP	Gleysol
ET	Gleysol



2.3.2.2. Lixiviados

Para los lixiviados, solo se obtuvo el pH en campo y el rango fue (6 - 8), este parámetro se detectó para confirmar las condiciones de la toma de muestra como variación de la muestra de agua subterránea.

2.3.2.3. Agua Subterránea

Los resultados de los análisis fisicoquímicos para las muestras de agua subterránea en los pozos agrícolas y de distribución de agua potable, analizados desde 2012 a 2014 se muestran en la Tabla 2.6. Se puede observar que en los pozos agrícolas de “SXA” y “BF” la *conductividad eléctrica* es alta, que se ve relacionada con su *temperatura*; y lo mismo se observa para los pozos de agua potable “PPA, PXH y PC2”. En cuanto al pH las

muestras de agua presentaron rangos de 6.37-7.98 en pozos agrícolas y de 6.7-7.33, en pozos de distribución de agua potable.

Tabla 2. 6 Parámetros fisicoquímicos en Pozos agrícolas y de distribución de agua potable.

No.	Pozos Agrícolas	pH	Temperatura	C.E.
1a	PSXA	6.46	29.6	1644
2a	PRA	7.98	27.9	1337
3a	PBF	6.4	35.8	1389
4a	P5EAO	6.37	28.8	567
5a	P14AO	6.57	27.7	625
6a	PJH	6.68	26.7	763

Temperatura (°C) y C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

No.	Pozo Potable	pH	Temperatura	C.E.
1p	PXH	7.05	27.7	1441
2p	PMA	7.14	26.6	818
3p	PUC	7.23	26.2	680
4p	PSXP	7.08	28.4	1176
5p	PPA	7.33	28.9	1413
6p	PAO	6.91	27.2	665
7p	PCA	7.13	28.5	1007
8p	PC2	6.7	28.9	1209

Temperatura (°C) y C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

2.3.3. Detección de compuestos orgánicos persistentes COP's

2.3.3.1. Generación de lixiviados

En época de lluvias se generó la lixiviación en la mayoría de los sitios por lo que la distribución de los compuestos orgánicos persistentes en lixiviados corresponde a esta época, (Tabla 2.7 y 2.8). Los sitios (SX, OM, FD y ET), reportan la mayor incidencia de generación de lixiviados cuyo análisis reportó la presencia de los tres grupos (organoclorados, organofosforados y piretroides).

Los compuestos organofosforados son los que se presentan con mayor frecuencia en estos lixiviados, predominando la identificación de los analitos: Sulfotep y Tionazine.

En temporada de secas disminuye la generación de lixiviados por lo que no se colecta muestra suficiente de ningún sitio a ninguna profundidad.

Tabla 2. 7 COP's de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en lixiviados (Lluvias- Julio).

Sitios	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
INI	ND	Famfur, DDVP	ND
LAT	Dieldrin, Metoxychlor	Sulfotep, Dimetoate, Paration-etil	ND
SX	Heptachlor, Simazine, Dieldrin	Sulfotep, Dimetoate, Paration Tionazine, Famfur, Malation	Lambda- Cyaloatrina
OM	Alachlor, Simazine, Heptachlor, Atrazine	Malation, Paration- etil, Famfur	Lambda- Cyaloatrina
TT	Lindane (Beta BHC)	Tionazine, Dimetoate	ND
FD	Simazine, Atrazine, Alachlor Heptachlor, Dieldrin, Endrin-Aldehido	Dimetoate, Tionazine, Disulfoton, Malation	Lambda- Cyaloatrina
NF	SL	SL	SL
ET	Heptachlor, Dieldrin, Atrazine	Dimetoate, Tionazine, Disulfoton, Malation Paration-metil, Paration-etil, Famfur, Sulfotep	Lambda- Cyaloatrina
MP	Simazine, Dieldrin	Famfur	ND
EH	Atrazine, Heptachlor	DDVP	ND
CH	Simazine, Heptachlor	DDVP, Forate	ND
5M	Heptachlor, Endrin-Ketona	DDVP, Tionazine	ND

Tabla 2. 8 COP's de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en lixiviados (Lluvias- Octubre).

Sitios	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
INI	ND	Sulfotep, Azinfo-metil, Tionazine	Cipermetrina
LAT	ND	Fanfur y Tionazine	ND
SX	4,4'DDD, Dieldrin	Fanfur, Tionazine, Dimetoate	Lambda-Cyaloatrina
OM	Hexaclorobenceno	Malation, Tionazine, Dimetoate	ND
TT	Lindane (Beta BHC)	Tionazine, Dimetoate	ND
FD	Dieldrin, Endrin-Aldehido	Sulfotep, Azinfo-metil, Tionazine Clorfevinfos, Paration-etil	Lambda-Cyaloatrina
NF	S/L	S/L	S/L
ET	ND	Sulfotep, Malation, Tionazine, Azinfo-metil	Lambda-Cyaloatrina
MP	4,4'DDE, 4,4'DDD	Fanfur	Cipermetrina
EH	ND	ND	ND
CH	S/L	S/L	S/L
5M	Heptchlor	Dimetoate, Tionazine, Azinfo-metil, DDVP	ND

2.3.3.2. Identificación de los COP's (Lixiviados)

De la determinación de COP's en lixiviados, se encontró que en los pozos de monitoreo, los compuestos orgánicos se presentan a diferentes profundidades (Tabla 2.9), donde se observa que el mayor porcentaje de compuestos encontrados fue en los pozos de 46-60 cm., y en los pozos donde se observó el un menor porcentaje fue en los de 16-30 cm.

Tabla 2. 9 Numero de plaguicidas encontrados en lixiviados a diferentes profundidades en temporada de lluvias.

Leptosol (5M y OM)			
Profundidad	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
0-15	3	3	0
16-30	3	3	0
31-45	2	2	0
46-60	4	5	1

Vertisol (INI, EH y TT)			
Profundidad	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
0-15	1	1	1
16-30	0	1	0
31-45	2	4	0
46-60	1	1	0

Gleysol (LT, MP y ET)			
Profundidad	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
0-15	4	9	1
16-30	2	6	0
31-45	5	7	0
46-60	2	12	0

Luvisol (CH, NF, SX y FD)			
Profundidad	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
0-15	6	6	0
16-30	5	7	0
31-45	6	7	1
46-60	4	9	1

Profundidad en cm.

2.3.3.3. Sistema subterráneo: Suelo

Los compuestos orgánicos persistentes detectados en los suelos de la zona cañera, como se observa en las Tablas 2.10, 2.11 y 2.12, indican que el grupo de los organoclorados es el que mayor número de compuestos presente, seguido de los organofosforados y por último los piretroides, siendo los sitios OM y MP donde mayor número de compuestos fueron detectados. El grupo de organoclorados tuvo una mayor presencia en temporada de lluvias que en la época de estiaje, caso contrario para organofosforados y piretroides en los que se detectó un mayor número de compuestos orgánicos en temporada de secas.

Tabla 2. 10 Organoclorados presente en las temporadas de lluvias y secas en los suelos de la zona cañera.

Sitios	Organoclorados (lluvias)	Organoclorados (secas)
INI	Clordano, Endrin-Ketone	Clordano, Endrin-Ketone
LAT	ND	ND
SX	ND	ND
OM	Endrin Aldehido, pp'DDT, Beta Endosulfan, Heptachlor, Delta BHC, Aldrin, 4,4'DDE, Alfa Endosulfan, Dieldrin Endrin y 4,4'DDD	ND
TT	ND	ND
FD	Clordano, Endrin-Ketone	Clordano, Endrin-Ketone
NF	ND	ND
ET	Alachlor, Clordano, Endrin-Ketone	Alachlor, Clordano, Endrin-Ketone
MP	Atrazine/Simazine, Alfa BHC, Beta BHC, Alachlor, Heptachlor, Delta BHC, Aldrin, 4,4'DDE, Alfa Endosulfan, Dieldrin, Endrin, 4,4'DDD, Beta Endosulfan, p,p'DDT, Endrin Aldehido,	Atrazine/Simazine, Alfa BHC, Beta BHC, Alachlor, Heptachlor, Delta BHC, Aldrin, 4,4' DDE, Clordano, Alfa Endosulfan, Dieldrin, Endrin, 4,4' DDD, beta Endosulfan, p,p' DDT, Endrin Aldehido, Methoxychlorine
EH	ND	ND
CH	Heptachlor, Delta BHC, Aldrin 4,4'DDE, Alfa Endosulfan, Dieldrin Endrin y 4,4'DDD	Heptachlor, delta BHC, Aldrin, 4,4' DDE, alfa Endosulfan, Dieldrin, Endrin, 4,4'DD

En cuanto a los compuestos organofosforados (Tabla 2.11) en la temporada de secas, los sitios de muestreo, SX, FD y ET, son los puntos donde los compuestos, Famfur y Malation fueron los más abundantes.

Tabla 2. 11 Organofosforados presentes en las temporadas de lluvias y secas en los suelos de la zona cañera.

Sitios	Organofosforados (lluvias)	Organofosforados (secas)
INI	ND	Famfur y Diclorvos
LAT	Residuales	Sulfotep, Dimetoate y Paration
SX	Etil-Paration	Sulfotep, Dimetoate Malation, Famfur, Paration y Tionazine (zinofos)
OM	Apaclor	Malation, Paration
TT	ND	Dimetoate y Tionazine(zinofos)
FD	Residuales	Sulfotep, Dimetoate Tionazine (Zinofos) Malation, Famfur
NF	ND	ND
ET	Metil-Azinfo y Etil-Azinfo	Malation, Metil-Paration, Paration, Famfur, Tionazine (zinofos)
MP	ND	Famfur
EH	ND	Diclorvos (DDVP)
CH	ND	Forate y Diclorvos
5M	DDVP y Butaclor	Diclorvos, Tionazine (zinofos)

Para piretroides (Tabla 2.12) solo se encontró que en algunos sitios se aplica la Lambda-Cyaloatrina para acabar con insectos, y que es el producto que se identificó en temporada de secas, teniendo presencia en los puntos SX, OM, FD y ET, esto debido a la aplicación de este plaguicida durante el cultivo, en esta época del año.

Tabla 2. 12 Piretroides presentes en las temporadas de lluvias y secas en los suelos de la zona cañera.

Sitios	Piretroides (lluvias)	Piretroides (secas)
INI	ND	ND
LAT	Residuales	ND
SX	Residuales	Lambda Cyaloatrina
OM	ND	Lambda Cyaloatrina

TT	ND	ND
FD	Residuales	Lambda Cyaloatrina
NF	ND	ND
ET	ND	Lambda Cyaloatrina
MP	ND	ND
EH	ND	ND
CH	ND	ND
5M	Residuales	ND

2.3.3.4. Identificación de los COP's (Suelos)

De la determinación de COP's en suelos, se encontró que solo ciertos plaguicidas alcanzan a presentarse en los diferentes tipos de suelo (Tabla 2.13) y éstos a su vez se presentan a diferentes profundidades (Tabla 2.14), donde se presentó una mayor retención en Gleysol, posteriormente en Luvisol seguido del suelo Leptosol y presentando la menor retención de compuestos orgánicos se encuentran a los Vertisol en los que el grupo de organoclorados fue el más representativo en esta matriz.

En cuanto a la profundidad se observó que los suelos Gleysol son los que retienen más en superficie (0-15 cm), para Luvisol y Leptosol se presenta mayor retención en profundidades de entre (31-45 cm) y finalmente los Vertisol presentan retención entre (0-45 cm).

Tabla 2. 13 Numero de plaguicidas encontrados en suelos por tipos de compuesto orgánico (lluvias y secas).

	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
Leptosol	(13/20)	(6/14)	(1/1)
Vertisol	(2/20)	(4/14)	(0/1)
Gleysol	(20/20)	(8/14)	(1/1)
Luvisol	(10/20)	(9/14)	(1/1)

Tabla 2. 14 Numero de plaguicidas encontrados en suelos a diferentes profundidades en temporada de lluvias.

Leptosol (5M y OM)			
Profundidad	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
0-15	0	2	0
16-30	0	2	0
31-45	11	2	0
46-60	2	0	0

Vertisol (INI, EH y TT)			
Profundidad	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
0-15	2	0	0
16-30	2	0	0
31-45	2	0	0
46-60	0	0	0

Gleysol (LT, MP y ET)			
Profundidad	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
0-15	18	3	0
16-30	18	0	0
31-45	10	3	0
46-60	1	0	0

Luvisol (CH, NF, SX y FD)			
Profundidad	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides
0-15	2	4	0
16-30	0	4	0
31-45	8	1	0
46-60	2	1	0

Profundidad en cm.

2.3.3.5. Sistema Subterráneo: Agua

De los resultados cualitativos realizados a los seis pozos de uso agrícola, y a los ocho pozos de agua potable se detectó la presencia de los tres grupos de COP's, así como analitos en las muestras de agua subterránea (Tabla 2.15).

Se observó que de los seis sitios de pozos de uso agrícola, cuatro de ellos tuvieron presencia de analitos; y para los pozos de agua potable, de los ocho sitios de muestreo, hubo presencia de analitos en siete de ellos.

La presencia de los 3 grupos de COP's en el agua subterránea de esta zona, indica la infiltración de estos compuestos por su aplicación en la zona cañera.

De esta manera la generación de lixiviados durante las épocas de lluvia transporta los residuales de compuestos químicos agrícolas en el espesor de la capa de suelo antes de arribar a la tabla de agua. Lo anterior se confirma en los resultados de la tabla 2.15, donde el 66.7 % de sitios agrícolas muestra evidencia de esta infiltración.

Los organofosforados tuvieron mayor incidencia de arribo al agua subterránea siendo los Fenclorfos y Tionazine los analitos de mayor importancia. El grupo de organoclorados le siguió en importancia donde el analito alfa BHC presento mayor repetición, finalmente el grupo de piretrinas su presencia fue escasa detectándose solo el analito Cipermetrina en una muestra de agua de uso potable.

Se detectó que un 87.5% de los sitios de uso potable mostro la presencia de analitos; el pozo 5 de uso potable presentó la mayor incidencia del grupo de organofosforados con el mayor número de analitos (Azinfo-metil, Dimetoato, Paration-metil, Sulfotep y Tionazine) y el pozo 7 (uso potable) con la presencia del grupo organoclorados (Alfa BHC, Beta BHC, Endrin y p, p DDT).

Tabla 2. 15 COP's de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en Agua Subterránea de Pozos de Uso Agrícola y Pozos de Agua Potable.

Grupo	Analito	Pozos Agrícolas(66.7%)						Pozos Potables(87.5%)							
		1a	2a	3a	4 ^a	5a	6a	1p	2p	3p	4p	5p	6p	7p	8p
Organoclorados	Alfa-BHC										X		X	X	
	Beta-BHC												X	X	
	Endrin Aldehido					X	X								
	Endrin													X	
	p'p DDT													X	
Organofosforados	Azinfo etil							X			X				
	Azinfo-metil											X			
	Dimetoato											X			
	Fenclorfos				X	X	X								
	Paration etil												X		
	Paration metil			X								X			
	Protiofos				X										
	Sulfotep									X	X				
	Tionazine							X			X	X			
Zinofos										X	X				
Piretroides	Cypermctrina										X				

Para los pozos de uso agrícola, se obtuvieron datos únicamente de la temporada de secas, donde se observó que el analito de los *fenclorfos* son los que tienen mayor presencia en el agua subterránea (Tabla 2.16).

De acuerdo a los resultados obtenidos de la Tabla 2.17, se observa que contrario al comportamiento en suelos el grupo de organoclorados no presenta la mayor incidencia, y en cambio son los organofosforados los que arriban al agua subterránea.

Esto se puede relacionar con el transporte de estos contaminantes mediante el flujo de los lixiviados promovido por la gravedad de la superficie hasta alcanzar la roca y con ello mantener su desplazamiento hasta arribar a la tabla de agua.

Los resultados permitieron identificar a los grupos que se presentan con mayor incidencia en cada una de las matrices sólida-suelos y líquida-agua subterránea, confirmando que el desplazamiento de lixiviados por gravedad es el proceso que controla el transporte en la zona vadosa del sistema.

Tabla 2. 16 COP's de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en Agua Subterránea de Pozos de Uso Agrícola (Secas).

No.	Fecha	Sitios	Coordenadas UTM mE/mN	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides	Sitio de colector	Poblado
1a	12/04/2014	PSXA	337229 / 2042316	ND	ND	ND	SX	Palmar
2a	07/03/2013	PRA	337967 / 2037216	ND	ND	ND	TT	Ramonal
3a	11/04/2014	PBF	331522 / 2029718	ND	Paration-Metil	ND		
4a	11/04/2014	P5EAO	326052 / 2023909	ND	Fenclorfos y Protiofos	ND	FD	Álvaro Obregón
5a	11/04/2014	P14AO	324300 / 2022462	Endrin-Aldehido	Fenclorfos	ND	FD	Álvaro Obregón
6a	11/04/2014	PJH	319588 / 2011114	Endrin-Aldehido	Fenclorfos	ND	EH	Cacao

Tabla 2. 17 COP's de Organoclorados, Organofosforados y Piretroides detectados en Agua Subterránea de Pozos de Agua Potable (Lluvias- Secas).

No.	Fecha	Sitios	Coordenadas UTM mE/mN	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides	Sitio de colector	Poblado
1p	26/10/2012	PXH	342842 / 2053514	ND	Tionazine, Azinfo-etil	ND	INI	Xul-Ha
2p	26/10/2012	PMA	338227 / 2046591	ND	ND	ND		
3p	26/10/2012	PUC	339628 / 2046238	ND	ND	ND		Ucum
4p	26/10/2012	PSXP	339292 / 2042223	ND	Tionazine, Azinfo-Etil	ND	SX	Sac-Xan
5p	26/10/2012	PPA	338161 / 2040409	ND	Tionazine, Azinfo- Metil	ND		Palmar

No.	Fecha	Sitios	Coordenadas UTM mE/mN	Organoclorados	Organofosforados	Piretroides	Sitio de colector	Poblado
1p	09/03/2013	PXH	342842 / 2053514	ND	ND	ND	INI	Xul-Ha
2p	07/03/2013	PMA	338227 / 2046591	ND	Sulfotep	ND		
3p	07/03/2013	PUC	339628 / 2046238	ND	Sulfotep, Zinofos	Cypermctrina		Ucum
4p	07/03/2013	PSXP	339292 / 2042223	Alfa-BHC	ND	ND	SX	Sac-Xan
5p	07/03/2013	PPA	338161 / 2040409	ND	Azinfo-Metil, Tionazine, Dimetoate	ND		Palmar
					Paration-Etil, Zinofos			
6p	07/03/2013	PAO	323413 / 2022219	Alfa-BHC	ND	ND	FD	Álvaro Obregón
		PCA		Alfa-BHC, Beta- BHC, Endrin, p,p´DDT	ND	ND	EH	Cacao
7p	07/03/2013		320582 / 2012294		ND	ND	EH	Cacao
8p	11/04/2014	PC2	319819 / 2013144	ND	ND	ND	EH	Cacao

2.4. DISCUSION

En 2013 observaron cambios en la precipitación con respecto al 2012, en especial al periodo de estiaje, ya que los meses correspondientes al 2012 reportan una lámina de lluvia mayor con respecto al 2013. Los meses de la época de lluvia reportan un valor máximo de 215 mm para el mes de julio y se observa un pico para el mes de octubre de 200 mm, que fueron los meses de toma de muestras; caso contrario al mes de marzo 2013 donde la precipitación fue de 50 mm.

De acuerdo a Duran *et al.* 2004, el acuífero puede clasificarse con una alta tasa de recarga ya que se encuentra en una área donde la precipitación es abundante debido al sistema cárstico de alta permeabilidad que presenta la zona de estudio.

En la PY son pocos los estudios realizados en cuanto a los COP's en el sistema subterráneo, sin embargo sirven de referencia para demostrar que se está presentando una infiltración hacia el acuífero ya que los suelos cársticos en esa región hacen que las aguas subterráneas sean altamente vulnerables a la contaminación por estos compuestos.

Estos estudios son los de a) Metcalfe *et al.* 2011 y b) Polanco *et al.* 2014 que se enfocaron en la detección a) de compuestos orgánicos en agua subterránea de uso recreacional, b) en la zona del anillo de cenotes, respectivamente.

En este trabajo la detección de los COP's en el agua subterránea está ligada a la actividad agrícola, donde se detectó que los COP's son transportados por lixiviados en suelos hasta llegar al acuífero, sin embargo se presentan suelos que tienen una capacidad de amortiguamiento respecto a los contaminantes, como se observa en el número de analitos por grupo la cual presenta una tendencia a disminuir (de un grupo de 20 analitos detectados en suelos, en lixiviados disminuyeron a 12 analitos, esto en compuestos organoclorados).

Esto coincide con los estudios de Cabrera *et al.* 1997 y Garrido *et al.* 1998 donde hay impacto de estos contaminantes en zonas agrícolas, disminuyendo la llegada al acuífero por las diferentes características y que de acuerdo a lo señalado por Candela, 2003,

Bautista *et al.* 2011 y Aguilar *et al.* 2011, las características de los suelos y sedimentos permiten la retención de compuestos orgánicos.

De las referencias consultadas la única normatividad que indica límites máximos permisibles en México es la NOM-127-SSA1-1994 para los compuestos organoclorados (Aldrin, Dieldrin, Clordano, DDT, Lindano, Hexaclorobenceno, Heptacloro y Metoxicloro), la OMS y la OPS solo indican ciertos valores de referencia para sustancias cuya presencia en el agua puede afectar la salud como son los organoclorados (Alaclor, Aldrin, Dieldrin, Atrazina, Clordano, Endrin, Lindano, Metoxicloro y Simazine) y un compuesto organofosforado (Dimetoato) por arriba de los 0.006 µg/l dado que hay evidencia de que son compuestos peligrosos, pero la información y sus efectos en la salud son escasos. Finalmente, no existe una referencia específica de límites para el resto de los organoclorados, organofosforados y piretroides detectados en el estudio.

Es por ello que su sola detección en el agua subterránea implica ya un cambio en la calidad del agua. Y como señala Freeze *et al.* 1979 y Fetter 1988, la calidad de un acuífero se ve impactada por el arribo de cualquier compuesto químico que sea transportado en el sistema subterráneo.

2.5. CONCLUSIONES

La precipitación registrada en los periodos evaluados, el mes que pudo generar más infiltración de lixiviados fue el mes de octubre de 2012, lo cual indica que el transporte de estos compuestos al agua subterránea es a través de lixiviados generados por el agua de lluvia especialmente en los periodos de mayor precipitación. Los cuales son infiltrados desplazándose gravitacionalmente por la zona vadosa hasta llegar a la tabla de agua, quedando retenidos algunos de ellos en los suelos.

Para los lixiviados, el grupo con mayor presencia fue el de los organofosforados, disminuyendo la presencia de analitos para organoclorados y piretroides, lo cual sugiere que es la época en la que el compuesto puede quedar retenido en suelos ya que al haber lixiviado no se da pauta al transporte entre sedimentos (0-15, 16-30, 31-45 y 46-60 cm).

Para los suelos se presentó una mayor retención en Gleysol, posteriormente en Luvisol seguido del suelo Leptosol y presentando la menor retención de compuestos orgánicos encontramos a los Vertisol en los que el grupo de organoclorados fue el que más presencia tuvo en esta matriz.

Y en cuanto a la profundidad se observó que los suelos Gleysol son los que retienen más en superficie (0-15 cm), para Luvisol y Leptosol se presenta mayor retención en profundidades de entre (31-45 cm) y finalmente los Vertisol presentan retención entre (0-45 cm).

Por lo tanto, se sugiere que, la llegada de estos compuestos al sistema de agua subterránea, es a través de lixiviados generados por el agua de lluvia o por riego, los cuales son infiltrados desplazándose gravitacionalmente por la zona vadosa hasta llegar a la tabla de agua, quedando retenidos algunos de ellos en los suelos.

Sin embargo, las implicaciones que tienen al llegar al agua subterránea, sin importar su concentración, es que son transportados en la dirección de flujo, por lo tanto les permitirá llegar a pozos de distribución de agua potable, en las comunidades aguas abajo, provocando problemas de salud, así como llegar a afectar ecosistemas acuáticos.

2.6. REFERENCIAS

- Aguilar, Y., Bautista, F., Díaz-Pereira, E. (2011). Soils as natural reactors for swine wastewater treatment. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 13:199-210.
- Bautista, F. (2005). Información edafológica para el manejo de recursos naturales. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán 1-(8), 282.
- Cabrera, M.C., Muñoz, R., Poncela, R., González, G. y Socorro, A.R. (1997). Comunicaciones libres. Estudio de la contaminación por plaguicidas en la zona no saturada y el acuífero de Gran Canaria y Tenerife (Islas Canarias). *Las aguas subterráneas en la Planificación Hidrológica en las Islas Canarias Las Palmas de Gran Canaria*. AIH-GE.

- Candela, L. (2003). El transporte de los plaguicidas a las aguas subterráneas. *Boletín Geológico y Minero*, 114 (4): 409-417
- CONAGUA, (2009). Establecimiento de una red piezométrica de la zona cañera de Álvaro Obregón, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo. <http://www.conagua.gob.mx/DLQroo07/Noticias/InformeRedPiezometrica.pdf> consultado Julio 2013.
- Durán, J.J., Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J.A., Carrasco, F. y Jiménez, P (2004). Clasificación de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética según la tasa de recarga. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (2): 199-210.
- Fetter, C.W. (1988), *Applied Hydrogeology*. Columbus, Ohio: Merrill Publishing Company. 592.
- Freeze R.A. and J.A. Cherry. *Groundwater*. Ed. Prentice-Hall, Englewood, Cliffs, Nueva York, pp. 604, 1979.
- Garrido, T., Costa, C., Fraile, J., Orejudo, E., Niñerola, J. M., Ginebreda, A. y Figueras, M. (1998). Análisis de la presencia de plaguicidas en diversos acuíferos de Cataluña.
- Guías para la Calidad del Agua Potable (1985) Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. Volumen 1.
- Hernández, A.A., y Hansen, A.M (2011). Uso de plaguicidas en dos zonas agrícolas de México y evaluación de la contaminación de agua y sedimentos. *Rev. Int. Contam. Ambient* vol.27 no.2
- INIFAP (2012-2013). Informe de la segunda etapa del proyecto: Determinación de agroquímicos lixiviados en la zona cañera de Quintana Roo. 61.
- Metcalf, C. D., Beddows, P. A., Bouchot, G. G., Metcalfe, T. L., Li, H., & Van Lavieren, H. (2011). Contaminants in the coastal karst aquifer system along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Environmental pollution*, 159(4), 991-997.

Organización Panamericana de la Salud (2009) <http://www.paho.org/hq/?lang=es> Consultado Octubre 2014.

Polanco-Rodriguez, A.G., Navarro, J.A., Solorio, S.J., Mena R.G. y Marrufo, G.J. (2014). Contamination by organochlorine pesticides in the aquifer of the Ring of Cenotes in Yucatán, México. *Water and Environment Journal*. 11p.

Ritter,L., Solomon, K.R y Forget, J (1995). Contaminantes Orgánicos Persistentes Informe de evaluación sobre: DDT, aldrina, dieldrina, endrina, clordano, heptacloro, hexaclorobenceno, mirex, toxafeno, bifenilos policlorados, dioxinas y furanos. Canadian Network of Toxicology Centres. 51 p.

CAPITULO III EVIDENCIA DEL USO DE COP's COMO INDICADORES DE LA DIRECCION DE FLUJO SUBTERRANEO.

3.1. INTRODUCCIÓN

La principal característica hidrogeológica que distingue al estado es su naturaleza cárstica, lo que permite que la precipitación pluvial se infiltre de manera rápida sin permitir la existencia de corrientes superficiales, exceptuando el río Azul que limita con Belice y Guatemala; y el caso del río Hondo que limita en el sur del estado con Belice.

Para la zona de estudio puede describirse una zona vadosa, donde la parte de sedimentos o suelos abarca un rango de 30-55 cm de profundidad el resto del material antes de llegar a la tabla de agua o manto freático está ocupado por material parental altamente fracturado (Figura 3.1).

Como lo indica el corte litológico Pozo Álvaro Obregón No.1 y Pozo No. 38 (zona cañera) tomado de Informe de Red Piezométrica, (CONAGUA, 2009).

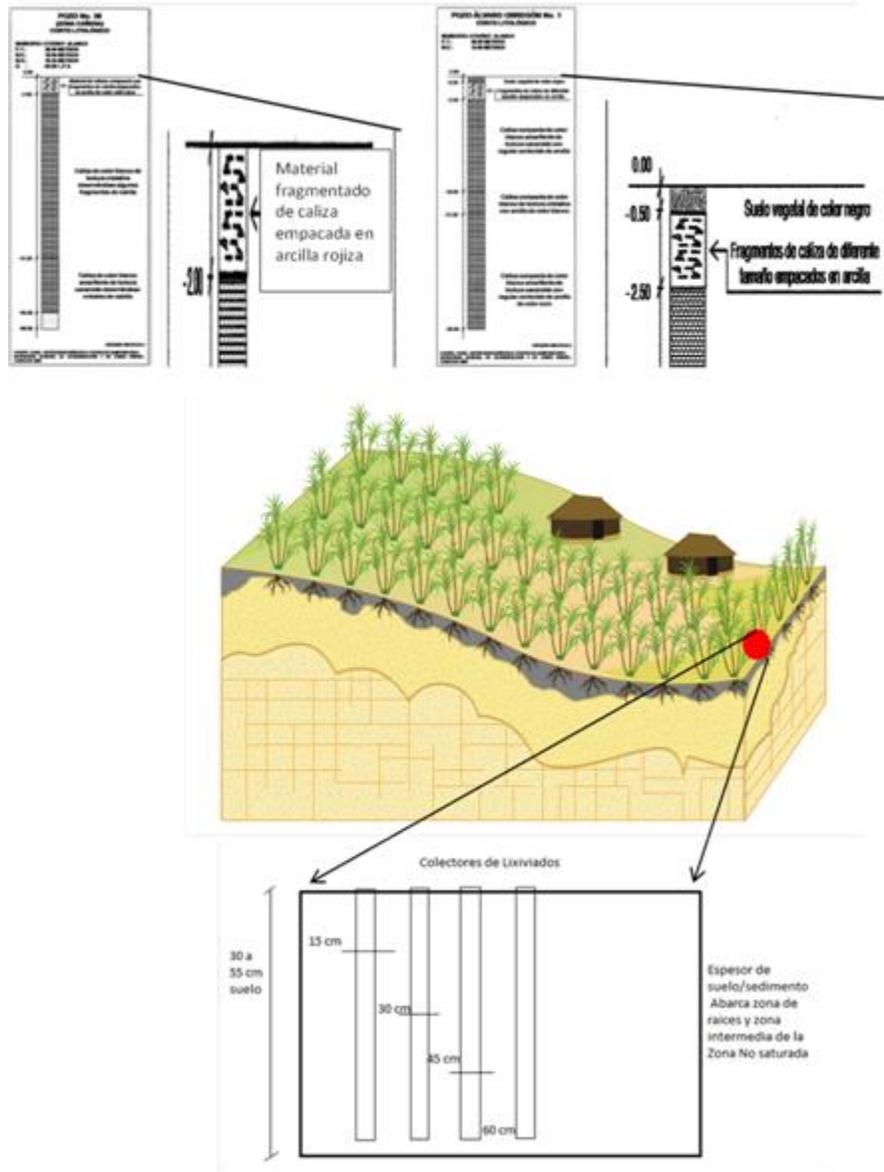


Figura 3. 1 Cortes Litológicos efectuados en el 2009 se definió el espesor de la zona de suelos y sedimentos, por lo que los colectores de lixiviados captaron la migración de lixiviado generado en la superficie y que se infiltró al subsuelo.

Generalmente, la mayoría de contaminantes viaja en la dirección del flujo subterráneo a una velocidad un tanto menor que la de éste (Mazari, 2005).

Cuando se estudia la contaminación de aguas subterráneas se debe considerar si la contaminación es difusa o puntual en la superficie, ya que una característica de los suelos

es la de amortiguar la contaminación, además de funcionar como reactor natural para la descomposición de los contaminantes.

Sin embargo, cuando esta capacidad amortiguadora del suelo se satura, éste se convertirá en fuente de contaminación. Por tal razón las evaluaciones agroambientales del uso de la tierra son tan importantes ya que sirven para evaluar el riesgo real de los contaminantes en los suelos.

El concepto de vulnerabilidad en relación a contaminación en agua subterránea, fue introducido por el hidrogeólogo francés Margat en la década de los sesentas, y aunque inicialmente se relacionaba solo con aspectos cualitativos de contaminación, actualmente puede incluir aspectos cuantitativos de contaminación (Ramos, 2007).

En base a la National Academy Council (1993), el concepto de vulnerabilidad del agua subterránea se refiere a la probabilidad que un contaminante alcance una posición específica en el sistema acuífero, después de su introducción en algún punto sobre el terreno.

La vulnerabilidad general de un acuífero a la contaminación es una propiedad intrínseca que establece su susceptibilidad a ser afectado adversamente por una carga contaminante, independientemente de la presencia de contaminantes (Foster *et al.*, 1987). Este concepto de vulnerabilidad general debe considerarse como una aproximación hacia la determinación de vulnerabilidad específica a algún contaminante en particular (nutriente, patógeno, pesticida, etc.) o en el marco de una actividad determinada (industrial, saneamiento o doméstico, agrícola-ganadera, etc.) (Auge, 2004).

Por otra parte los suelos poseen una capacidad natural para amortiguar el paso de los contaminantes y depurar el agua (Bautista *et al.* 2011). Algunas propiedades edáficas que influyen en esta capacidad de amortiguamiento son: la capacidad de intercambio de cationes, arcillas, materia orgánica, pH y carbonatos, por esta razón se debe considerar este elemento en el análisis de vulnerabilidad, sin embargo la información edafológica en la península es elemental. En estudios de contaminación de aguas subterráneas es necesario entender la teoría básica detrás del movimiento de solutos contenidos en el agua subterránea.

3.1.1. Importancia del uso de trazadores en la hidrogeología

Castany y Margat (1977) definen al trazador como todo carácter específico o toda sustancia solidaria de un cuerpo en movimiento, fundamentalmente del agua subterránea que se desplaza, que permite identificar y describir su movimiento; puede estar presente de forma natural o ser añadido artificialmente.

La investigación de las condiciones hidrogeológicas se puede llevar a cabo por medio del análisis de la hidrogeoquímica (Custodio y Llamas, 1983) o por medio del empleo de trazadores artificiales (Plata, 1999).

Hay tres grupos de métodos para determinar la velocidad del agua subterránea. El primer grupo incluye todas las técnicas que dependen directamente del uso de la ecuación de Darcy. El segundo grupo implica el uso de trazadores artificiales. El tercer grupo consiste en los métodos de datación de edad del agua subterránea usando isótopos ambientales como son tritio y carbono 14 (Freeze *et al.*, 1979).

El método más directo para la determinación de la velocidad del agua subterránea consiste en introducir un trazador en un punto en el campo de flujo y observar su llegada en otros puntos. Después de hacer los ajustes para el efecto de dispersión, la velocidad del agua subterránea puede ser computarizada para el tiempo de viaje y la información de la distancia (Freeze *et al.*, 1979).

Algunos compuestos altamente solubles y móviles y que no reaccionan con el componente del sólido, se mueven prácticamente a la misma velocidad que el agua y por ello se les emplea como trazadores a los cuales se les denomina trazadores conservativos, ejemplo de ello son el NaCl y los NO₃, aunque los NO₃ pueden ser reducidos por el medio, o por bacterias desnitrificantes que, en el caso de existir, modifican significativamente su concentración.

También existen los trazadores involuntarios o que no son introducidos de manera controlada y mediante inyecciones en sitios determinados, esto es aquellos que se presentan por alguna situación de derrame o de introducción por descargas, este es el

caso de los compuestos orgánicos como fenoles en zonas industriales, derrames de gasolinas etc. (Custodio, 1976; Antigüedad *et al.*, 1988).

3.2. METODOLOGIA

3.2.1 Identificación de condiciones hidrogeológicas

El capítulo dos se concentró en identificar los sitios con infiltración e identificación de los analitos presentes en el sistema subterráneo en lugares donde la confirmación de lixiviados promovió la infiltración y el desplazamiento de los mismos por gravedad dentro de la zona vadosa hasta alcanzar la tabla de agua.

Basándonos en la literatura, nos enfocamos en las zonas de flujo regional que están definidas por las zonas de anillos de cenotes, sierra de Ticul y zona de fracturas que Bauer *et al.*, 2011 han propuesto, las cuales abarcan los transectos paralelos a la costa

En este caso se enfocó las características hidrogeológicas conocidas que indican que las direcciones de flujo (Figura 3.2) descargan del continente hacia las zonas de fractura como Holbox en la parte norte y el río Hondo en la parte Sur del acuífero.

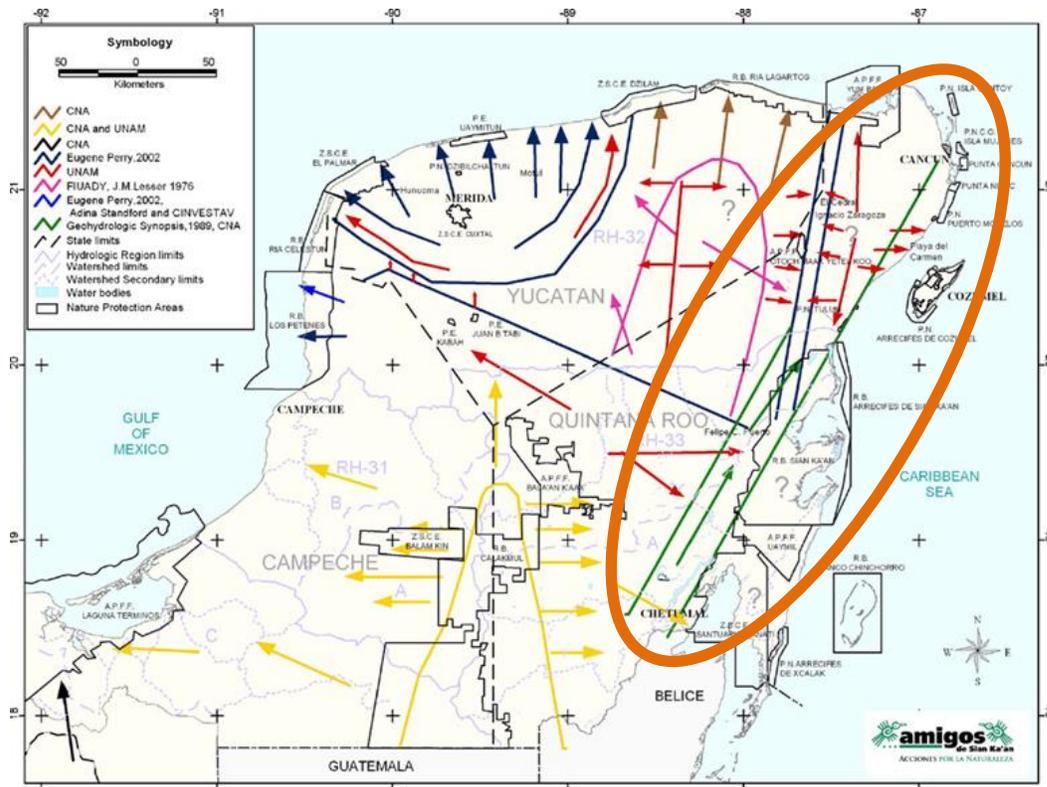


Figura 3. 2 Direcciones de flujo en la PY. (Tomado de Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

Y en cuanto a los flujos locales, la evidencia del desplazamiento del flujo subterráneo de continente y su descarga en el Río Hondo fue evidenciada por lecturas piezométricas desarrolladas por CONAGUA donde la información piezométrica para la región extrema de la zona de estudio es indicada en la Figura 3.3.

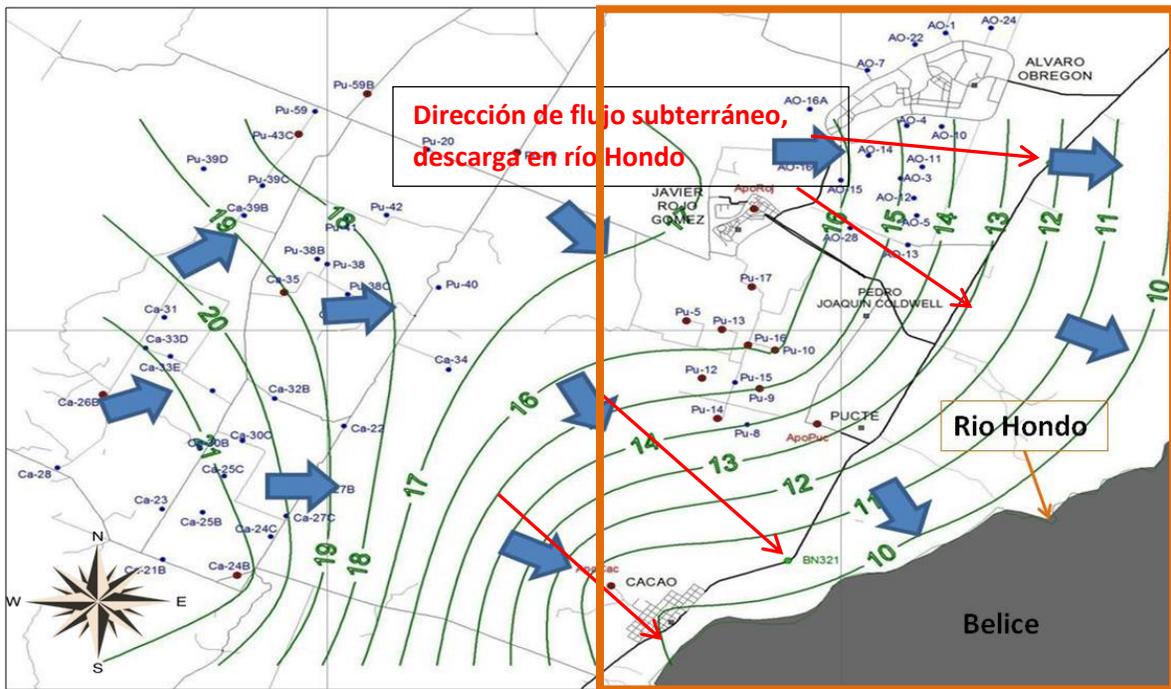


Figura 3. 3 Dirección del flujo que representa el movimiento del agua subterránea de oeste a este donde descarga hacia la zona de río Hondo en la parte extrema de la zona de estudio.

Por lo reportado en el Capítulo II los tres grupos de COP's tienen presencia en la matriz sólida (Tablas 2.10, 2.11 y 2.12) y en la matriz líquida (Tablas 2.16 y 2.17).

En el estudio se compararon los flujos locales propuestos por CONAGUA con la dirección que los COP's señalan como trazadores involuntarios, para lo cual se realizó un comparativo de los COP's en cada matriz (Suelo, Lixiviado y Agua Subterránea) en la Tabla 3.1

Y de la tabla 2.15 se identificó que grupo de compuestos orgánicos se presentaba con mayor frecuencia. Por lo tanto, se tomó la presencia de los organofosforados previamente identificados, que fueron los que se presentaron con mayor incidencia para el agua subterránea (Tabla 3.1).

Tabla 3. 1 Comparativo de contaminantes orgánicos en suelos, lixiviados y agua subterránea.

ORGANO CLORADOS (21)	TIPO	SUE (20)	LIX (12)	AS (5)	ORGANO FOSFORADOS (18)	TIPO	SUE (14)	LIX (14)	AS (10)	PIRETROIDES (2)	TIPO	SUE (1)	LIX (2)	AS (1)
4,4' DDD	Insecticida	X	X		Azinfo-etil	Insecticida	X		X	Cipermetrina Lambda cyaloatrina	Insecticida		X	X
4,4' DDE	Insecticida	X	X		Azinfo-metil	Insecticida	X	X	X		Insecticida	X	X	
Aldrin	Insecticida	X			DDVP (Diclorvos)	Insecticida	X	X						
Alfa BHC	Insecticida	X		X	Dimetoato	Insecticida	X	X	X					
Alfa endosulfan	Insecticida	X			Disulfoton	Insecticida		X						
Beta BHC	Insecticida	X	X	X	Famfur	Insecticida	X	X						
Beta endosulfan	Insecticida	X			Fenclorfos	Insecticida			X					
Clordano	Insecticida	X			Forate	Insecticida	X	X						
Delta BHC	Insecticida	X			Malation, Paration	Insecticida	X	X						
Dieldrin	Insecticida	X	X			Insecticida	X	X						
Endosulfan-Sulfate	Insecticida	X			Paration-etil	Insecticida	X	X	X					
Endrin	Insecticida	X		X	Paration-metil	Insecticida		X	X					
Endrin aldehido	Insecticida	X	X	X	Protiofos	Insecticida			X					
Endrin ketone	Insecticida	X	X		Sulfotep	Insecticida	X	X	X					
Heptacloro	Insecticida	X	X		Tionazine	Insecticida	X	X	X					
Hexacloro benceno	Insecticida		X		Zinofos	Insecticida	X	X	X					
Methoxychlor	Insecticida	X	X		Apaclor (Clorfenvinfos)	Herbicida	X	X						
p,p' DDT	Insecticida	X		X	Butaclor (Acetanilido)	Herbicida	X							
Alaclor	Herbicida	X	X											
Atrazine	Herbicida	X	X											
Simazine	Herbicida	X	X											

3.3. RESULTADOS

La figura 3.4 muestra que los compuestos detectados en agua subterránea son en su mayoría compuestos organofosforados y su desplazamiento es con dirección Oeste (zona de cultivo) a Este (zona de distribución de agua potable).

Sin embargo, se determinó que podía ser referencia al desplazamiento del flujo subterráneo, es decir, tomarlos como trazadores orgánicos involuntarios, en la zona donde no se contaba con la información piezométrica para ver si coincidían con los flujos determinados en la zona de Álvaro Obregón.

Tabla 3. 2 Concentración de organofosforados en pozos de uso agrícola y agua potable.

ORGANOFOSFORADOS		
Sitio	Pozo	[] ppm
PBF	3a	0.8
P5EAO	4a	0.8
P14AO	5a	0.8
PJH	6a	0.4
PXH	1p	0.4
PMA	2p	0.4
PUC	3p	> 0.4
PSXP	4p	0.8
PPA	5p	> 0.4
PAO	6p	> 0.4

Y en base al modelo de flujo de CONAGUA, se observa en la (Figura 3.3) que al aplicar los plaguicidas en la zonas aguas arriba en mayor cantidad, estos se infiltran en forma de residuos y una vez que llegan al agua subterránea son transportados de la zona de mayor carga hidráulica a la zona de menor carga hidráulica, dándonos la pauta para trazar la dirección de flujo (figura 3.4).

Se determinó que la presencia de estos analitos pueden ser considerados como trazadores orgánicos involuntarios y utilizando como comparativo la información

piezométrica existente en la parte sur de la zona de estudio, es posible inferir que los residuales detectados del trazador involuntario (organofosforados) se presentan en los pozos de distribución debido a que el flujo subterráneo sigue el mismo patrón.

Tomando en cuenta que la dirección de flujo determinada por CONAGUA de la parte sur, realizado con mediciones de cambios de nivel en piezómetros, es de suroeste a sureste, se puede inferir que la red piezométrica instalada por CONAGUA es para monitorear un flujo regional, por lo cual el trazador orgánico involuntario (Organofosforados) detectado es indicador del desplazamiento el cual replica la misma dirección del flujo local como se indica en la Figura 3.4.

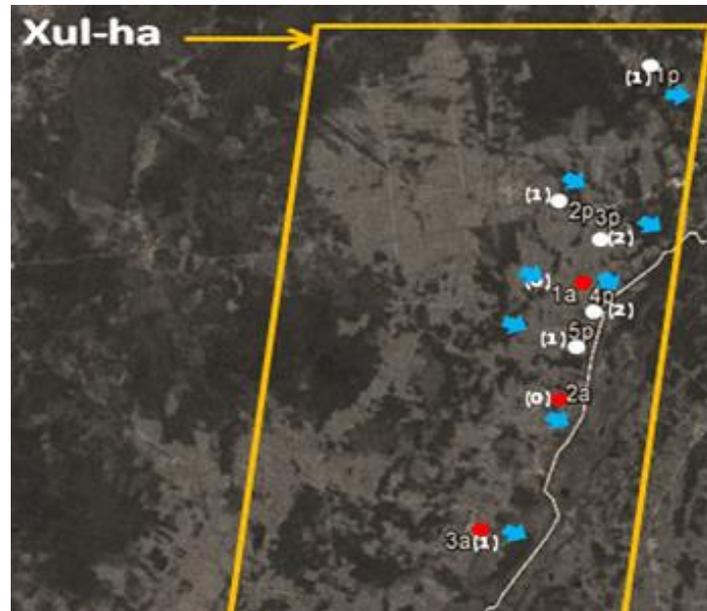
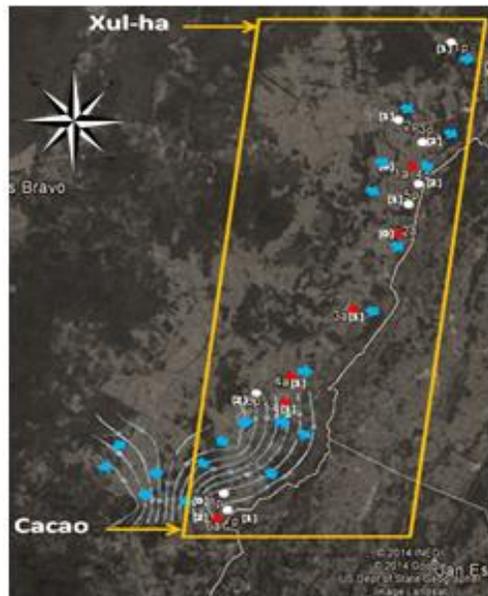


Figura 3.4 a

1p-8p: Pozos agua potable-distribución (blanco)

1a-6a: Pozos uso agrícola (rojo)

(0), (1), (2): Numero de grupos detectados en cada pozo

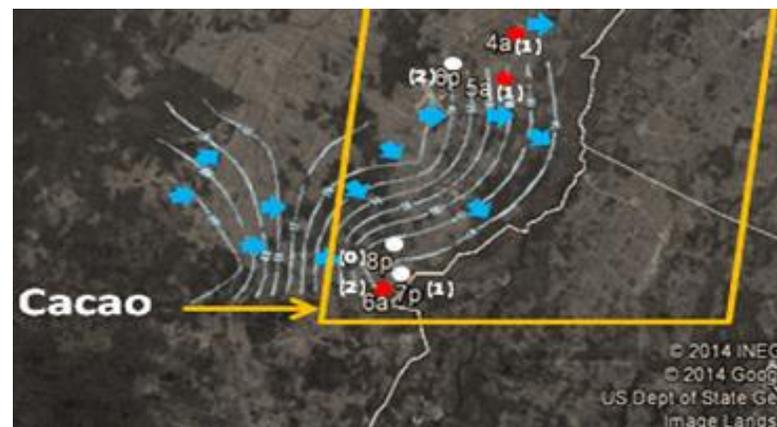


Figura 3.4 b

Figura 3. 4 Mapa de la zona cañera con pozos agrícolas (rojo) y pozos de distribución de agua potable (blanco), donde se observa que se obtuvieron con los trazadores involuntarios (**Figura 3.4 a**) coincide con las señaladas por CONAGUA (**Figura 3.4 b**)

3.4. DISCUSION

La detección de organofosforados permite la evaluación de patrones de flujo debido a que cualquier compuesto químico que arriba a un cuerpo de agua subterráneo es desplazado hacia la dirección de flujo de mayor a menor carga hidráulica, lo cual permite la identificación de estos flujos en condiciones someras. Diferentes trazadores como isotopos estables, radiactivos, gases, colorantes e incluso clorofluorocarbonos pueden ser utilizados para determinar la dirección de flujo (Davis *et al.*, 1980). También se han realizado diversos estudios con trazadores involuntarios, como el de Plumme *et al.* (2004), quienes mediante la identificación de Clorofluorocarbonos (CFC), mejoraron la información de los patrones de flujo en el sistema acuífero del grupo Santa Fe Nuevo México USA. Otro trazador involuntario utilizado para proveer información de la tasa de del movimiento de agua es el nitrato, el cual, ha incrementado su concentración por su uso en la agricultura en zonas áridas (Allison *et al.* 1994).

En 2006, Goody *et al.*, sugieren que el movimiento de las aguas subterráneas se puede dividir en tres regímenes: Régimen 1, donde la zona no saturada es muy profundo y donde predomina un flujo de pistón; Régimen 2 donde la zona no saturada es mucho más delgada y es la mezcla entre el agua subterránea que llevaba tiempo retenida y agua subterránea de recarga reciente; y Régimen 3 donde hay interacción entre aguas subterráneas y agua de río desde mediados de la década de 1950. Además, utilizaron clorofluorocarbonos y hexafluoruro de azufre como trazadores en una zona cárstica en la que el flujo preferencial es a través de las fracturas, estas son importantes especialmente por la facilidad con la que los trazadores son transportados a través de ellas, lo cual es comparable con el transporte de contaminantes en el presente estudio, debido a que las características de los suelos son similares. Y en los casos tanto de medios porosos como de medios fracturados, es recomendable incluir otras herramientas que permitan la verificación de estos resultados.

3.5. CONCLUSION

Se observó que los residuales generados por compuestos orgánicos persistentes, una vez que alcanzan la tabla de agua, se desplazan de la zona de cultivo a los pozos de distribución de agua potable lo cual coincide con la dirección de flujo propuesta por la CONAGUA en el poblado de Álvaro Obregón.

A pesar de no contar con estudios piezométricos, en pozos ubicados en las cercanías de Chetumal, como lo realizado por la CONAGUA, se propone que la presencia de estos contaminantes en pozos de distribución de agua potable, nos indican que su desplazamiento se está presentando (Figura 3.4), pudiendo llegar tanto a Belice como a la bahía de Chetumal debido a la dirección de flujo presente en la zona.

3.6. REFERENCIAS

- Allison, G.B., Gee, G.W. y Tyler, S.W. (1994) Vadose Zone Techniques for estimating Grounwater recharge in Arid and Semiarid Regions. Soil Sci. Soc. Am. 58:6-14
- Antigüedad, I. Morales, T. e Ibarra, V.1988 Aplicación de los trazadores en la investigación hidrogeológica de los acuíferos kársticos. Bilbao. Proyecto de Investigación. UPV/EHU. 82 pp.
- Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de Acuíferos. Revista Latinoamericana de Hidrogeología. No. 4, 85-103.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe R. N. B., Charvet, G., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M y Merediz-Alonso G. (2011). Review: The Yucatan Peninsula karst aquifer, México. Hydrogeology Journal. 18.
- Bautista, F., Aguilar, DY., Batllori, E. (2011). Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Península de Yucatán. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Gobierno de Yucatán. 9-31

- Beddows, P (2002). Where Does the Sewage Go? The Karst Groundwater System of Solidaridad, Quintana Roo," Association for Mexican Cave Studies Activities, No. 25, 2002, pp. 47-52.
- Castany, G. y Margat, J (1977). Dictionnaire français d'hydrogéologie. Paris B.R.G.M. 250 pp.
- CONAGUA, (2009). Establecimiento de una red piezométrica de la zona cañera de Álvaro Obregón, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo. <http://www.conagua.gob.mx/DLQroo07/Noticias/InformeRedPiezometrica.pdf> consultado Julio 2013.
- Custodio, E 1976 Trazadores y técnicas radioisotópicas en hidrología subterránea. Hidrología subterránea. Barcelona. Ed. E. Custodio y M. R. Llamas. Ediciones Omega, Barcelona, Vol.II (12): 1161-1312.
- Custodio, E., Llamas, M.R. (1983) Hidrología Subterránea, Barcelona: Editorial Omega, 2 vol., pp. 1-2350
- Davis, S., Thompson, G., Harold, W y Stiles, G (1980). Groundwater tracers Vol. 18 No. 1 Grounwater 14-23.
- Goody, D.C., Darling, W.G., Abesser, C y Lapworth, D.J (2006) Using chlorofluorocarbons (CFCs) and sulphurhexafluoride (SF6) to characterize groundwater movement and residence time in a lowland Chalk catchment. Journal of Hydrology 330, 44–52
- INIFAP (2012-2013). Informe de la segunda etapa del proyecto: Determinación de agroquímicos lixiviados en la zona cañera de Quintana Roo. 61.
- Ramos. 2007, Factores que efectúan la vulnerabilidad de Sistemas Acuíferos de Salamanca Guanajuato. pp. 23-75
- Foster, S.; M. Ventura y R. Hirata. 1987, Contaminación de las Aguas subterráneas, un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable. En el marco de las Terceras Jornadas de Actualización en Hidrología Subterránea. Huerta Grande, Córdoba. 1994. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú

Freeze R.A. and J.A. Cherry. Groundwater. Ed. Prentice-Hall, Englewood, Cliffs, Nueva York, pp. 604, 1979.

Mazari Hiriart, M. (2005). Impactos Ambientales: Acuíferos. Instituto Nacional de Ecología. Artículo de Internet. Consultado en 2013. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/35/impactos.html>

Plummer, L.N., Bexfield, L.M., Anderholm, S.K., Sanford, W.E. y Busenberg, E (2004). Hydrochemical tracers in the middle Rio Grande Basin, USA: 1. Conceptualization of groundwater flow Hydrogeology Journal 12 : 359-388

National Academy Press. (1993). Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty. pp. 204

CAPITULO IV

4.1. CONCLUSIONES

De la precipitación registrada en los periodos evaluados; el mes que pudo generar más infiltración de lixiviados fue el de octubre del 2012, lo cual indica que el transporte de estos compuestos al agua subterránea, es a través de lixiviados generados por el agua de lluvia especialmente en los periodos de mayor precipitación. Los cuales son infiltrados desplazándose gravitacionalmente por la zona vadosa hasta llegar a la tabla de agua, quedando retenidos algunos de ellos en los suelos.

En el caso de los lixiviados, el grupo con mayor presencia fue el de los organofosforados, disminuyendo la presencia de analitos para organoclorados y piretroides. Por lo señalado en el párrafo anterior estos compuestos son retenidos por la matriz durante la época de menor generación de lixiviados (estiaje) ya que al disminuir la generación de lixiviados no se da pauta al transporte entre sedimentos.

De los tipos de suelo identificados, la mayor presencia de COP's se dio en Gleysol, posteriormente en Luvisol seguido del suelo Leptosol y presentando la menor retención de compuestos orgánicos encontramos a los Vertisol en los que el grupo de organoclorados fue el que más presencia tuvo en esta matriz.

Y en cuanto a la profundidad se observó que los suelos Gleysol son los que retienen más en superficie (0-15 cm), para Luvisol y Leptosol se presenta mayor retención en profundidades de entre (31-45 cm) y finalmente los Vertisol presentan retención entre (0-45 cm).

Por lo tanto, se sugiere que, la llegada de estos compuestos al sistema de agua subterránea, es a través de lixiviados generados por el agua de lluvia o por riego, los cuales son infiltrados desplazándose gravitacionalmente por la zona vadosa hasta llegar a la tabla de agua, quedando retenidos algunos de ellos en los suelos.

Sin embargo, las implicaciones que tienen al llegar al agua subterránea, sin importar su concentración, es que son transportados en la dirección de flujo, por lo tanto les permitirá llegar a pozos de distribución de agua potable en las comunidades aguas abajo, provocando problemas de salud, así como llegar a afectar ecosistemas acuáticos.

Los COP's identificados permitieron realizar un comparativo en las diferentes matrices (Suelo, Lixiviado y Agua Subterránea) siendo los analitos de ñgrupo de organofosforados los que se presentaban en todas ellas.

Se determinó que la presencia de estos analitos pueden ser considerados como trazadores orgánicos involuntarios, y utilizando como comparativo la información piezométrica existente en la parte sur de la zona de estudio, es posible inferir que los residuales detectados del trazador involuntario (organofosforado) se presentan en los pozos de distribución debido a que el flujo subterráneo sigue el mismo patrón.

Tomando en cuenta que el flujo de la parte sur es de suroeste a sureste, el trazador orgánico involuntario es indicador de que el desplazamiento del trazador obedece a un flujo local.

Finalmente, de los resultados de esta evaluación es posible decir que la fuente de origen de los COP's en los lixiviados, en el suelo y en el agua subterránea solo pueden tener un origen antropogénico que en este caso el desplazamiento de flujo local permite identificar a la zona agrícola como su fuente de origen.