



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**METALES Y ARSÉNICO EN LA ZONA
METROPOLITANA DE MÉRIDA (ZMM): USO DE UN
SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)
PARA EVALUACIÓN DE LA PRESIÓN AMBIENTAL
(RIESGO POTENCIAL)**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN MANEJO
SUSTENTABLE DE ZONAS COSTERAS**

P R E S E N T A:

GALLEGOS JAIMES LUIS ÁNGEL



**DIRECTOR DE TESIS: Dra. FLOR ELISA DEL
ROSARIO ÁRCEGA CABRERA**

México, Yuc., Noviembre de 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Datos del Jurado

1. Datos del alumno

Apellido paterno
Apellido materno
Nombre(s)
Teléfono
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Carrera
Número de cuenta

1. Datos del alumno

Gallegos
Jaimes
Luis Ángel
5549251513
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Manejo Sustentable de Zonas Costeras
306172975

2. Datos del tutor

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Dra.
Flor Elisa del Rosario
Árcega
Cabrera

3. Datos del sinodal 1

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Dra.
Elsa
Noreña
Barroso

4. Datos del sinodal 2

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Dra.
Gabriela
Fuentes
Rodríguez

5. Datos del sinodal 3

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Dra.
Laura Elena
Vidal
Hernández

6. Datos del sinodal 4

Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Dr.
David
Romero

7. Datos del trabajo escrito.

Título
Subtítulo
Número de páginas
Año

METALES Y ARSÉNICO EN LA ZONA METROPOLITANA
DE MÉRIDA (ZMM): USO DE UN SISTEMA DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) PARA EVALUACIÓN
DE LA PRESIÓN AMBIENTAL (RIESGO POTENCIAL)
127
2019

*Dedicada para Concepción Jaimes García,
Sergio Enrique Gallegos Jaimes y Erika Xanath
Rojas Jaimes...*

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a todo el personal docente y administrativo de la Unidad Académica Sisal, por su importante aporte de conocimiento para mi desarrollo académico y formación profesional.

Abrazos y agradecimientos a mi tutora de tesis Dra. Flor Elisa del Rosario Árcega Cabrera, a mis sinodales Dra. Gabriela Fuentes Rodríguez, Dra. Elsa Noreña Barroso, Dra. Laura Elena Vidal Hernández y Dr. David Romero, a mi tutora de carrera Dra. Claudia Verónica Durruty Lagunes, a mi asesor de servicio social Dr. Bernardo Figueroa Espinoza y a mi asesor de laboratorio I.Q. Ismael Oseguera Vargas, por su paciencia, ánimos, consejos, amistad y regaños.

A Sisal, a su gente y a los amigos, especialmente a Gabriela Caamal Cahuich, Geovany Granados y familia, a Salas Fernández Olga Angélica, a Luciano Poot y familia, a David Hernández Coob y familia, a David Granados y familia, a Fausto León Novelo y familia, a Valeria Alejandra Tamayo y Genny del Carmen Carballo, a Edith Flores y María Cristina González Martínez, a los amigos del LIPC, a Ana Eshai Sarabia García, a Pedro Eduardo Reyes Cabañas, y más.....

Índice general

Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
Índice de abreviaturas	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PENÍNSULA DE YUCATÁN	4
1.2. MOVILIDAD DE CONTAMINANTES	7
1.3. CLASIFICACIÓN DE ELEMENTOS	10
1.3.1. ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS	11
1.4. PRESIÓN AMBIENTAL	12
2. ANTECEDENTES	13
2.1. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	14
2.2. LINEAMIENTOS DE CALIDAD	17
2.2.1. LEGISLACIÓN MEXICANA DE CONTAMINACIÓN	19
2.2.2. MEDIDAS DE MANEJO	21
2.2.3. MEDIDAS DE MANEJO EN YUCATÁN	22
2.3. CONTAMINACIÓN EN YUCATÁN	23
2.3.1. COMPOSICIÓN FRECUENTE DE LOS TC'S	24
2.3.2. CONTAMINACIÓN EN EL SUELO Y ACUÍFERO	25
2.3.3. CONCENTRACIÓN DE EPT	27
3. HIPÓTESIS	29
4. JUSTIFICACIÓN	31
5. OBJETIVOS	33

5.1. OBJETIVO GENERAL	33
5.2. OBJETIVOS PARTICULARES	33
6. ÁREA DE ESTUDIO	35
6.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZMM	35
6.1.1. HIDROGRAFÍA	38
6.1.2. CLIMA	39
6.1.3. EDAFOLOGÍA y GEOLOGÍA	41
6.1.4. RECURSOS NATURALES EN LA ZMM	45
7. METODOLOGÍA	49
7.1. ETAPA 1: LOCALIZACIÓN DE TC'S	49
7.2. ETAPA 2: PRE-TRATAMIENTO DE MUESTRAS	50
7.2.1. LIMPIEZA DE MATERIAL	53
7.2.2. MÉTODO DE GRANULOMETRÍA	53
7.2.3. CUANTIFICACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA	54
7.2.4. DIGESTIÓN ÁCIDA ASISTIDA CON HORNO DE MICRO-ONDAS	55
7.2.5. DETERMINACIÓN DE EPT POR THGA AAS	57
7.3. ETAPA 3: PRESIÓN AMBIENTAL POR EPT	58
7.3.1. VULNERABILIDAD INTRÍNSECA	58
7.3.2. CLASIFICACIÓN CATEGÓRICA DE LOS EPT Y LOS TC'S	63
7.3.3. PRESIÓN AMBIENTAL (RIESGO POTENCIAL)	64
7.4. ETAPA 4: GENERACIÓN DE MAPAS	65
8. RESULTADOS	67
8.1. LOCALIZACIÓN DE LOS TC's EN LA ZMM	67
8.2. EVALUACIÓN DE LOS EPT Y LOS TC'S	69
8.2.1. LINEAMIENTOS NORMATIVOS DE LOS EPT	69
8.2.2. ANÁLISIS DE NORMALIDAD	70
8.2.3. ANÁLISIS DESCRIPTIVO	72
8.2.4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	74
8.2.5. ANÁLISIS DE FACTORES	75
8.2.6. ANÁLISIS CLUSTER	76
8.2.7. ANÁLISIS DEL FACTOR 1	77
8.2.8. ANÁLISIS DEL FACTOR 2	79
8.2.9. ANÁLISIS DEL FACTOR 3	81
8.3. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD	82

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	III
8.4. CLASIFICACIÓN CATEGÓRICA DE LOS EPT Y LOS TC'S	84
8.5. ANÁLISIS DE LA PRESIÓN AMBIENTAL	86
9. DISCUSIÓN	87
10. RECOMENDACIONES	93
11. CONCLUSIONES	99
Anexos	111
Anexos	111
Elementos Potencialmente Tóxicos	113
Pasos para lectura de THGAA	125
Tecnología de remediación de suelos contaminados	127

Índice de figuras

1.1. Península de Yucatán.	4
1.2. La movilidad y solubilidad de algunos EPT	8
6.3. La Zona Metropolitana de Mérida	36
6.4. Clasificación de rellenos sanitarios en Yucatán	37
6.5. Dirección del flujo y profundidad del acuífero subterráneo de la PY	38
6.6. El agua en la estructura vertical	40
6.7. Número de meses húmedos.	41
6.8. Clasificación edafológica en la ZMM	43
6.9. Unidades cronoestratigráficas en la ZMM y Estado de Yucatán.	44
6.10. Clasificación del uso y tipo de suelo en la ZMM.	47
7.11. Diagrama de flujo de los procedimientos seguido en el laboratorio	52
7.12. Herramientas utilizadas para la cuantificación y clasificación de los suelos	53
7.13. Dispositivos utilizados para la determinación ácida EPT.	55
7.14. Rotor y tubos de centrifuga empleados para el análisis de las muestras	56
7.15. Espectrómetro de absorción atómica Aanalyst 800	57
7.16. Ejemplo del diagrama de flujo para la generación de mapas temáticos	66
8.17. Localización de los TC's analizados y detectados en la ZMM	68
8.18. Variables normales (mg/kg)	71
8.19. Variables no normales (mg/kg)	71
8.20. Proporción de materia orgánica y grano fino (limos y arcillas)	73
8.21. PCA de EPT significativos	74
8.22. Proyección 2D de los TC's empleando las variables significativas	74
8.23. Análisis de agrupación de los TC's	76
8.24. Análisis de agrupación del grupo 2.	77
8.25. PCA del grupo 2 y EPT asociados al factor 1	78
8.26. Proyección 2D de los TC's del grupo 2 y EPT asociados al factor 1	78
8.27. Análisis de agrupación del grupo 3	79

8.28. PCA del grupo 3 y EPT asociados al factor 2	80
8.29. Proyección 2D de los TC's del grupo 3 y variables asociadas al factor 2	80
8.30. Análisis de agrupación del grupo 4.	81
8.31. PCA del grupo 4 y EPT asociados al factor 3	82
8.32. Proyección 2D de los TC's del grupo 4 y EPT asociados al factor 3. .	82
8.33. Clasificación de la vulnerabilidad intrínseca en la ZMM	83
8.34. Proporción de TC's que rebasan la normatividad	85
8.35. Análisis de la presión ambiental	86
10.36 Manejo de los TC's por vulnerabilidad intrínseca	94
10.37 Manejo de los TC's por los criterios de peligro	95
10.38 Manejo de los TC's por los criterios de riesgo potencial	96

Índice de tablas

1.1. Clasificación por asociación en el medio	10
1.2. Clasificación por toxicidad	11
2.3. Estimación de EPT en el ambiente	17
2.4. Principales óxidos en Yucatán	17
2.5. Lineamientos normativos de EPT en suelos, parte 1.	18
2.6. Lineamientos normativos de EPT en suelos, parte 2.	19
7.7. Condiciones para el proceso de digestión ácida en el horno de microondas	56
7.8. Asignación de índices “r” y pesos “w” mediante el método <i>DRASTIC-</i> <i>mod</i>	62
7.9. Clasificación del riesgo potencial.	64
8.10. Concentración de EPT y variables geoquímicas en los TC’s.	67
8.11. Lineamientos normativos utilizados como índices	69
8.12. Análisis de normalidad	70
8.13. Análisis descriptivo de las variables normales.	72
8.14. Análisis descriptivo de las variables no normales.	72
8.15. Concentración de variables geoquímicas en los TC’s de la ZMM.	73
8.16. Análisis de factores de las variables significativas	75
8.17. Influencia de los factores en los TC’s.	75
8.18. Clasificación de la vulnerabilidad intrínseca	82
8.19. Número de EPT que superan los LMP en cada TC’s	84
10.20. Ventajas y desventajas en el tratamiento de EPT	97
21. Arsénico (As)	114
22. Aluminio (Al)	115
23. Bario (Ba)	116
24. Cadmio (Cd)	117
25. Cobre (Cu)	118
26. Cromo (Cr)	119
27. Hierro (Fe)	120

28.	Mercurio (Hg)	121
29.	Plomo (Pb)	122
30.	Estaño (Sn)	123
31.	Ejemplo de técnicas y tecnologías	128

Índice de abreviaturas

- CETENAL** - Comisión de Estudios del Territorio Nacional
- CONABIO** - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
- CONAGUA** - Comisión Nacional del Agua
- CPEUM** - Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
- CPEY** - Constitución Política del Estado de Yucatán
- DRSA** - Dirección de Restauración y Saneamiento Ambiental
- EDL** - Lámpara con Adaptador Electrónico (Electrodeless Discharge Lamp)
- EPA** - Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency)
- EPT** - Elementos Potencialmente Tóxicos
- FAAS** - Espectrometría de Absorción Atómica con Flama (Flame Atomic Absorption Spectrometry)
- GFAAS** - Espectrometría de Absorción Atómica Acoplada a Horno de Grafito (Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry)
- GF** - Grano Fino
- HGAAS** - Espectrometría de Absorción Atómica por Generación de Hidruros y Vapor Frío (Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry)
- INEGI** - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
- JAPAY** - Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán
- LGEEPA** - Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
- LPGIR** - Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

- LGS** - Ley General de Salud
- LMP** - Límites máximos permisibles
- MIR** - Manejo Integral de Residuos (MIR)
- MO** - Materia Orgánica
- M's** - Metales
- NIST** - Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (National Institute of Standards and Technology)
- OMS** - Organización Mundial de la Salud
- PEDY** - Plan Estatal de Desarrollo Yucatán
- PM** - Plan de Manejo
- PMIRS** - Programa de Manejo Integral de Residuos Sólidos
- PPGIR** - Programas para la Prevención y Gestión Integral de Residuos
- PROFEPA** - Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
- PY** - Península de Yucatán
- REPDA** - Registro Público de Derechos de Agua
- RME** - Residuos de Manejo Especial
- RP** - Residuos Peligrosos
- RSU** - Residuos Sólidos Urbanos
- SDS** - Secretaría de Desarrollo Sustentable
- SEMARNAT** - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- SGY** - Secretaría de Gobernación de Yucatán
- SIG** - Sistema de Información geográfica
- SMA** - Sistemas de Manejo Ambiental
- SPCM** - Secretaria de Protección Civil Municipal
- TC's** - Tiraderos Clandestinos
- USGS** - Servicio Geológico de Estados Unidos (United States Geological Survey)
- ZMM** - Zona Metropolitana de Mérida

1. INTRODUCCIÓN

De manera natural el medio que habitamos ha estado sometido a cambios dinámicos y procesos de alteración o deterioro que se logran medir a escala geológica principalmente. Sin embargo, la existencia humana ha propiciado un acelerado deterioro del medio a través de actividades no sostenibles, en el uso excesivo y aprovechamiento de recursos naturales y su contaminación.

El aprovechamiento de los recursos naturales en actividades como la agricultura, pesca, ganadería, minería, actividad forestal, caza, entre otras, ha sido de suma importancia para el desarrollo y crecimiento de grandes civilizaciones (Aguilar, 2010; Valcarce y Rodríguez, 2011). Por eso, el uso y aprovechamiento adecuado de éstos, es fundamental para un crecimiento equilibrado en aspectos socio-económicos, ecológicos, productivos, tecnológicos, institucionales, políticos, entre otros (Bahillo, 2005).

En la actualidad la idea de abundancia de recursos que regularmente es traducida en un elevado nivel de vida para gran parte de los pueblos del mundo “en desarrollo”, ha resultado una falacia, debido a que los impactos generados por su manejo inadecuado, se ven subestimados por las acciones, conflictos e intereses de los diferentes poderes (ejecutivo, legislativo y judicial), en sus diferentes niveles (federal, estatal y local), el tipo de cultura, el estilo de vida y los patrones de producción y consumo de la mayoría de la población (Sepúlveda y Edwards, 1996; FUNDAR, 2002).

Los gobiernos enfocan sus estrategias gubernamentales en el cuidado de los recursos con la visión correctiva de los daños ambientales generados y no con acciones orientadas por estrategias que permitan prevenirlos, lo que significa que no se encaminan a evitar los daños ambientales, sino, en asegurar que quienes los provocan realicen medidas de mitigación o compensación, lo que genera sustancialmente peores condiciones de vida, empobrecimiento, marginación, desigualdad, aumento en el deterioro del entorno y la cancelación de alternativas de desarrollo sostenibles (Sepúlveda y Edwards, 1996; FUNDAR, 2002; SEMARNAT, 2012; Castro et al., 2015).

Además, los avances tecnológicos y el desarrollo o crecimiento de nuevas actividades industriales como la eléctrica, petrolera, cementera, automotriz, aeronáutica, farmacéutica y otras, que involucran frecuentemente el manejo de materiales peligrosos o tóxicos, han potencializado el deterioro progresivo del medio acelerando la liberación de contaminantes (CENAPRED, 2001; Garbisu et al., 2002; Volke y Velasco, 2002; Galán y Romero, 2008).

Así mismo, existe un aumento de la contaminación por la generación de residuos sólidos y líquidos (urbanos, agrícolas o industriales) a causa del crecimiento acelerado de la población, la concentración en áreas urbanas, los cambios de hábitos de consumo, el uso generalizado de envases, empaques y materiales desechables, la escasa educación ambiental y participación ciudadana, que inicia cuando el propietario o poseedor identifica la materia prima como un desecho sin valor adicional y lo abandona sin un manejo adecuado o lo transfiere para su tratamiento o disposición final (López, 1989; CENAPRED, 2001; Jaramillo et al., 2002; Caballero, 2011).

El problema de la contaminación y la escasa educación ambiental han adquirido tal magnitud que diversos sectores de la sociedad (universidades, centros de investigación, consultorías y otros) buscan identificar los riesgos actuales y potenciales generados en el suelo, aire y cuerpos de agua, implementando estudios estratégicos enfocados en caracterizar, evaluar y remediar los sitios impactados (Jiménez, 2001; Galán y Romero, 2008). Asimismo, en generar políticas de desarrollo enfocadas en mantener la capacidad económica, bienes y servicios que otorgan los ecosistemas (Durán, 2013).

La contaminación impone a los municipios rurales, urbanos y aún más a los municipios costeros un verdadero reto debido al impacto que puede generar. Las zonas costeras se han caracterizado por ser altamente productivas y complejas, ecológicamente diversas, pero ambientalmente frágiles y con numerosas fronteras que las hacen susceptibles a los impactos por contaminación (CIMARES, 2011). La contaminación se puede considerar una externalidad social que toda actividad económica genera y debido a que nadie asume los costos por la contaminación, todos la sufren (Aguilar, 2010).

La situación de degradación medioambiental ha planteado la necesidad de realizar estudios que describan el grado de vulnerabilidad, los peligros (amenazas) y el riesgo que enfrentan los ecosistemas costeros ante agentes contaminantes naturales o antropogénicos, mediante la identificación de límites (umbrales) considerados tolerables y la elaboración de estrategias interdisciplinarias que se enfoquen en la solución y mitigación (Cervantes y Sánchez, 1987; CENAPRED, 2001; CIMARES, 2011).

En la actualidad, los esfuerzos de conservación de recursos naturales se enfocan primordialmente a la preservación de cuerpos agua (acuíferos, lagos, ríos y otros) y sistemas edafológicos (agrícola, doméstico, industrial), debido a que a lo largo del tiempo su aprovechamiento ha determinado el desarrollo de las actividades humanas y gracias a sus propiedades físicas, químicas y biológicas han facilitado el desarrollo de la vida (Bautista et al., 2004; Brown, 2004; Cánepa et al., 2004; Aguilar, 2010; Bautista, 2011).

En la búsqueda del manejo óptimo de los acuíferos y suelos, se han desarrollado diversos enfoques metodológicos para identificar qué tan vulnerables llegan a ser ante agentes externos naturales o antropogénicos; desarrollándose métodos basados en la utilización de índices sintéticos de información espacial o superposición, modelos de simulación basados en procesos, como el transporte de lixiviados a través de la zona vadosa, los que utilizan herramientas estadísticas tales como el análisis multivariante y métodos híbridos (NCR, 1993; Árcega-Cabrera y Romero-Bernical, 2011; Sancha-Fernández y Espinoza, 2002; Pérez-Ceballos et al., 2008; Aguilar-Duarte et al., 2013).

Para determinar el grado de vulnerabilidad intrínseca (natural) de los acuíferos, se identifican métodos como el EKV, AVI, GOD, EPIK, DRASTIC, SINTACS, KARS-TIC, COPK, PI, DUAL, ESLOVENO y KAVI. Siendo el método DRASTIC, desarrollado por Aller et al., (1987) para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) el método más utilizado y empleado en éste estudio.

El estudio de investigación de: Metales y Arsénico en la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM): Uso de un sistema de información geográfica (SIG) para evaluación de la presión ambiental (riesgo potencial), tiene la finalidad de aportar información que favorezca el desarrollo, cuidado y manejo adecuado de los recursos (suelo y agua) en el Estado costero de Yucatán, específicamente en la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM) y el acuífero subyacente.

La investigación se enfoca en el análisis de 12 elementos potencialmente tóxicos (EPT) de interés (Aluminio *Al*, Arsénico *As*, Bario *Ba*, Cadmio *Cd*, Cromo *Cr*, Cobre *Cu*, Hierro *Fe*, Mercurio *Hg*, Plomo *Pb*, Estaño *Sn*, Vanadio *V* y Zinc *Zn*), dos variables geoquímicas (materia orgánica *MO* y grano fino *GF*) que influyen en la movilidad de los elementos en suelos y lixiviados en 18 tiraderos clandestinos (TC's) de la ZMM y el análisis de 8 variables ambientales como características intrínsecas de la zona. La finalidad es localizar zonas con mayor vulnerabilidad y TC's que representen como consecuencia un peligro y riesgo potencial para el acuífero subyacente de la ZMM y la zona costera adyacente de mayor uso turístico en el Estado.

Como información estratégica, la investigación va dirigida al público en general, pero principalmente al círculo académico y tomadores de decisión responsables de las áreas funcionales de salud, seguridad, equidad y en mayor medida, de las políticas públicas de difusión y de manejo sostenible de los recursos naturales en el Estado de Yucatán, especialmente a instituciones como la Secretaria de Desarrollo Sustentable (SDS), la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) o la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).

1.1. PENÍNSULA DE YUCATÁN

La planicie costera del Golfo de México se denomina “Plataforma Calcárea de Yucatán” (**Figura 1.1**) (Jiménez et al., 2005) y está constituida por una secuencia de sedimentos calcáreos de origen marino del Terciario Reciente (Butterlin y Bonet, 1960; Bonet y Butterlin, 1962 en Durán y Méndez, 2010). Los estratos casi horizontales de calizas masivas recrystalizadas (primeros 220 metros de profundidad) prácticamente permeables presentes en la zona favorecen la rápida infiltración de agua en periodos de lluvia que disuelve las rocas y forma el relieve denominado karst o cárstico (grutas, cavernas o sumideros) (CNA, 1997 en Durán y Méndez, 2010).

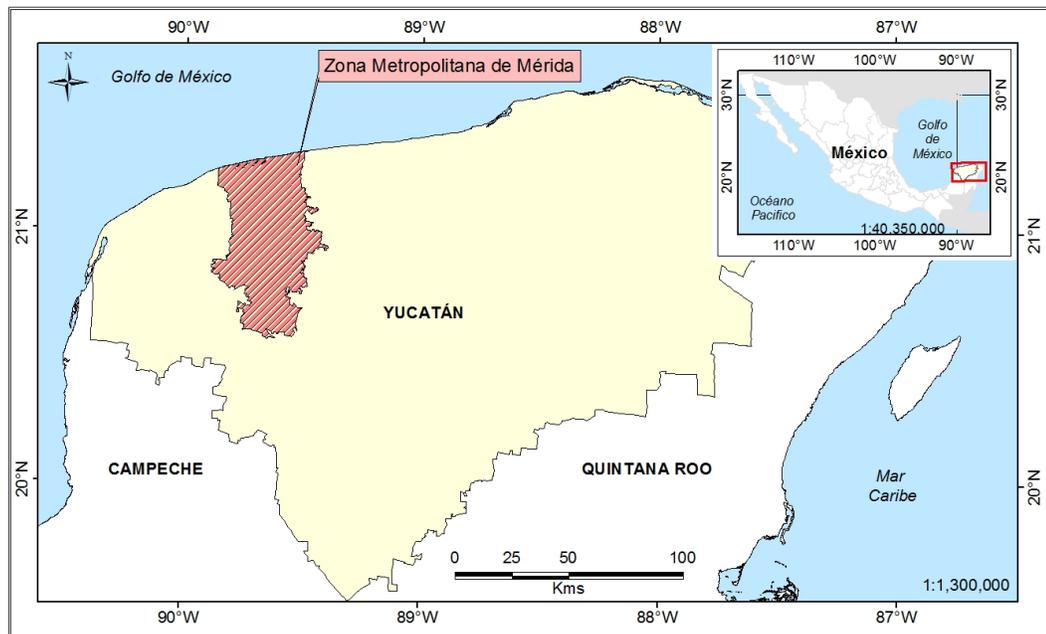


Figura 1.1: Península de Yucatán.

Debido a la limitada concentración de margas y arcillas (suelo) del Terciario Superior y la elevada permeabilidad en la plataforma, el acuífero viene siendo el único cuerpo de agua interior localizado en la península (Pacheco-Ávila et al., 2004), actuando como sitio de reserva de agua dulce y principal fuente de abastecimiento para el desarrollo de las actividades humanas en la zona (Aguilar-Duarte et al., 2013).

Las grandes extensiones de zonas de carstificación, fracturas y canales de disolución, la escasa presencia de suelos y grandes volúmenes de precipitación hacen que el acuífero sea vulnerable a la infiltración y arrastre de contaminantes (Cabrera-Sansores et al., 2002; Cuevas et al., 2002; González y Rodríguez, 2006), llegando a ser la contaminación un grave problema ambiental que difícilmente es remediable, ya que una vez que esto ha ocurrido, la escala y características del sistema hacen que técnicamente y financieramente sea extremadamente complejo implementar planes de restauración, debido a su inaccesibilidad y dinámica (Alcocer et al., 1999; Pérez-Ceballos y Pacheco-Ávila, 2004; Árcega-Cabrera y Romero-Bernical, 2011).

Dentro de las problemáticas que conllevan a que el acuífero y suelos se contaminen, se encuentra la gran desinformación, los usos y costumbres y la deficiencia en servicios y manejo de los residuos generados en la ZMM y en general en la Península de Yucatán (PY) (Pacheco-Ávila et al., 2004; González y Rodríguez, 2006).

El problema de la contaminación por residuos sólidos urbanos (RSU) en la PY se agrava debido a la debilidad institucional, el mantenimiento de tarifas bajas de colecta de residuos, la poca educación sanitaria y escasa participación ciudadana que genera la creación de tiraderos al aire libre de forma clandestina (Volke y Velasco, 2002; INECC y SEMARNAT, 2012), mientras que los tiraderos oficiales a veces no muestran una adecuada captación y manejo apropiado de los desechos sólidos, gases (metano, etano, propano, fosfina, ácido sulfhídrico, nitrógeno y óxidos nitrosos, bióxido de carbono, entre otros) y los lixiviados formados (González y Rodríguez, 2006), lo que puede comprometer la salud pública aumentando la contaminación de los recursos naturales y el ambiente y deteriorando la calidad de vida de la población (Trejo, 1996; Jaramillo et al., 2002; Bernache, 2006).

Se puede identificar un tiradero clandestino (TC) o botadero como una zona de abandono de residuos sólidos sin ningún tipo de control sanitario, separación, ni tratamiento alguno, que funciona sin criterios técnicos en zonas de recarga de cuerpos de agua, drenajes naturales y demás (López, 1989), logrando contaminar el medio y provocando su deterioro por la formación de gases, líquidos lixiviados, quemados y humos, polvo y olores nauseabundos, además de fungir como nicho o hábitat de fauna nociva transmisora de múltiples enfermedades (GEM-SE, 2002b, Rodríguez et al., 2006 y SEMARNAT, 2009 en Caballero, 2011).

Los TC's presentes en la ZMM y en general en la PY carecen de particularidades como: una adecuada planificación en su construcción, estudios geohidrológicos, topográficos y físicos del sitio, una adecuada captación de lixiviados, chimeneas de liberación de gases producto de la descomposición, manejo adecuado de los residuos, control de fauna nociva, entre otras (SEMARNAT, 2003; Caballero, 2011), haciéndolos más susceptible a factores físicos y químicos que influyen directamente en la degradación de los materiales que se localizan en cada TC y la posterior liberación al medio de los elementos nocivos que contienen (Flower et. al., 1978 en López, 1989).

Los impactos ambientales de los TC's están en su mayoría relacionados con la migración de contaminantes, ya sea en forma de gas, polvos o principalmente como lixiviados (González y Rodríguez, 2006). Los impactos ambientales se ven reflejados principalmente en el suelo, aire y agua, debido a su relación con la salud pública ambiental cuando se generan enfermedades (Aguilar-Duarte et al., 2013).

Dentro de las variables que determinarán el grado de afectación en los sistemas por la formación de lixiviados se presenta el grado de humedad inicial de la basura, la precipitación pluvial, humedad atmosférica, temperatura, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración, la capacidad de retención de humedad del terreno y otras (Mendez et al., 2002; González y Rodríguez, 2006; Nájera et al., 2009).

El grado de afectación *in situ* o *ex situ* en zonas impactadas por la contaminación reside en factores físicos y químicos de acuerdo con el grado de volatilización del contaminante, el factor de la erosión, el grado de disolución, la afinidad de ser bioasimilables por organismos cuando primordialmente están solubles y por estar en movimiento como lixiviado (contaminantes particulados, películas líquidas, contaminantes absorbidos, contaminantes disueltos en fase líquida intersticial o en fases sólidas como polvos) (Galán y Romero, 2008; Aguilar-Duarte et al., 2013).

El lixiviado es un compuesto tóxico producto de la descomposición orgánica y química de residuos sólidos presentes en la basura (López, 1989). Proviene de lodos y biosólidos, el cual es formado por reacción o percolación y contiene contaminantes disueltos o en suspensión que son transportado por agua a los horizontes más profundos del suelo (SEMARNAT, 2003). Es un fluido anóxico, ácido, rico en ácidos orgánicos, nitrógeno amoniacal, sales, iones sulfatos y con alta concentración de iones metálicos comunes como: Al, Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Pb y Zn (Mujica et al., 2003). El lixiviado presenta un olor característico, difícil de confundir y ser olvidado (Morales, 2007; Galán y Romero, 2008).

1.2. MOVILIDAD DE CONTAMINANTES

En las zonas vulnerables o potencialmente propensas a contaminación la movilidad de los tóxicos juega un papel clave para la identificación de los impactos que pueden generarse. Los contaminantes llegan a reaccionar de distinta forma alterando el medio cuando están en forma disuelta, en forma coloidal, en estado gaseoso, adheridos a materiales en suspensión como la MO, dentro de algún organismo o bien depositados en sedimentos en forma particulada ya sea como carbonatos, sulfatos, fosfatos, sulfuros (relativamente oxidable y solubilizable) o silicatos (prácticamente resistente en todos los medios) (**Figura 1.2**) (González-Fierro et al., 1995; Galán y Romero, 2008; Hernández, 2012).

La alteración en los ecosistemas se debe a daños negativos que causan los contaminantes, principalmente en los organismos, ya que pueden ser afectados cuando acumulan concentraciones mayores que el medio donde habitan (bioconcentración) y cuando incrementan su concentración interna de algún contaminante respecto al nivel trófico (bioacumulación), llegando a causar efectos negativos (crónicos o agudos) que pueden provocar la muerte o en otros casos desarrollar una serie de problemas fisiológicos y metabólicos como: cambios morfológicos en los tejidos, supresión del crecimiento y desarrollo, cambios en la actividad enzimática, trastornos del comportamiento y cambios en la reproducción, entre otros, basados en dosis letales o subletales dependiendo directamente del tiempo y medio de exposición (Duruibe et al., 2007; Martí, 2007; Galán y Romero, 2008; Mann et al., 2011; Zúñiga-Ontiveros, 2012; Aguilar-Duarte et al., 2013).

PARÁMETROS GEOEDÁFICOS

La peligrosidad de los contaminantes está determinada por su concentración, disponibilidad y movilidad, dependiendo directamente de su especiación (operacional, química y funcional en el caso de los metales), tiempo de exposición y de diversos parámetros geoedáficos que favorecen o afectan la movilidad de los contaminantes hacia suelos, cuerpos de agua, aire, plantas y otros organismos vulnerables (Galán y Romero, 2008; Hernández, 2012; Mann et al., 2011).

La toxicidad del agente contaminante no solo va a depender de sí mismo, sino que dependerá directamente de las características, cantidad y tipo de coloides del suelo (MO, arcillas y óxidos) donde se encuentre (Cattani et al., 2006 en Fernández, 2011). La sensibilidad de los suelos a la agresión de los agentes contaminantes es influenciada directamente por parámetros geoedáficos como (Förstner, 1987; Galán y Romero, 2008; Hernández, 2012):

pH.

Es un parámetro esencial para definir la movilidad de los elementos contaminantes, actuando como factor que promueve la dilución y precipitación de los elementos, por ejemplo, la mayoría de los elementos tienden a presentar mayor movilidad o biodisponibilidad a un pH ácido (**Figura 1.2a**), excepto As, Cd, Mo, V, Se y Cr, que son más móviles a pH alcalino (Galán y Romero, 2008; Fernández, 2011).

Mineralogía de arcillas.

En ausencia de MO disuelta o sólida los principales minerales (flosilicato) controlarán la solubilidad de los elementos en función del pH/Eh (**Figura 1.2b**), determinando la disponibilidad de cationes libres cuando los filosilicatos presentan carga eléctrica cero o existe abundante oxihidróxido de hierro que facilite la precipitación (Galán y Romero, 2008; Fernández, 2011).

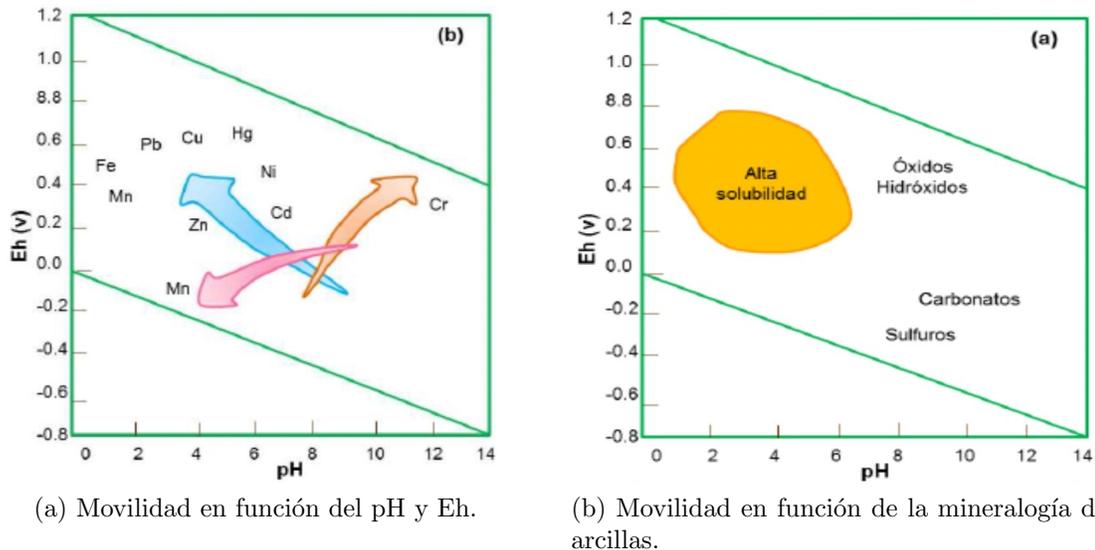


Figura 1.2: La movilidad y solubilidad de algunos EPT en función de la matriz mineralógica, potencial de iones hidronio (pH) y el potencial de oxidación–reducción (Eh) (Förstner, 1987).

Textura.

Los suelos arcillosos retienen más elementos por adsorción en la estructura compleja de las arcillas. Por el contrario, los arenosos carecen de capacidad de fijación facilitando la contaminación del acuífero (Galán, 2000 en Fernández, 2011).

Materia orgánica.

Reacciona con algunos elementos formando complejos de cambio o quelatos por adsorción, formando Cu estabilizado, o quelatos estables de Pb y Zn. Se pueden formar complejos organometálicos que se degradan por los organismos facilitando su solubilidad, disponibilidad, dispersión o toxicidad (Galán y Romero, 2008; Fernández, 2011).

Capacidad de intercambio catiónico.

El poder de intercambio catiónico depende del tipo de minerales de la arcilla, de la MO, de la valencia y del radio iónico hidratado del metal. A mayor tamaño y menor valencia, menor retención. Respecto a los minerales de la arcilla, la retención es mínima para los filosilicatos como el caolín, baja para las illitas, alta para las esmectitas y máxima para las vermiculitas (Sposito, 1989 y Galán, 2000 en Fernández, 2011).

Condiciones redox.

El potencial de oxidación-reducción es responsable de que los EPT se encuentren en estado oxidado o reducido y dependerá directamente de las condiciones ambientales y la cantidad de MO presente en la matriz (Goncharuk et al., 2010).

El redox interviene en el equilibrio e intercambio directo de valencia de los elementos, así como en el factor de movilidad cuando el medio es ácido (producción de iones H^+) o básico (producción de iones OH^-) (**Figura 1.2**).

Carbonatos.

La presencia de carbonatos favorece un pH alcalino, haciendo precipitar a algunos elementos. El Cd y otros elementos tienden a quedar adsorbidos por los carbonatos y algunos organismos, principalmente plantas y derivados de MO (Galán y Romero, 2008; Fernández, 2011).

Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn.

Juegan un importante papel en la retención de elementos y en su inmovilización. Se encuentran finamente diseminados en la masa del suelo por lo que son muy activos. Por su baja cristalinidad y tamaño pequeño de partícula, tienen una alta capacidad sorcitiva (absorción y adsorción) para metales divalentes, especialmente Cu y Pb y en menor extensión Zn, Co, Cr, Mo, Ni y también As (Ahumada et al., 2004; Jamali et al., 2007 en Fernández, 2011).

Conductividad.

El aumento de la conductividad puede reducir la movilización de los EPT y su retención por dos mecanismos. Primeramente, los cationes Na y K pueden reemplazar a los elementos en los lugares de intercambio catiónico. En una segunda fase, sus aniones cloruro y sulfato pueden formar compuestos más estables con EPT tales como Pb, Zn, Cu, Cd y Hg. Por otra parte, las sales normalmente dan pH alcalino (Galán y Romero, 2008; Fernández, 2011).

1.3. CLASIFICACIÓN DE ELEMENTOS

Entendiendo que los elementos químicos forman parte de los seres vivos (suelos, plantas, animales y más) en la compleja estructura medioambiental (crecimiento, desarrollo y muerte) (Mann et al., 2011) y que son derivados de la roca madre, actividades volcánicas y lixiviación mineralógica (geogénicos), el ser humano ha tenido la necesidad de manipular y clasificar a cada uno de ellos en su constante desarrollo cognitivo.

Los ha clasificado según sus características fisicoquímicas (valencia, estado de oxidación, electronegatividad, radio covalente (Å), radio iónico (Å), radio atómico (Å) y más) (Lothar, 1830; Galán y Romero, 2008; Mann et al., 2011; White, 2012).

De acuerdo con su compleja asociación en el medio como siderófilos (con afinidad por el hierro), calcófilos (con afinidad al azufre), litófilos (con afinidad por los silicatos), atmósfilos (como gases en la atmósfera) o biófilos (como elementos comúnmente concentrados en organismos) (**Tabla 1.1**) (Goldschmidt, 1970).

Tabla 1.1: Clasificación por asociación en el medio (Goldschmidt, 1970).

Siderófilos	Calcófilos	Litófilos	Atmósfilos	Biófilos
Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au, Re, Mo, Ge, Sn, C y P, ocasionalmente también Pb, As, W.	Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, Pb, Ga, In, Tl, As, Sb, Bi, S, Se y Te, ocasionalmente también Fe, Mo, Cr, Ge, Sn.	Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, O, B, Al, Si, Ti, Zn, V, Nb, Ta, Cr, Mn, W, Tierras Raras, F, Cl, Br y I, ocasionalmente también C, P, H, Tl, Ga, Ge, Fe.	H, N, He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, ocasionalmente también O, C.	C, H, O, N, P, S, y Cl, así como ciertos elementos traza como el V, Mn, Mg, Cu, Fe y B.

Por su estado de agregación (gas, líquido, sólido, plasma) o composición como metales (alcalinos, alcalinotérreos o elementos de transición lantánidos y actínidos), metaloides y no metales (anfígenos, halógenos y gases nobles), los cuales llegan a ser tóxicos o no tóxicos para los organismos en función de la cantidad percibida (Paracelso en 1567 “nada es veneno, todo es veneno; todo depende de la dosis”) (Lothar, 1830).

Por su peso atómico superior o inferior al hierro ($\text{Fe}=55,85 \text{ g/mol}$) como M's pesados y no pesados (Galán y Romero, 2008). Sin embargo, con esta clasificación algunos elementos metálicos muy tóxicos y de menor peso atómico como el V ($50,95 \text{ g/mol}$), Mn ($54,44 \text{ g/mol}$) y Cr ($52,01 \text{ g/mol}$), son excluidos. De forma similar M's, no M's y metaloides como el As ($74,92 \text{ g/mol}$), F ($18,99 \text{ g/mol}$) y P ($30,97 \text{ g/mol}$) presentes en el medio en proporciones traza (mg/Kg) o elementos mayoritarios como el Al ($26,98 \text{ g/mol}$) o Na ($22,98 \text{ g/mol}$) (Galán y Romero, 2008).

Por los diversos intereses socio-económicos, tecnológicos o de impacto ambiental con base en su persistencia en el medio, bioacumulación en organismos, toxicidad (carcinogénicos, teratogénicos, mutagénicos y letales), movilidad, transformación química y bioquímica o elevada manipulación antropogénica (**Tabla 1.2**) (Förstner, 1987; Galán y Romero, 2008; García et al., 2012; Zúñiga-Ontiveros, 2012).

Tabla 1.2: Clasificación por toxicidad (Swoáñez-Calvo, 1999 en Hernández, 2012).

Muy tóxicos y fácilmente disponibles	Contaminantes prioritarios según la EPA	Metales y no metales que aparecen regularmente en concentraciones superiores a la norma por causas antropogénicas
As, Pd, Zn, Tl, Co, Ag, Sn, Pb, Bi, Cd, Se, Te, Ni, Pt, Cu, Hg y Sb	Sb, Pb, Cr, Hg, As, Hg, Cu, Tl, Be, Ni, Zn, Cd y Se	Ag, Pb, As, Sb, Cu, Sn, Hg, Zn y Ni

Para hacer una integración conjunta de las clasificaciones, a los elementos analizados en éste estudio se les denomina ***Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)***.

1.3.1. ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

Considerando que bioquímicamente la acción tóxica de los EPT se debe a la fuerte afinidad de formar enlaces catiónicos con el grupo sulfhídrico (-SH) de las enzimas, el ácido carboxílico (-COOH) y grupos amino (-NH₂) de las proteínas, afectar la membrana celular, los procesos de producción y síntesis de ATP, ADN y RNA, y más (Goldschmidt, 1970; Baird, 2001, Manahan, 2007 en Zúñiga-Ontiveros, 2012)

Los EPT analizados en el estudio son: Arsénico (As), Aluminio (Al), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Hierro (Fe), Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Estaño (Sn), Zinc (Zn) y Vanadio (V) (ver **Anexo 8.5**) que son percibidos por sectores sociales cada vez más amplios como causantes de impactos ambientales (Mann et al., 2011).

Mediante el análisis de su concentración se busca identificar la presión ambiental hacia el acuífero subyacente de la ZMM, así también, generar información preventiva para el aprovechamiento óptimo de los recursos y los posibles impactos si estos contaminantes se llegan a presentar.

1.4. PRESIÓN AMBIENTAL

Entendiendo el 3.^{er} principio de la cumbre de Río de Janeiro de 1992 sobre el medio ambiente y el desarrollo sostenible, donde " *el derecho al desarrollo debe de ejercerse de forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambiente de las generaciones presentes y futuras*" (CNUMAD, 1992) y teniendo en cuenta que el mejor método para proteger los recursos naturales de la contaminación es prevenir la generación de focos puntuales (TC's) y fuentes difusas (excesos de fertilizantes y pesticidas en la agricultura, manejo inadecuado de granjas porcícola, entre otras), llega a ser necesario identificar la vulnerabilidad, el peligro y la presión ambiental a que están sometidos los recursos naturales en la ZMM.

En el estudio se empleó el concepto de **presión ambiental** como el conjunto de factores naturales o antropogénicos que influyen directamente en la calidad o cantidad de los recursos naturales (OECD, 1994), para el estudio se define la vulnerabilidad, peligro y presión ambiental (riesgo potencial) como:

Vulnerabilidad $V(x, t)$ = Condición determinada por factores o procesos físicos $F(x, t)$, sociales $S(x, t)$, económicos $E(x, t)$ o ambientales $M(x, t)$, que incrementan o disminuyen la susceptibilidad o resiliencia $C(x, t)$ al impacto de un peligro determinado $P(I(x, t))$ según su severidad o intensidad $I(x, t)$ (ISDR, 2004 en Ocodea, 2004).

Peligro $P(x, t)$ = Agente externo asociado con un fenómeno físico de origen natural, tecnológico o antropogénico que produce efectos adversos en un sitio determinado $X(x)$ según sea su intensidad o severidad $I(x, t)$, su frecuencia $T(I(x, t))$ o su probabilidad $Pr(I(x, t))$ (ISDR 2004 en Ocodea 2004).

Presión ambiental - Riesgo potencial = Pérdida de un elemento o comunidad como resultado de las interacciones entre los peligros $P(I(x, t))$ y las condiciones vulnerables $V(x, t)$ en un sitio determinado $X(x)$ (ISDR 2004 en Ocodea 2004).

Para identificar la presión ambiental se utiliza el factor **riesgo potencial** como el producto de la interacción entre el factor **vulnerabilidad intrínseca** $V(x, t)$ representado en el estudio sólo por las características medioambientales o físicas de la ZMM como la hidrología, la precipitación, humedad, geología, nivel del manto freático, los parámetros geodárficos, entre otras, independientemente de la naturaleza de los EPT (Morrel y Tuñón, 2001) y el factor **peligro** $P(I(x, t))$ por la clasificación categórica de la concentración de los EPT analizados y evaluados con base en la normatividad nacional e internacional para los tres usos potenciales del suelo, quedando estrictamente entendido que en ausencia de uno de los factores la presión ambiental (riesgo potencial) para la ZMM y el acuífero subyacente es nula.

2. ANTECEDENTES

De acuerdo con la problemática identificada, resulta fundamental para cualquier gobierno contar con un marco jurídico sólido, completo y actualizado para cumplir de manera eficiente con la obligación de prevenir el deterioro de los ecosistemas, restaurar impactos generados por contaminantes, hacer uso y manejo sostenible de los recursos naturales, entre otras responsabilidades (LGPGIR, 2003). Así también, otorgar protección de salud, desarrollo y bienestar a la población mediante la creación de estructuras normativas medioambientales que infraccionen el uso y manejo irresponsable de los recursos y los contaminantes (CPEUM, 1917).

Cabe destacar que, en el proceso de identificar y dar solución a la problemática, a nivel mundial se han desarrollado metodologías y lineamientos específicos para evaluar que tan vulnerables llegan a ser los recursos naturales ante agentes contaminantes, así como, para generar estrategias de manejo y de sostenibilidad ambiental (OECD, 1994).

2.1. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Dentro de los diversos métodos que buscan determinar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos de la manera más objetiva posible se ejemplifican los siguientes 12 métodos: EK_v, AVI, GOD, EPIK, DRASTIC, SINTACS, KARSTIC, COPK, PI, DUAL, ESLOVENO y KAVI. Éstos, emplean intervalos de clasificación definidos para cada una de las variables que los constituyen, teniendo como diferencia entre ellos la cantidad de variables utilizadas y el objetivo de evaluación (origen del contaminante, trayectoria del contaminante, eficiencia de la capa protectora, agua subterránea o fuente de abastecimiento) (Auge, 2004b; Árcega-Cabrera y Romero-Bernical, 2011; Bolio-Barrios et al., 2011; Valcarce y Rodríguez, 2011; Aguilar-Duarte et al., 2013).

1. El método EK_v desarrollado por Auge (2004a) considera la vulnerabilidad como un concepto cualitativo para evaluar al grado de protección natural del acuífero ante la contaminación. En relación a los acuíferos libres hace una clasificación basada en la profundidad de la superficie freática (E) y la permeabilidad vertical de la zona subsaturada (K_v) (Valcarce y Rodríguez, 2011).
2. El método AVI (Acuifer Vulnerability Index) desarrollado por Stempvoort et al. (1993) utiliza parámetros similares al EK_v para evaluar la vulnerabilidad. Se basa en el cálculo de la resistencia hidráulica “C” utilizando la expresión $C = [bi/Ki]$. Donde C es la resistencia hidráulica total (inverso de la conductividad hidráulica), bi es el espesor de cada capa sobre el acuífero y Ki la conductividad hidráulica de cada capa (Vrba y Zoporezec, 1994; Canter, 1997; Baez, 2001; Espinoza y Ramírez, 2002 en Pérez-Ceballos y Pacheco-Ávila, 2004).
3. El Método GOD, desarrollado por Foster (1987) y publicado formalmente por Foster y Hirata (1988) es un método sistemático utilizado cuando los datos son insuficientes, no confiables y no abarcan la totalidad del área de estudio. Sus siglas en inglés son: G = Ground water occurrence, O = Overall aquifer class y D = Depth to groundwater (Foster e Hirata, 1988; Vrba y Zoporezec, 1994; Agüero y Pujol, 2002 en Pérez-Ceballos y Pacheco-Ávila, 2004).
4. El método EPIK, es un método paramétrico desarrollado por Doerfliger y Zwahlen (1997) para evaluar las distintas propiedades del acuífero cárstico a escala detallada. Sus siglas en inglés son: E = Epikarst, P = Protective cover, I = Infiltration conditions y K = Karst network development (Auge, 2004b; Bolio-Barrios et al., 2011).

5. El método DRASTIC, desarrollado por Aller et al. (1987) para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y modificado por Akram y Basheer (2011) es uno de los métodos más comunes que permite el análisis de la vulnerabilidad de un sistema por medio de la superposición de índices mediante el análisis de sus características geográficas (Árcega-Cabrera y Romero-Bernical, 2011). Sus siglas en inglés son: D = Depth, R = Recharge, A = Aquifer, S = Soil, T = Topography, I = Impact y C = Hydraulic Conductivity (Canter, 1997; Martínez et al., 1998; Armienta y Rodríguez, 2001; Espinoza y Ramírez, 2002 en Pérez-Ceballos y Pacheco-Ávila, 2004).

El método posee tres supuestos importantes: 1) el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra; 2) el contaminante es trasladado al agua subterránea por precipitación y 3) el contaminante es móvil en el agua.

6. El método SINTACS, desarrollado por Civita y De Maio (1997) surge como una derivación del método DRASTIC utilizando los mismos parámetros, pero adaptado a las características hidrogeológicas de Italia a una escala con mayores detalles. Sus siglas en italiano son: S = Soggiacenza - profundidad del agua, I = Infiltrazione - infiltración, N = Non saturo - sección subsaturada - zona no saturada, T = Tipologia de la copertura - tipo de suelo, A = Acquifero - características hidrogeológicas del acuífero, C = Conducibilità - conductividad hidráulica y S = Superficie topografica - pendiente topográfica (Auge, 2004b).
7. El método KARSTIC desarrollado por el grupo europeo COST Action 620 emplea la terminología de Davis et al. (2002) para evaluar la sensibilidad del acuífero mediante el desarrollo del Karst y sus formas externas (dolinas, sumideros, conductos verticales). El método emplea factores que reflejan la presencia de conductos de disolución y flujos preferenciales. Sus siglas son: A = Aquifer - litología del acuífero y profundidad del agua, R = Recharge - recarga neta, S = Soil - tipo de suelo, T = Topography - topografía, I = Impact - litología de la sección subsaturada y C = Hydraulic conductivity - conductividad hidráulica del acuífero (Aguilar-Duarte et al., 2013).
8. El método COPK, es un enfoque europeo que utiliza la terminología de Daly et al. (2002) y Zwahlen (2003) para determinar el “origen-trayecto-objetivo” del contaminante. Se enfoca en el flujo del contaminante ya sea vertical u horizontal y el lugar del recurso hídrico (agua subterránea) y/o fuentes de abastecimiento (pozo). Sus siglas son: C = Concentración de flujo, O: Capas protectoras, P: Precipitación y K: Red kárstica (Aguilar-Duarte et al., 2013).

9. El método PI, desarrollado por Goldscheider (2005) utiliza el producto de los factores $P =$ Cubierta protectora (similar al factor O del método COPK) e $I =$ infiltración (similar al factor I del método EPIK), para evaluar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero a una escala a detalle (Aguilar-Duarte et al., 2013).
10. El método SIMPLIFICADO o DUAL desarrollado por Nguyet y Goldscheider (2006) simplifica el número de variables para zonas kársticas evaluando el espesor y permeabilidad del suelo y subsuelo, la recarga autógena (infiltración del agua directa) en contraposición a la alógena (infiltración del agua indirecta) de acuerdo a la presencia de sumideros, dolinas, manantiales y otros, con una escala detallada. Sus siglas son: O = Capas protectoras y C = Concentración de flujo (Aguilar-Duarte et al., 2013).
11. El enfoque ESLOVENO desarrollado por Ravbar y Goldscheider (2007; 2009) es un derivado del enfoque europeo COPK y el método DUAL. Integra la variabilidad temporal como mejora para el factor K (red kárstica) y considera el tiempo, conexión y presencia de redes y conductos mediante la interpretación de pruebas de trazadores y la identificación de redes kársticas activas a una escala a detalle (Aguilar-Duarte et al., 2013).
12. El método KAVI (karst aquifer vulnerability index) desarrollado por Van Beynen et al. (2012) se caracteriza por destacar la importancia de las depresiones kársticas y la conductividad hidráulica del acuífero. El método utiliza el análisis de densidad kernel (clusters of sinkholes) para identificar agrupaciones de depresiones (clusters of sinkholes) que permitan definir con mayor precisión el nivel de vulnerabilidad de la capa del “epikarst” y utiliza un análisis de sensibilidad (sensitivity analysis) para examinar cómo la subjetividad afecta los resultados en el modelo debido a la utilización de índices de ponderación (Aguilar-Duarte et al., 2013).

2.2. LINEAMIENTOS DE CALIDAD

En ese contexto, a nivel mundial se han desarrollado y propuesto límites normativos recomendables utilizados como estándares de calidad por diversas organizaciones para conocer el estado actual de conservación de los recursos (calidad y cantidad).

Para tener una idea clara de los criterios utilizados en el estudio para evaluar la presión ambiental que ejercen los EPT en la ZMM y el acuífero subyacente, se generó la **Tabla 2.3** de la concentración natural estimada de los elementos EPT en la corteza terrestre, suelos, océanos y atmósfera, representada en mg/kg a menos que se indique lo contrario (John, 2011).

Tabla 2.3: Estimación de EPT en el ambiente (John, 2011).

EPT	Aluminio (Al)	Arsénico (As)	Bario (Ba)	Cadmio (Cd)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Fierro (Fe)	Mercurio (Hg)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	Vanadio (V)	Zinc (Zn)
Corteza terrestre	82 mg/kg	0.0015 mg/kg	0.5 mg/kg	0.0001 mg/kg	0.1 mg/kg	0.05 mg/kg	41 mg/kg	0.00005 mg/kg	0.014 mg/kg	0.002 mg/kg	0.16 mg/kg	0.075 mg/kg
Suelo	De 0.5 a 10 %	De 0.001 a 0.01 mg/kg	0.5 mg/kg	De 0.001 a 1.5 mg/kg	De 0.001 a 0.45 mg/kg	0.02 mg/kg	De 0.5 a 15%	De 0.1 a 0.5 ppb y máximos de 0.2 ppm	De 0.002 a 0.19 mg/kg	0.001 mg/kg	De 0.01 a 0.5 mg/kg	De 0.005 a 0.77 mg/kg
Océano	*De 0.5 a 25 ppm	1.6 ppb	*De 10 a 20 ppb	+De 1 ppt a 1 ppb	24 ppb	0.2 ppb	2.5 ppb	40 ppt	2 ppt	4 ppt	1.5 ppb	30 ppb
Atmósfera	De 0.005 a 0.18 mg/m ³	De 1 a 30 ng/m ³	De 0.0015 a 0.33 ng/m ³	De 1 a 50 ng/m ³	De 0 a 30 ng/m ³	De 1 a 200 ng/m ³	^	De 2 a 10 ng/m ³ # \$	De 0.000076 a 10 mg/m ³	Menor a 1 ppm	0.02 ng/m ³ sobre el océano y 1 ng/m ³ en regiones contaminadas	De 1 a 4 ng/m ³
Lugar en abundancia	3	53	14	65	21	26	4	68	36	49	19	24

* Es mayor la concentración en el océano Atlántico que en el Pacífico
 + Mayor concentración en las capas de agua superficial
 ^ Concentraciones traza
 # En depósitos minerales hasta 1500 ng/m³
 \$ En agua de lluvia de 2 a 5 ppt

Como herramienta de comparación se generó la **Tabla 2.4** sobre los principales óxidos identificados en ZMM y en general en el Estado de Yucatán (Bautista-Zúñiga et al., 2003).

Tabla 2.4: Principales óxidos en Yucatán (Bautista-Zúñiga et al., 2003).

SiO ₂	Dióxido de silicio	MgO	Óxido de magnesio
TiO ₂	Dióxido de titanio	CaO	Óxido de calcio
Al ₂ O ₃	Trióxido de dialuminio	Na ₂ O	Óxido sódico
Fe ₂ O ₃	Trióxido de dihierro	K ₂ O	Óxido potásico
MnO	Óxido de manganeso	P ₂ O ₅	Pentaóxido de difósforo

Para identificar cuáles son los lineamientos normativos nacionales e internacionales que se utilizan como estándares de calidad se generó la tabla *lineamientos normativos* para tres usos potenciales del suelo, agrícola, residencial e industrial. La tabla se dividió en 2 para su visualización (**Tabla 2.5** parte 1 y la **Tabla 2.6** parte 2) (Friday, 1999; YARA, 2014; SSA, 2007; DEC-TN, 2010; GAHP, 2013).

Las organizaciones gubernamentales como la Agencia Europea de Medio Ambiente (European Environment Agency - EEA), la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization - WHO), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency - U.S. EPA), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT), el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (Canadian Council of Ministers of The Environment - CCME), entre otras, desarrollan los estándares de calidad como una herramienta para solucionar o prevenir problemas como la contaminación.

Tabla 2.5: Lineamientos normativos de EPT en suelos, parte 1.

ORGANIZACIONES	Uso potencial del suelo	Aluminio (Al)	Arsénico (As)	Bario (Ba)	Cadmio (Cd)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Hierro (Fe)	Mercurio (Hg)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	Vanadio (V)	Zinc (Zn)
U.S. Fish and Wildlife Service (USFWS) (Bayer, 1990)	Valor de detección	-	20	200	1	100	50		1	50	20		200
	Valor de estudio	-	30	400	5	250	100		2	150	50		500
	Valor límite	-	50	2000	20	800	500		10	600	300		3000
Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (Efroymsen et al. 1997a,b)	Lombriz de tierra		60		20	0.40	50		0.1	500			200
	Microorganismos	600	100	3000	20	10	100	200	30	900	2000	20	100
	Plantas terrestres	50	10	500	4	1	100		0.3	50	50	2	50
Environmental Quality Guidelines, Canadian Council of Ministers (CCME, 1997)	Agrícola		12	750	1	64	63		7	70	5	130	250
	Residencial y parques		12	500	10	64	63		7	140	50	130	250
	Comercial		12	2000	22	87	91		24	260	300	130	410
	Industrial		12	2000	22	87	91		50	600	300	130	410
	Valor				4	64	63		10	70		130	200
Dutch Soil Quality Standards (MHSPE, 1994 y Crommentuijn et al. 1997)	Valor objetivo		29	200	1	100	36		0.3	85		42	140
	Valor de intervención		55	625	12	180	190		10	530	900	250	720
	Límite permisible		34	165	2	100	40		2	140	53	43	160
Department of Environment and Conservation EPA Western Australia (NEPC, 1999)	Nivel de investigación		20	300	3	400	100		1	600	50	50	200
	Residencial con Jardín		100	15000	20	120000	1000		15	300	47000	550	7000
	Residencial		400		80	480000	4000		60	1200			28000
	Parques		200		40	240000	2000		30	600			14000
	Comercios e industrias		500	190000	100	600000	5000		75	1500	610000	7200	35000
Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Agrícola, Residencial y Comercial		22	5400	37	280			23	400		78	
	Industrial		260	67000	450	510			310	800		1000	
Global Alliance on Health and Pollution (GAHP, 2013)	Residencial		0.610		70	64			10	400			
	Industrial		2		800	87			43	800			
	Agrícola		12		1	64			26	70			
Heavy Metal Guidelines in Soil Assessment, Yara, United Kingdom (YARA, 2014)	Residencial		20		2	130			8	450			
	Parcela		43		2	200			26	450			
	Comercial		640		230	5000			26	750			
	Agrícola		50		3	400	135		1	300			300

Tabla 2.6: Lineamientos normativos de EPT en suelos, parte 2.

ORGANIZACIONES	Uso potencial del suelo	Aluminio (Al)	Arsénico (As)	Bario (Ba)	Cadmio (Cd)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Hierro (Fe)	Mercurio (Hg)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	Vanadio (V)	Zinc (Zn)
U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) Regional Screening Level (RSL) June 2017	Invertebrados del suelo			330	140					1700			
	Aves		43		1					11		8	
	Mamíferos		46	2000	0.4					56		280	
	Residencial	77000	7	15000	71	120000	3100	55000	11	4000	47000	390	23000
	Industrial	1100000	30	220000	980	1800000	47000	820000	46	8000	700000	5800	350000
Ministry of the Environment government of Japan (MOE, 1)	Agrícola		15		0.4		125						
The Environmental Management (Soil Quality Standards) Regulations, 2007 of Tanzania	Agrícola		1.0		1		200		2				
Compilation of standards for contamination (Austria, 2009) of surface water, ground water, sediments and soil	Residencial		20		2	50	100		2	100			
	Agrícola		20		1	100	100		1	100			300
Límites en la legislación italiana (D.C.I. 2777/84, Dir. 86/278/CEE, D.Lgs 99/92 y D.Lgs. 152/06).	Agrícola		12	103	0.4		40	17.4					
	Residencial		20		2	150			1	100	1	90	150
	Industrial		50		15	800			5	1000		250	1500
Bélgica Flandes	Residencial		110		6		400		15	700			1000
Bélgica Bruselas	Residencial		110		6	300	400		15	700			1000
Bélgica Valón	Residencial		300		30	520	290		56	700			710
República Checa	Residencial		70	1000	20	500	600		10	300	300	450	2500
Finlandia	Residencial		50		10	200	150		2	200		150	250
Lituania	Residencial		10	600	3	100	100		2	100	10	150	300
Países Bajos	Residencial		55	625	12	380	190		10	530	900	250	720
Polonia	Residencial		23	285	6	170	100		4	150	40		325
Eslovaquia	Residencial		50	2000	20	800	500		10	600	300	500	3000
Dinamarca	Residencial		20		5	1000	1000		3	400			1000

Bajo los lineamientos anteriormente descritos (**Tabla 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6**) en el apartado análisis y resultados (**Apartado 7.4**) se muestra la **Tabla 8.11** de los valores límite más importantes que fueron utilizados como índices de calidad para evaluar el peligro que representa la concentración de los EPT dentro de cada TC en la ZMM y el acuífero subyacente.

2.2.1. LEGISLACIÓN MEXICANA DE CONTAMINACIÓN

En México, aunque se pueden encontrar antecedentes normativos desde los años cuarenta del siglo pasado principalmente en la legislación sanitaria y códigos civiles sobre la contaminación, los principales conceptos relacionados con el tema de residuos y EPT se enmarcan en los artículos 4, 25, 27, 73, 115 y 124 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos de 1917 (CPEUM). Los artículos se enfocan en el derecho que toda persona tiene de salud y protección ambiental, desarrollo y bienestar sostenible, restauración y preservación de su entorno ecológico, normatividad en salubridad general y responsabilidad jerárquica para el manejo de residuos (CPEUM, 1917; LGPGIR, 2003).

Con base en la CPEUM se promulga en 1984 la Ley General de Salud (LGS) como instrumentos normativos para el saneamiento básico, protección a la salud y aumento del nivel de vida de la población, en 1988 la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) como instrumento general para el manejo, control y disposición final de residuos sólidos (artículo 73 fracción XXIX-G) y en 2003 la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) como marco regulatorio para la clasificación de residuos y su competencia en los tres órdenes de gobierno, las leyes y reglamentos estatales y municipales para el manejo y disposición final de los residuos y los bandos de policías y buenos gobiernos para la administración y funcionamiento del servicio de limpia. Además de normas específicas como la *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004*, *NOM-001-SEMARNAT-1996*, *NOM-117-SSA1-1994*, *NOM-052-SEMARNAT-2005*, *NMX-AA-61-1985*, *NOM-098-SEMARNAT-2002*, *NOM-083-SEMARNAT-2003*, *NOM-EM-138-ECOL-2002*, y otras, que funcionan como instrumentos jurídicos de carácter técnico, obligatorios en el territorio nacional y con el objetivo de dar cumplimiento a las obligaciones establecidas en los reglamentos y leyes según su validez, vigencia y gradualidad de aplicación.

A nivel federal se identifica a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) como la principal dependencia del gobierno encargada de impulsar la protección, restauración, conservación, aprovechamiento y desarrollo sostenible de los recursos, bienes y servicios ambientales, apoyada principalmente por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), enfocadas en la administrar del recurso hídrico en México y hacer cumplir la normatividad para evitar el creciente deterioro ambiental, así también, a nivel estatal se identifica a la Secretaria de Desarrollo Sustentable (SDS) y a la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY).

En conjunto, las secretarías, leyes y normas buscan establecer lineamientos óptimos para identificar la contaminación y formas de remediar los suelos impactados, establecer límites máximos permisibles (LMP) y consolidar métodos de prueba de concentración de EPT en los sistemas, caracterizar e identificar las fuentes de contaminación, establecer criterios para su manejo óptimo, entre otros.

2.2.2. MEDIDAS DE MANEJO

Para lograr un manejo adecuado de los residuos en la LGEEPA se decretó especialmente en el artículo 5, 11, 15, 134 y 135 la obligación federal para regular la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos, la facultad para poder suscribir convenios o acuerdos de coordinación para el control de los residuos de baja peligrosidad, formular y crear políticas ambientales para obligar a prevenir, minimizar, reparar o asumir los costos que impliquen los daños causados, incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje y generar criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo, además de incentivar a quienes hacen un aprovechamiento sostenible de los recursos naturales (LGEEPA, 2012).

En la LGPGIR bajo el principio de responsabilidad compartida o de corresponsabilidad se integra como instrumento estratégico en los Sistemas de Manejo Ambiental (SMA), Planes de Manejo (PM), Programas para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (PPGIR), y otros, con el objeto de multiplicar su alcance y potenciar los resultados en la regulación de residuos, acciones preventivas, minimizar impactos y hacer reúso y gestión integral de residuos por su valor comercial (LGPGIR, 2003).

Dentro de los lineamientos legales para manejar y remediar suelos contaminados en la LGEEPA se estableció como mecanismo de acción la auditoría ambiental, como un examen metodológico de operaciones respecto a la contaminación y el riesgo que se genera por parte de particulares. También se establecieron las evaluaciones, procedimientos y manifestaciones de impacto ambiental, los ordenamientos ecológicos, los lineamientos de cumplimiento ambiental, los parámetros internacionales, las buenas prácticas de operación e ingeniería aplicables, entre otros (LGEEPA, 2012).

Además, se instauraron los métodos de inspección y vigilancia con fundamento jurídico que permiten y facultan a la autoridad a estipular medidas correctivas de urgente aplicación de seguridad o sanciones a establecimientos que generan o realizan (manejo) actividades altamente riesgosas con materiales peligrosos sin control adecuado (LGEEPA, 2012; SEDUMA, 2009).

Como estrategias también se ha generado la jurisdicción para determinar emergencias y contingencias ambientales que derivan de la contaminación de suelos por materiales y residuos peligrosos a causa de actividades antropogénicas o naturales que ponen en peligro la integridad de los ecosistemas (LGEEPA, 2012; LGPGIR, 2003).

Si bien, se han estipulado leyes y fundamentos federales para solucionar el problema de la contaminación en suelos y ecosistemas por residuos sólidos, actualmente es fundamental adoptar medidas que garanticen la aplicación de las leyes y la congruencia entre todas ellas.

2.2.3. MEDIDAS DE MANEJO EN YUCATÁN

En el Estado de Yucatán las estrategias de manejo para reducir la contaminación fueron estipuladas en el artículo 96 dentro de su estructura normativa (Constitución Política del Estado de Yucatán - CPEY) como una medida correctiva para el manejo de recursos, obligando a la administración vigente a generar un plan de desarrollo integral con vigencia sexenal sujeto obligatoriamente a los programas estatales para regularizar e implementar estrategias de conservación ambiental. En el artículo 85 Bis, Fracción III la CPEY se indica que los municipios tendrán la jurisdicción para la limpieza, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos, asegurando la conservación, salud y desarrollo sostenido del ambiente (CPEY, 2014).

Como mecanismo de acción se estructuró de forma permanente la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SDS), como una institución competente para la protección, planeación, restauración, conservación, educación, gestión, ordenamiento y administración de los recursos, así como, para identificar los sitios y suelos contaminados por el manejo inadecuado de residuos y proponer medidas de remediación y restauración. También, se ha consolidado la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY) como un mecanismo regulatorio de las descargas de contaminantes, con la facultad de administrar, operar, conservar, ampliar, construir y sostener los sistemas de agua potable y saneamiento en el Estado.

Bajo el mismo marco se han desarrollado planes como: el Plan Estatal de Desarrollo Yucatán (PEDY) 2001-2007, que tomó como estrategia ambiental la creación de un programa de Manejo Integral de Residuos (MIR) y un programa de monitoreo de aire, aguas, suelo y ruido; el PEDY 2007-2012, buscó promover la gestión integral de RSU y RME, ubicar áreas de disposición final de RSU que cumplan con la normatividad vigente, restaurar y sanear TC's e implementar mecanismos de reciclaje y reutilización, el PEDY 2012-2018, buscó el desarrollo ordenado del ambiente fomentando la infraestructura para la recolección, selección, reciclaje, disposición final y aprovechamiento energético de los RSU y RME, impulsar el MIR, consolidar las cadenas de valor, impulsar la creación de programas de prevención y gestión de RSU, impulsar instrumentos económicos para la gestión sostenible y de calidad del territorio y fomentar la cultura ambiental, por último, el PEDY 2018-2024 vigente, que busca la conservación de los recursos naturales, realizar acción por el clima, limpiar y sanear el agua, manejar de forma integral los residuos, implementar energías no contaminantes, cuidar la vida submarina y ecosistemas terrestres y tener una movilidad sostenible.

La necesidad de fortalecer el marco jurídico para prevenir la contaminación y mitigar los impactos, ha generado el desarrollo de reglamentos enfocados al conocimiento de la infiltración de aguas pluviales en áreas verdes, al diseño, construcción y operación de los sistemas de drenaje y plantas de tratamiento, estudios de infiltración de contaminantes en descargas al alcantarillado y fosas sépticas, al manejo y tratamiento de RSU, entre otros (Febles-Patrón y Hoogesteijn, 2008).

Así también, estudios descriptivos en el Estado, como el Atlas de Peligros Naturales del Municipio de Mérida, Yucatán 2011, realizado a petición de la Secretaría de Gobernación de Yucatán (SGY), la Secretaría de Protección Civil municipal (SPCM), las recomendaciones del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y la JAPAY. El atlas fue un estudio integral para generar estrategias de manejo del ambiente y analizar la situación actual de contaminación, fenómenos naturales y la vulnerabilidad y riesgo. Mediante la utilización de un sistema de información geográfica (SIG) (ArcMapGIS 9), estudios de ortofotografías (1985, 1995 y 2005) a una escala de 1:20,000, cartografía, además de un modelo de elevación digital, también se pudo generar información para la posible conservación de la calidad del agua subterránea, el manejo, uso y ordenamiento de suelos, la protección ambiental, la representación espacial de flujos subterráneos y la localización de algunas fuentes contaminantes. Otro estudio fue el desarrollado por Gijón et al. (2009) aplicando el método DRASTIC “Análisis Espacial de la Vulnerabilidad y Riesgo del Agua Subterránea a la Contaminación en el Estado de Yucatán, México” para identificar qué tan susceptible a alteraciones antropogénicas no controladas (contaminación) llega a ser el Estado de Yucatán, entre otros.

2.3. CONTAMINACIÓN EN YUCATÁN

Considerando que la contaminación en el Estado y en general en el mundo se potencializó por la industrialización, uso, consumo y demanda de materia prima, bienes y servicios, la cantidad exacta generada de residuos no se conoce. Para abordar en la solución de la problemática a nivel nacional se estructuró la norma *NMX-AA-61-1985* como un método para determinar la generación de residuos sólidos a partir de un muestreo estadístico en la población (varianza, desviación estándar y coeficiente de correlación). En la LGPGIR el artículo 28 como un mecanismo de acción para obligar a los productores, importadores, exportadores, distribuidores y grandes generadores de residuos peligrosos (aceites, disolventes, convertidores catalíticos, lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio o de níquel-cadmio, y más) y biológico infecciosos (sangre, muestras o cultivo de tejidos, residuos patológicos, bisturí, agujas y otros) a generar sus propios planes de manejo de residuos sólidos.

Si bien la autoridad, tanto federal, como estatal y municipal, en corresponsabilidad con la comunidad han buscado llevar a cabo como estrategia la reducción de la cantidad de residuos generados debido a su amplio conocimiento, utilidad e incluso, sabiendo de su capacidad de aprovechamiento, beneficio económico y grado de contaminación, sigue siendo común ver sitios de disposición final de forma clandestina donde los residuos sufren un mal manejo y toda clase de basura está mezclada (INECC y SEMARNAT, 2012).

2.3.1. COMPOSICIÓN FRECUENTE DE LOS TC'S

Considerando que en la LGPGIR en el artículo 30 se estipulan los criterios (alto valor económico, grandes volúmenes, sustancias tóxicas, alto riesgo a la población, ambiente y recursos naturales) a los que se sujeta un residuo para ser integrado en los planes de manejo y por consiguiente ser manejado adecuadamente, se estima que a nivel nacional sólo el 87 % de los residuos generados se recolectan (el resto se desconoce su destino). De los residuos colectados el 66 % se envían a 238 rellenos sanitarios, el 28 % a 1,643 rellenos de tierra controlados, tiraderos a cielo abierto o sitios sin control y sólo el 5 % se reciclan. Se estima que en ciudades grandes la recolección alcanza el 95 %, en ciudades medias del 75 % al 85 % y en pequeñas áreas urbanas entre el 60 % y el 80 % (INECC y SEMARNAT, 2012; INEGI, 2011; PNPGR, 2009; SEDUMA, 2009).

Debido a la gran cantidad de residuos generados la LGPGIR los ha clasificado como residuos sólidos urbanos (RSU), de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP) comúnmente llamados CRETIB por ser corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables y biológico infecciosos. Así también, describe cuatro tipos de emisiones contaminantes, sean líquidas (lixiviados), gaseosas (metano, bióxido de carbono, y otros), en forma de partículas (M's, sales, no M's, polvos, entre otros) o por vectores biológicos y patógenos (cucarachas, moscas, mosquitos, bacterias, entre otros) (SEMARNAT y GTZ, 2006).

A nivel nacional se estima que diariamente se generan aproximadamente 102,887 toneladas de RSU (aproximadamente 42.9 millones de ton/año), además de 9 millones ton/año de RP, 100 millones ton/año de RME producto de la minería y 0.5 millones de ton/año de residuos del petróleo (incluye RP y RME) (INECC y SEMARNAT, 2012).

Para dimensionar la generación per cápita de RSU por parte de la población, se estima que en promedio cada habitante genera 0.852 kg de RS al día, que van desde 0.4 kg/hab/día en zonas rurales hasta cerca de 1.5 kg/hab/día en zonas metropolitanas (aproximadamente 311 kg/hab/año), siendo la Ciudad de México (16,486 ton/día) la entidad que más genera, seguida del Estado de México (13,014 ton/día), Jalisco (6,935 ton/día), Veracruz (6,030 ton/día), Puebla (4,330 ton/día) y Michoacán (4,181 ton/día). En el Estado de Yucatán aproximadamente se generan 1,284 ton/día, siendo Mérida (850 ton/día), Progreso (53.6 ton/día) y Umán (40 ton/día) los municipios que más generan (INEGI, 2015 INEGI, 2014).

Es importante mencionar que para poder llevar a cabo un manejo adecuado de los RSU enfocado en su valorización, control o tratamiento, una de las variables más importante a considerar es la composición, así también, los patrones de consumo de la población y las condiciones económicas a nivel local, estatal o nacional. Se estima que actualmente el 43.5 % de los residuos generados en México son restos de comida y jardinería, el 15.9 % papel y cartón, el 7.4 % vidrio transparente y de color, el 6.7 % plástico rígido o blando, el 6.3 % pañales desechables, 2.9 % latas y metales, el 1.5 % trapos y el 15.8 % otros residuos (INECC y SEMARNAT, 2012).

2.3.2. CONTAMINACIÓN EN EL SUELO Y ACUÍFERO

Debido a la naturaleza cárstica del Estado de Yucatán, la particularidad del acuífero como medio de abastecimiento de la zona y el potencial de contaminación que representa la elevada generación de residuos y su manejo inadecuado, se ha hecho necesario conocer el estado actual de la concentración de los EPT y otros contaminantes.

Por medio del estudio de Pacheco-Ávila et al. (2004) “Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México” se identifica que al menos 21 de 106 municipios analizados están siendo afectados por nitratos, superando el límite propuesto por la norma *NOM-001-SEMARNAT-1996* y la OMS de 45 $\mu\text{g/L}$, alcanzando valores máximos de 96 $\mu\text{g/L}$ (Pacheco-Ávila et al., 2004).

En el estudio de González y Rodríguez (2006) “Contaminación del acuífero yucateco por lixiviado de residuos municipales” se identifica que los cloruros han superado el límite máximo permisible en agua para uso y consumo humano de 250 $\mu\text{g/L}$, sobrepasando por un amplio margen el límite establecido, hasta un máximo de 4500 $\mu\text{g/L}$ en la región cercana al antiguo basurero municipal donde se producen lixiviados provenientes de los desechos de origen doméstico.

En la región noroeste, noreste y sur del Estado el sodio ha superado el límite de 200 $\mu\text{g/L}$ y de acuerdo con la disolución de minerales como carbonato (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y anhidrita (CaSO_4) que conforman la denominada dureza del agua, el CaCO_3 es el único que supera el límite de 500 $\mu\text{g/L}$ propuesto por la norma *NOM-127-SSA1-1994* (González y Rodríguez, 2006; Pacheco-Ávila et al., 2004)

En el análisis de Cuevas et al. (2002) “Calidad química y bacteriológica del agua subterránea en el principal campo de pozos para el abastecimiento de Mérida, Yucatán, México”, en los pozos profundos se identifican concentraciones elevadas de calcio (de 90 a 120 mg/L) y magnesio (de 10 a 70 mg/L) más frecuentemente que los pozos someros, esto debido a que en los pozos profundos el agua tiene un mayor período de contacto con la roca caliza, favoreciendo su disolución (Cuevas et al., 2002).

De acuerdo con lo reportado por López et al. (2009) en el estudio “Evaluación de los niveles de hidrocarburos (alifáticos y aromáticos policíclicos) en el agua subterránea de la ciudad de Mérida, Yucatán, México” para 50 pozos someros, el 34 % de las muestras indican la presencia de hidrocarburos alifáticos en un rango de 0.050 a 12.46 $\mu\text{g/L}$, con mayor presencia de n-alcenos de 17 a 34 carbonos y el 56 % la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (antraceno, benzo(a)pireno, benzo(a)antraceno y benzo(k)fluoranteno) derivados de la combustión incompleta de MO y con propiedades carcinogénicas (López et al., 2009).

Respecto a la contaminación biológica por coliformes fecales, se reporta que por lo menos el 45 % del agua del acuífero es aceptable para uso y consumo humano, el 23 % está contaminada, 18 % es peligrosa y el 14 % es muy peligrosa respecto a la clasificación química de Lillibridge (2000), considerando que si se comparan los análisis contra la norma *NOM-127-SSA1-1994* el agua tendría que estar libre de coliformes fecales para uso y consumo humano (Pacheco-Ávila et al., 2004).

Los parámetros de la temperatura, potencial de hidrógeno y oxígeno disuelto en el agua, presentan una marcada tendencia a mantener sus valores con poca variabilidad, oscilando éstos alrededor de 27 °C, 7 unidades de pH y 3 mg/L respectivamente (Cuevas et al., 2002).

En el estudio de Herrera-Silveira y Morales-Ojeda (2009) “Impactos al acuífero y su efecto en la condición costera de Yucatán: Mareas rojas y eutrofización” aproximadamente el 60 % (213,000 ton/año) del nitrógeno (N) y 75 % (86,000 ton/año) del fosfato (P) presente en el acuífero proviene de las descargas de granjas de cerdos y de aves, cerca del 34 % (121,000 ton/año) de N y 22 % (25,000 ton/año) de P de la actividad agrícola y sólo el 2 % de N y P de la descarga directa de la población (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2009).

2.3.3. CONCENTRACIÓN DE EPT

Respecto a los EPT que superan los límites establecidos por la norma *NOM-001-SEMARNAT-1996* en la PY, Pacheco-Ávila et al. (2004) indica que el Cd fue detectada en el 100 % de las muestras tomadas de pozos de abastecimiento humano de las 106 cabeceras municipales (osciló entre 1-15 $\mu\text{g/L}$), el 72 % de las muestras exceden el límite establecido bajo el criterio de consumo (0.005 $\mu\text{g/L}$).

De acuerdo con el estudio de Marin et al. (2000) “Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer, Merida, Yucatan, Mexico”, se detectó la presencia de Pb, Cr, Cd y As en pozos de abastecimiento de agua potable en la parte sur de Mérida, identificando así al Pb, Cr, Cd como los únicos elementos que superaron su LMP propuesto por la norma *NOM-001-SEMARNAT-1996*. Así mismo, se ha detectado la presencia de Cd (17.6 $\mu\text{g/L}$), Cr (2.8 $\mu\text{g/L}$), Cu (1233 $\mu\text{g/L}$), Pb (87,5 $\mu\text{g/L}$) y Zn (6690 $\mu\text{g/L}$) en las aguas subterráneas de la zona industrial de Mérida (Castillo et al., 1995 en Marin et al., 2000).

González et al. (2004) indica en el estudio “Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb en sedimentos y en tres especies de pepino de mar (clase *holoturoidea*) de las costas del Estado de Yucatán, México” que no hay evidencia de diferencias en las concentraciones de Cd, Cr y Cu en sedimentos presentes en las costas, sin embargo, las concentraciones promedio de Pb si varían de 0.169 mg/kg (costa poniente), 0.172 mg/kg (costa central) y 0.172 mg/kg (costa oriental).

De acuerdo con lo reportado por Tello de Meneses (2014) al menos en la zona de la reserva de la biosfera ría lagartos los metales como Fe, Al, As, Zn, Mn, Cr, Cu, Ni, Pb, Sn y Cd han aumentado en su concentración debido al aporte antropogénico en la periferia de la laguna, los cambios hidrológicos e hidrodinámicos durante los cambios de temporada (lluvias, Nortes y secas) y el aporte a través de ojos de agua relacionados al acuífero de Yucatán.

3. HIPÓTESIS

Con base en lo anteriormente expuesto se plantean las hipótesis de la presente investigación.

1. Es probable que en la ZMM se esté llevando a cabo la incorrecta disposición de residuos sólidos urbanos e industriales en sitios no regulados (tiraderos clandestinos - TC's).
2. Es probable que los TC's están ampliamente distribuidos en la ZMM y debido a la degradación medioambiental estén siendo disgregados y estén aportando al suelo subyacente EPT en concentraciones superiores a las consideradas umbral o límite permisible según normas nacionales e internacionales.
3. Es probable que la situación espacial de los TC's y la concentración de los EPT que se están aportando al suelo subyacente, representen un riesgo potencial del uso del suelo para actividades antrópicas y la seguridad del acuífero.

4. JUSTIFICACIÓN

Las actividades antropogénicas generan residuos sólidos que deben ser manejados adecuadamente para evitar que contaminen el medio ambiente. Esto es de especial relevancia en sitios cuyas características geológicas y ambientales definen una mayor vulnerabilidad, como es el caso de las zonas cársticas. La mala disposición de los residuos sólidos genera la creación de tiraderos clandestinos (TC's) donde los residuos sufren degradación y liberan al medio ambiente sus diversos compuestos y elementos. Esta liberación puede darse en tal medida que genere concentraciones elevadas en el área del TC que al ser lixiviadas pueden ingresar al sistema de aguas subterráneas de la zona. Este ingreso de elementos o compuestos puede darse en tal concentración que represente un riesgo para la calidad ambiental del suelo y el agua.

Es importante crear mejores estrategias gubernamentales que partan de ideas de investigación para prevenir la contaminación, así como, caracterizar y manejar de la manera óptima los recursos naturales. Ahora bien, este estudio pretende aportar conocimiento científico sobre la vulnerabilidad intrínseca del suelo kárstico de la ZMM y el acuífero subyacente. Así también, identificar la presión ambiental del sistema por la presencia de TC y la concentración de elementos potencialmente tóxicos.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

1. Evaluar las condiciones de riesgo en la zona metropolitana de Mérida (ZMM) y acuífero subyacente por contaminación de elementos potencialmente tóxicos para generar mapas temáticos que contribuyan a su manejo adecuado.

5.2. OBJETIVOS PARTICULARES

Como objetivos particulares se plantea.

1. Identificar tiraderos clandestinos (TC's) en la ZMM.
2. Determinar la concentración de: As, Al, Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Pb, Sn, V y Zn en suelos de TC's presentes en la ZMM.
3. Comparar los resultados obtenidos contra normas nacionales e internacionales para identificar suelos contaminados.
4. Analizar la vulnerabilidad intrínseca de la ZMM por medio de características ambientales y la utilización del método DRASTIC modificado.
5. Identificar el nivel de amenaza (peligro) por parte de cada TC's analizado.
6. Elaborar mapas de elevación geoestadística de contaminación mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) asociados a la ZMM y acuífero subyacente.
7. Generar recomendaciones de manejo de residuos sólidos con base a los índices de vulnerabilidad, peligro y riesgo encontrados en la investigación.

6. ÁREA DE ESTUDIO

6.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZMM

El área de estudio se encuentra ubicada en el Estado de Yucatán a $21^{\circ}00'$ latitud norte y $89^{\circ}37'$ longitud oeste (UTM Zona 16) con una extensión aproximada de $2,504 \text{ km}^2$ (**Figura 6.3**). La zona se caracteriza por no presentar cambios topográficos significativos (pendiente de 0 a 0.5°) en toda su extensión por lo que su variación de altura respecto al plano horizontal fluctúa entre uno y tres metros y respecto al nivel medio del mar entre 6 y 8 m con tendencia descendente hacia la zona costera del norte (Bautista et al., 2015; INEGI, 2002).

Para el estudio la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM) está conformada por 10 municipios conurbados donde se localizaron y analizaron los denominados TC's. De los municipios analizados la capital del Estado Mérida, es el municipio que encabeza la lista, seguido de Conkal, Kanasín, Ucú y Umán, que son reconocidos oficialmente por la Secretaría de Desarrollo Social "SEDESOL" y debido a la interacción, dinámica y cercanía a la zona Progreso, Abalá, Chicxulub Pueblo, Timucuy y Tixpéhual se integran en el estudio (**Figura 6.3**).

De acuerdo con el estudio realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) "Censo de Población y Vivienda 2010", esta importante región del sureste mexicano experimenta diversos fenómenos y problemáticas socio-ambientales que afectan la sostenibilidad de los asentamientos urbanos y la degradación de los ecosistemas.

Dentro de los principales problemas económicos y sociales en la zona destacan los fenómenos como: la desigualdad de acceso a los beneficios económicos, sociales y urbanos; la degradación del ambiente urbano y la falta de empleo e ingresos suficientes entre la población, sin embargo, la ZMM se considera como el polo de crecimiento y desarrollo más importante del Estado de Yucatán, esto debido a que los comercios y empresas que mueven el motor económico y generan la mayor parte de los empleos se ubican ahí.

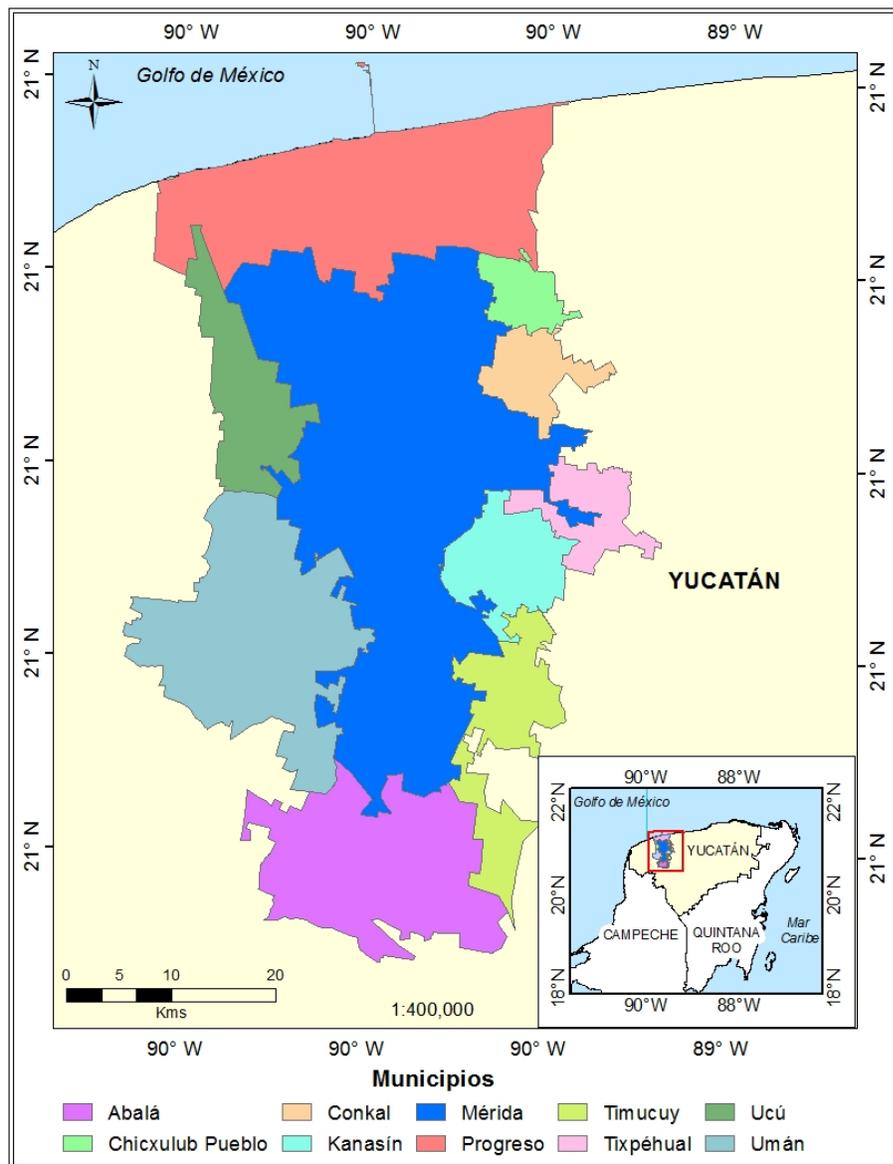


Figura 6.3: La Zona Metropolitana de Mérida.

Por medio del XII Censo de Población y Vivienda del 2000, del II Censo de Población y Vivienda 2005 y del Censo de Población y Vivienda 2010 generados por el INEGI, se identifica que la tasa de crecimiento en la ZMM para el periodo 2000-2005 fue de 2.4 y para el periodo 2005-2010 fue de 1.65, ambas tasas de crecimiento superaron a las del Estado en los mismos periodos (1.90 y 1.46 respectivamente) (INEGI, 2010; PAECC, 2014).

Debido al crecimiento poblacional la mancha urbana de la ZMM ha aumentado, pasando de 4,264 ha de suelo urbanizado en 1950 a 27,027 ha en el 2010, estimando que si las políticas de urbanización, infraestructura y diseños de vivienda no se modifican en 10 años y medio se acabará el suelo urbanizable (INEGI, 2010; PAECC, 2014).

Considerando que cuando existen zonas con elevada densidad poblacional los servicios como la recolección de RSU llegan a ser insuficientes y en contra parte, cuando la densidad poblacional es baja económicamente hablando llegan a ser poco rentables, la ZMM se caracteriza por ser la única región del Estado donde se localiza el único relleno sanitario tipo A que recibe más de 100 toneladas de RSU al día (Mérida), tres rellenos sanitarios tipo C que reciben de 10 a 50 ton/día de RSU (Progreso, Umán y Kanasín), dos rellenos sanitarios tipo D que reciben menos de 10 ton/día de RSU (Timucuy y Tixpéhual) y 4 tiraderos a cielo abierto (Abalá, Chicxulub Pueblo, Conkal y Ucú) (**Figura 6.4**) (INEGI, 2014; PAECC, 2014; PSIDS, 2015).

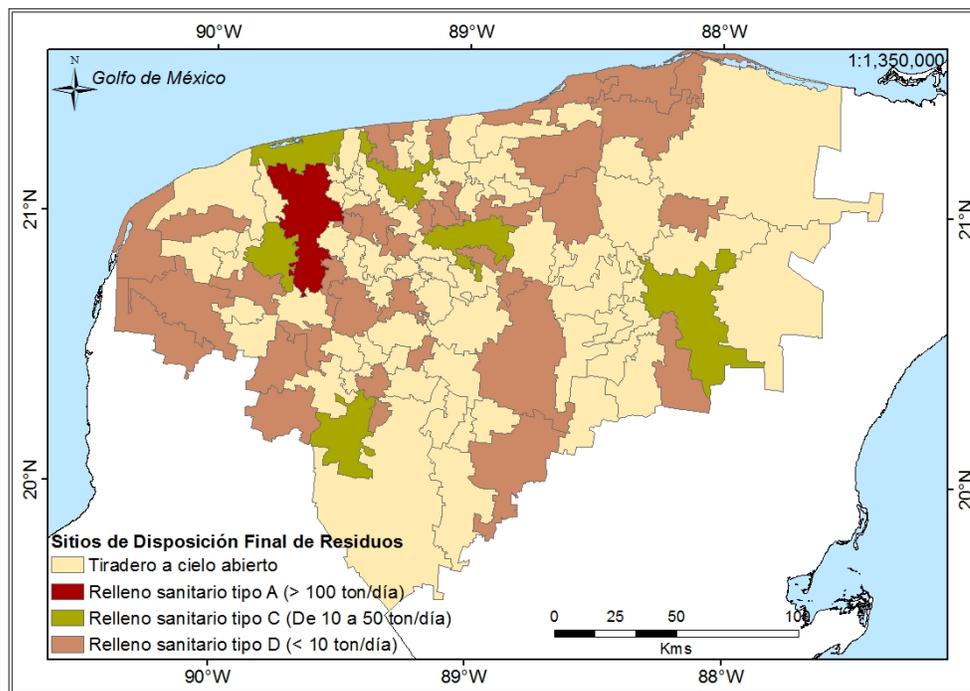


Figura 6.4: Clasificación de rellenos sanitarios en Yucatán (DOF, 2014 en PSIDS, 2015).

De forma generalizada todos los municipios del Estado reciben tratamiento de RSU, siendo la SDS y la Dirección de Restauración y Saneamiento Ambiental (DRSA) las que enfocan su esfuerzo a generar acciones encaminadas a prevenir y evitar la contaminación del ambiente mediante la aplicación del Programa de Manejo Integral de Residuos Sólidos (PMIRS), así también, se apoyan y coordinan de dependencias en los tres niveles de gobierno y la participación efectiva de la sociedad.

6.1.1. HIDROGRAFÍA

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) la ZMM está ubicada en la zona hidrológica número 32 de la región XII dentro de la PY y debido a que se localiza en una extensión orográfica reducida sus características geohidrológicas son muy similares (CONAGUA, 2012).

A excepción de la porción costera del norte donde están presentes humedales, lagunas costeras y ambientes palustres y lacustres, Yucatán se caracteriza particularmente por no presentar corrientes superficiales de agua, sin embargo, cuenta con corrientes subterráneas que circulan en dirección parcialmente radial y con dirección preferencial del sureste al noroeste, conformando así el acuífero subyacente de la PY (**Figura 6.5**) (INEGI, 2002; Jiménez et al., 2005).

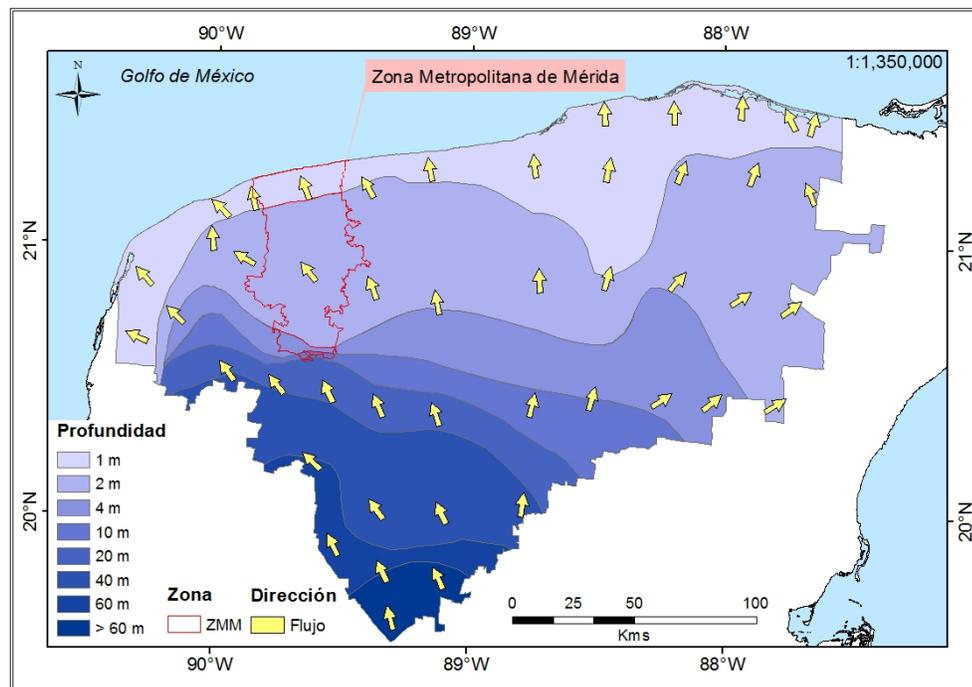


Figura 6.5: Dirección del flujo y profundidad del acuífero subterráneo de la PY.

Debido a las características naturales de la PY el acuífero es la única fuente de abastecimiento para el desarrollo y subsistencia de la población y se caracteriza físicamente por estar compuesto de canales de disolución, cenotes, dolinas, cuevas y cavernas, además de estructuras en forma de cúpulas, domos, microdomos, entre otras (INEGI, 2002; Jiménez et al., 2005).

La elevada permeabilidad del sistema cárstico presenta como característica hidrológica una elevada conductividad (0.3 a 1.2 m/día) que deriva en un gradiente hidráulico que va de 7 a 10 mm/km (con dirección de sur a noroeste) (Buckley et al., 1994 y Marín, 1990 en Graniel-Castro et al., 2003). En la ZMM la tabla de agua se localiza a un nivel piezométrico de 1 a 10 m por debajo de la superficie y con variaciones de altura de 1.0 a 1.2 m respecto al nivel medio del mar (**Figura 6.5**) (Villasuso et al., 1988 en Graniel-Castro et al., 2003).

En la ZMM se presenta un gradiente de alcalinidad de 200 mg/l a 400 mg/l de $CaCO_3$, donde el contenido de sales disueltas en el agua subterránea se incrementa hasta alcanzar concentraciones similares en cantidad y distribución iónica conforme se acerca a la costa (Villasuso y Méndez, 1997 en Bolio e Iracheta, 2014)

Considerando que el acuífero subyacente es la principal fuente de abastecimiento para la población, en la región XII de la PY su principal aprovechamiento según el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) es destinado principalmente a la agricultura (36 %), los usos múltiples (23 %), el uso público urbano (21 %), los servicios (17 %), la industria (2 %) y otros (1 %) (REPGA, 2010 en CONAGUA, 2012).

6.1.2. CLIMA

Los factores que configuran las condiciones climáticas principalmente en la zona son los vientos alisios, la sequía intraestival, las ondas del este, tormentas tropicales y huracanes, además de los vientos polares, nortes y la influencia de las altas presiones y las corrientes marinas (INEGI, 2002; Bolio e Iracheta, 2014).

De acuerdo con la clasificación climática de Wladimir Köppen-Geiger (1936) modificada por García (1964) para las condiciones específicas de México, en la PY básicamente se presentan dos tipos de clima. El clima uno abarca la parte central de la PY donde se encuentra la ZMM y corresponde a un clima cálido subhúmedo con lluvia en verano (Aw0, Aw1 y Aw2) el cual presenta una temperatura promedio anual mayor a $18^{\circ}C$ y precipitaciones pluviales que superan los 900 mm a^{-1} ; el clima dos abarca la franja noroeste de la PY y se le clasifica como seco (BS0) y semisecho (BS1) muy cálido con precipitaciones promedio a lo largo del año menores a 750 mm a^{-1} (INEGI, 2002; Bolio e Iracheta, 2014).

En la ZMM existe una variación de precipitación promedio anual que va desde 500 mm a⁻¹ en la zona costera del norte hasta 1,000 mm a⁻¹ en la zona del sur, con una temperatura promedio anual de 26.2 °C, variaciones máximas de temperatura de 40.6°C durante el mes de mayo y temperaturas mínimas de 14°C en el mes de enero (INEGI, 2002; Bolio e Iracheta, 2014; INEGI, 2010).

Considerando que el movimiento y ocurrencia de las aguas subterránea son parte fundamental del ciclo hidrológico y deduciendo que casi todos los acuíferos se originan a partir de la infiltración de la precipitación, el agua en la PY básicamente se haya distribuida en cuatro zonas de la estructura vertical del acuífero (**Figura 6.6**) (Bundsschuh et al., 2008).

1. Zona de evapotranspiración, cerca de la superficie y en la que únicamente los poros más pequeños están saturados de agua.
2. Zona intermedia, que se extiende desde la parte inferior de la zona insaturada hasta la parte superior de la zona capilar.
3. Zona capilar, que se halla entre el nivel freático y la altura determinada por el ascenso capilar del agua en el suelo.
4. Zona saturada, en la que los poros están completamente llenos de agua.

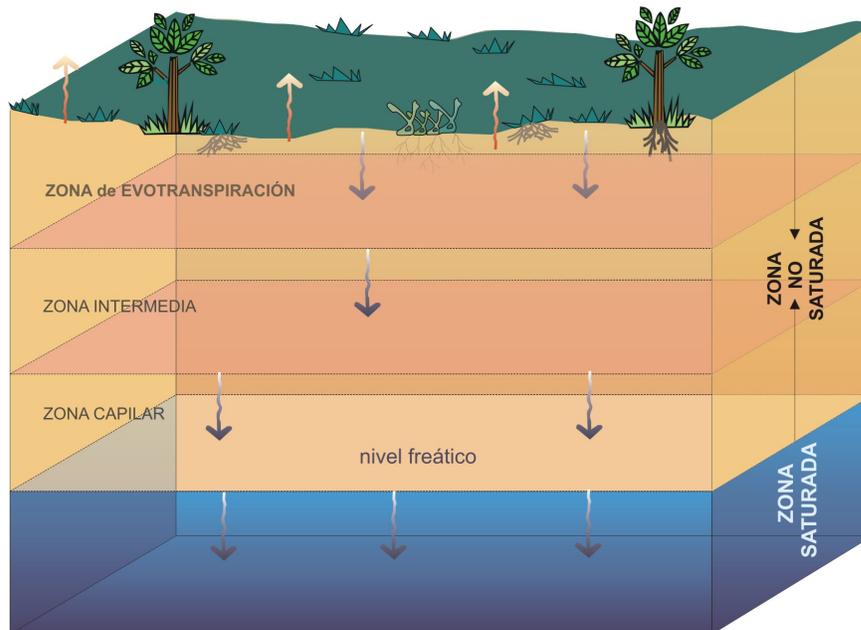


Figura 6.6: El agua en la estructura vertical (GEA, 2018)

Empleando la clasificación de Thornthwaite (1949), basada en la cesión de humedad y en la evapotranspiración potencial con datos climáticos (temperatura, longitud del día y precipitación), en la ZMM se presentan cuatro regiones espaciales de humedad de suelo (de 0 a 3 meses de humedad), determinadas utilizando el criterio de precipitación de un mes que supera a la evapotranspiración potencial de ese mes y obteniendo como diferencia el agua que ingresa al suelo superficial humedeciéndolo y posteriormente al acuífero (**Figura 6.7**).

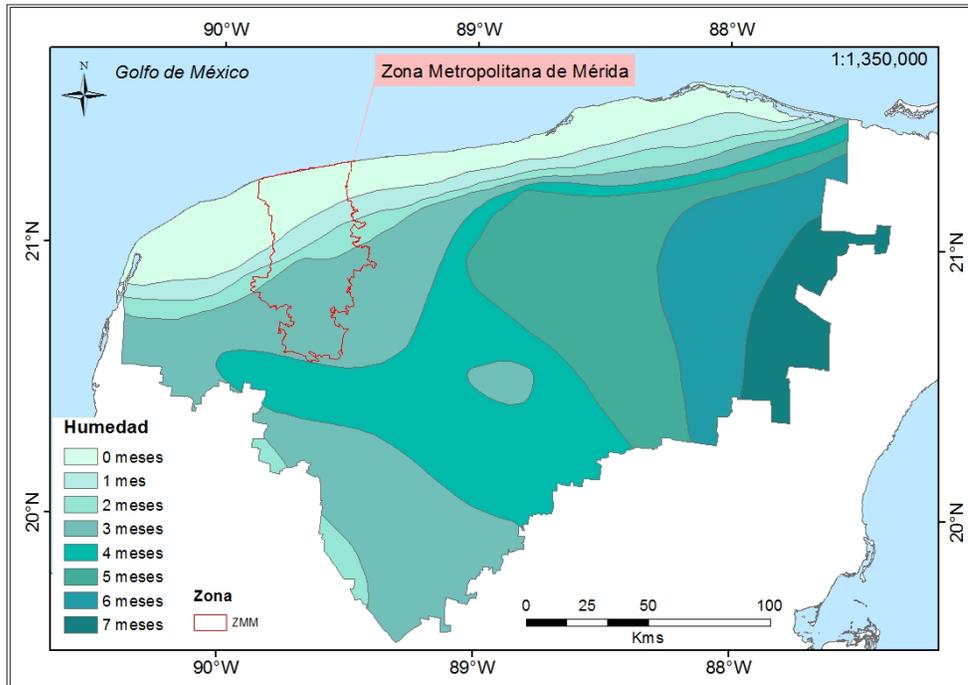


Figura 6.7: Número de meses húmedos.

6.1.3. EDAFOLOGÍA y GEOLOGÍA

En México no se cuenta con un sistema de clasificación de suelos propio por lo que se han adoptado y modificado las clasificaciones desarrolladas por otros países u organizaciones (FAO 1970 en IUSS et al., 2007) para tener información actualizada que permita la toma de mejores decisiones sobre manejo y uso de los suelos (Bautista et al., 2015).

De acuerdo con la clasificación de la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL, 1968) actualmente INEGI generada a partir de la modificación de la estructura propuesta por la FAO/UNESCO (1968), en Yucatán se perciben 12 unidades fisiográficas (Cambisoles, Feozems, Fluvisoles, Gleysoles, Histosoles, Litosoles, Luvisoles, Rendzinas, Nitosoles, Castañozems, Regosoles y Solonchaks) (Bautista et al., 2015; IUSS et al., 2007).

Debido a las características particulares de la PY los suelos se encuentran en “parques” de diversos tamaños, desde unos cuantos metros hasta varias hectáreas. Nunca en extensiones homogéneas de decenas de hectáreas. En la ZMM se pueden hacer dos clasificaciones, las zonas fisiográficas o sistemas edafológicos predominantes y los suelos impactados, escasos o débilmente desarrollados (**Figura 6.8**)

Suelos predominantes

Solonchak (Z) (del ruso *sol* = sal) se caracteriza por estar conformado principalmente de arena derivada del material calcáreo marino (11 % del de la ZMM) y ser un suelo salino o afectado por concentraciones de sales solubles en algún momento del año. Se encuentra ampliamente confinado a zonas climáticas áridas, semiáridas y regiones costeras. Su uso potencial para la agricultura es afectado por la acumulación excesiva de sales que impiden el crecimiento de las plantas (Bautista et al., 2015; IUSS et al., 2007).

Litosoles (L) (del griego *leptos* = delgado o fino) se caracterizan por ser suelos someros (con aproximadamente 10 cm de profundidad), extremadamente gravillosos y pedregosos. Se pueden encontrar particularmente en áreas fuertemente erosionadas con materiales no consolidados y sobre la roca continua (32 % de la ZMM) (Bautista et al., 2015; IUSS et al., 2007).

Rendzina (E) (24 % de la ZMM) son suelos someros fértiles (menos de 50 cm de profundidad) que contienen una capa superficial de humus (horizonte mólico) que descansa sobre roca caliza o algún material rico en cal (más de 53 %) y generalmente son arcillosos (Bautista et al., 2015; IUSS et al., 2007).

Suelos impactados, escasos o débilmente desarrollados

Están representados por la zona urbana (17 % de la ZMM), los cuerpos de agua marítimos e interiores (0.6 % de la ZMM) y el suelo tipo Regosol como un suelo débilmente desarrollados, sin horizonte mólico o úmbrico y con mínimo significado agrícola (5 % de la ZMM) (IUSS et al., 2007).

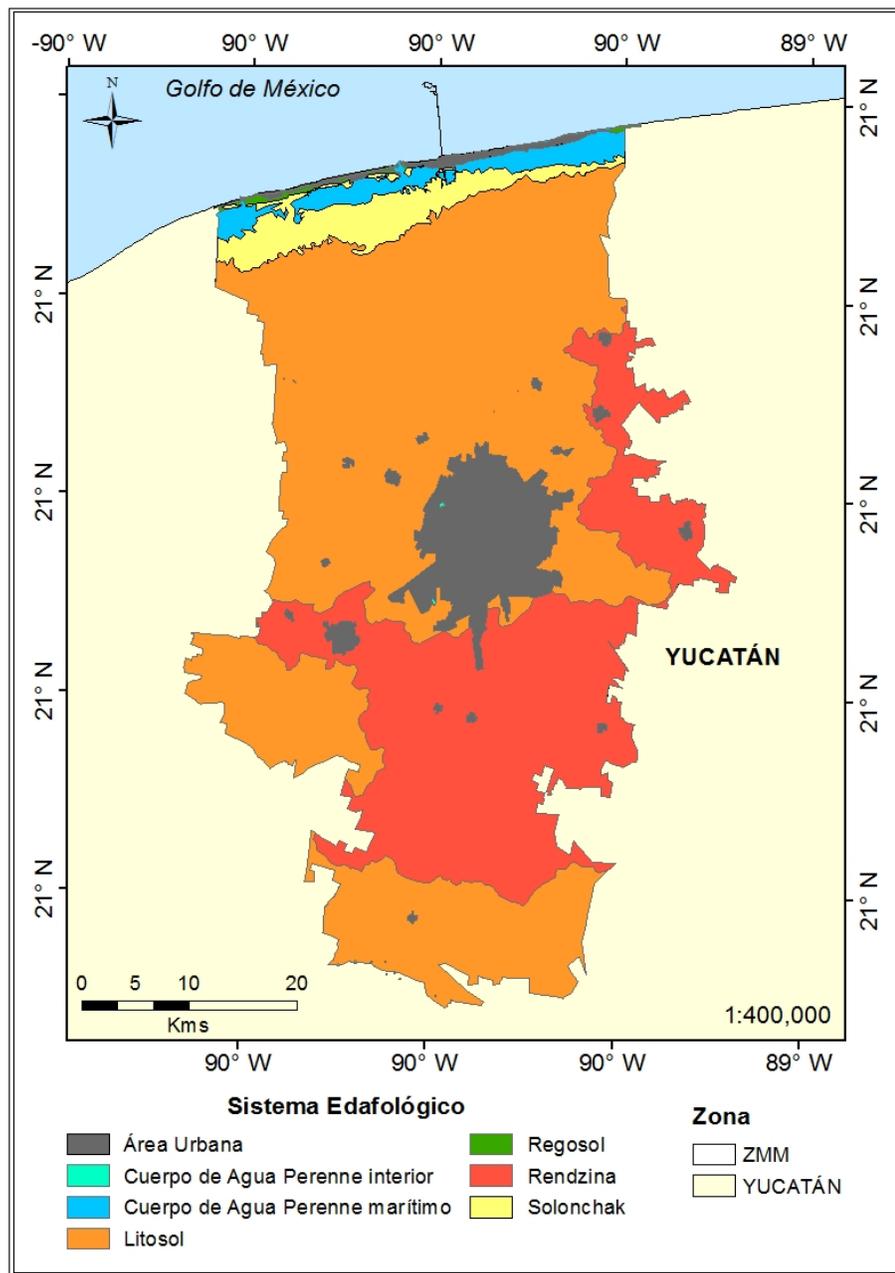


Figura 6.8: Clasificación edafológica en la ZMM (Bautista et al., 2015).

Respecto al relieve, el terreno donde se localiza la ZMM es predominantemente plano. Su altitud promedio es menor a 50 metros sobre el nivel medio del mar y solo en el sur de la PY se pueden encontrar elevaciones de hasta 200 msnmm (Sierra de Ticul) (INEGI, 2002).

El área presenta como característica cronoestratigráfica cuatro sistemas de roca sedimentaria, los estratos antiguos que corresponden al Terciario Eoceno (17% de la ZMM), consistentes a la sierra de Ticul al sur de la PY y localidades contiguas, los estratos del terciario Neógeno más reciente (33% de la ZMM), los estratos del Cuaternario Pleistoceno (39% de la ZMM) en la parte central y los estratos del Cuaternario Holoceno de la época actual (11% de la ZMM) en la zonas costeras del norte (**Figura 6.9**) (INEGI, 2002; Durán y Méndez, 2010).

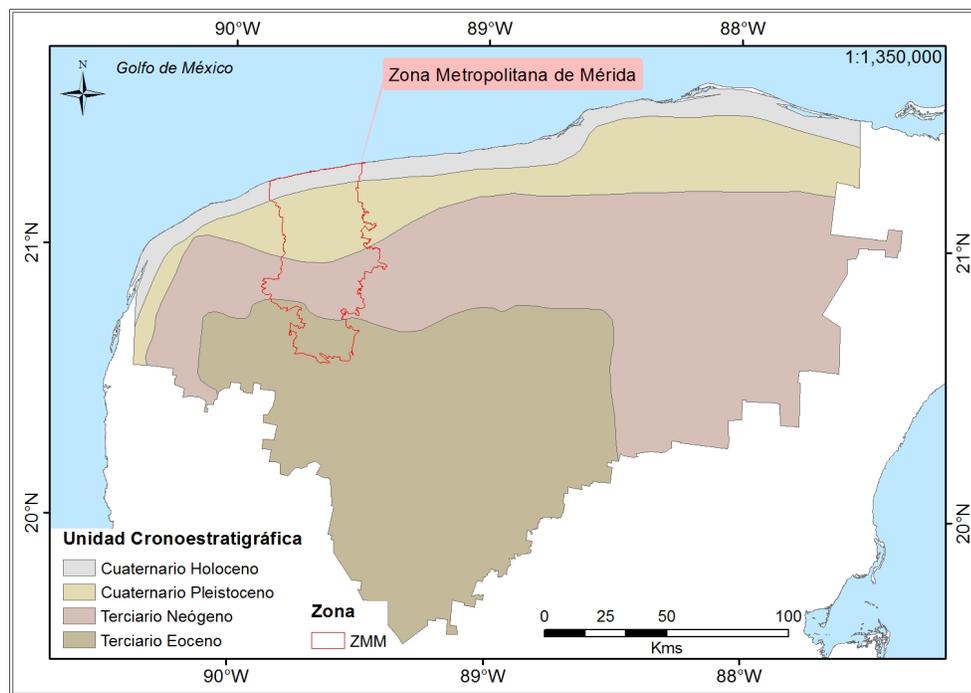


Figura 6.9: Unidades cronoestratigráficas en la ZMM y Estado de Yucatán.

La zona se caracteriza por tener un sustrato geológico compuesto por carbonatos de calcio y magnesio 90%, presentándose dos tipos de calizas superficiales, las calizas duras conocidas comúnmente como *laja* o *caltún* en maya y las calizas blandas denominadas como *sahkab* (tierra blanca) (Durán y Méndez, 2010).

6.1.4. RECURSOS NATURALES EN LA ZMM

En la antigüedad la principal actividad económica en la ZMM y en la PY se enfocaba en el cultivo de henequén (oro verde), siendo uno de los principales productos la fibra artesanal. Hoy en día gracias a la tecnificación agrícola en la región se cultiva también una gran variedad de frutos, verduras, semillas y otros (maíz, frijol, grano de sorgo, pastizal, tomate rojo y más) (Batllori, 1999 en Bolio e Iracheta, 2014).

Si bien, el desarrollo tecnológico y diversificación de técnicas en la producción ganadera, agrícola, porcícola y otras, ha impactado positivamente el desarrollo económico de la población, la escasa existencia de regulaciones para el manejo adecuado de los recursos, los dudosos mecanismos utilizados para hacer cambio y uso del tipo suelo, los altos índices de deforestación, la creciente ganadería extensiva, la aplicación de agricultura temporal itinerante (roza-tumba y quema), el acelerado crecimiento de la mancha urbana, la explotación de roca calcárea, entre otras problemáticas, ha repercutido negativamente en los recursos, llegando a ocasionar erosión, desertificación y el establecimiento de un ambiente árido cuando los elementos formadores del suelo (plantas y animales) son impactados (Batllori, 1999 en Delgado et al., 2009).

Es importante mencionar que en Yucatán la pérdida de suelo se considera irreversible debido a la poca cubierta edáfica existente. Cabe destacar, que su degradación facilita la alteración del ciclo hidrológico y progresivamente la degradación y pérdida de los recursos naturales (Batllori, 1999 en Bolio e Iracheta, 2014).

Debido a que los recursos y la biodiversidad se han visto severamente impactados, la mayor proporción de las especies y los ecosistemas que conforman la biodiversidad en el Estado y en general en México son objeto de protección en la norma *NOM-059-SEMARNAT-2010*, la cual tiene como objetivo identificar especies o poblaciones de flora y fauna silvestres que requieren alguna protección especial. En la ZMM se han señalado 26 especies de plantas en alguna categoría de protección, 72 especies de orquídeas, tres especies de anfibios, 23 especies de reptiles, 22 especies de aves, 14 especies de mamíferos, entre otras (Bolio y Iracheta, 2014).

Pese a la degradación de los recursos los factores naturales han favorecido la formación de ecosistemas o nichos para diversas formas de vida. En conjunto, en el área se ha identificado una diversidad de flora catalogada como vegetación xerófila, vegetación decidual tropical y selva espinosa o caducifolia, comúnmente asociada a suelos muy someros y pedregosos donde sólo algunos árboles alcanzan alturas máximas de 6 metros con algún valor comercial (caoba, cedro, ceiba, chaká, kitanché, roble, guarumo y otros) (INEGI, 2002; Bolio e Iracheta, 2014).

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) ha catalogado al Estado de Yucatán como uno de los Estados que presenta la mayor diversidad de aves del país, identificando 454 especies diferentes de las 548 registradas dentro de la PY, donde se encuentran especies silvestres como el faisán, loro, guacamaya, colibrí, ceniztonle, cardenal, ruiseñor, pájaro Toh, halcón, codorniz, chachalaca, entre otras. También una gran diversidad de organismos que cohabitan en el área como el murciélago zapotero, tejón, martucha, zorrillo, pecarí, mapache, serpiente, nutria, boa ratonera, rana, sapo, conejo, venado, tuza, zarigüeya, zorrillo, variedad de iguanas, tortugas, cocodrilos, entre otros (INEGI, 2002; MacKinnon, 2011 en Bolio e Iracheta, 2014).

En la ZMM se pueden identificar 9 principales variedades de ambientes (suelo, vegetación y cuerpos de agua) de gran importancia económica, como son: los cuerpos de agua perenne interior y marítimos donde se incluyen a los cenotes y ojos de agua que representan el 0.02 % del área y las ciénegas o lagunas inundables con el 3 % del área; la zona de popal y tular, vegetación de suelos arenosos, vegetación halófila y gipsófila, áreas sin vegetación aparente y manglar con el 6 %; el área urbana con el 8 %; la zona de manejo agrícola, pecuario y forestal (plantaciones) con el 42 % y la selva baja caducifolia y subcaducifolia con el 44 % (**Figura 6.10**).

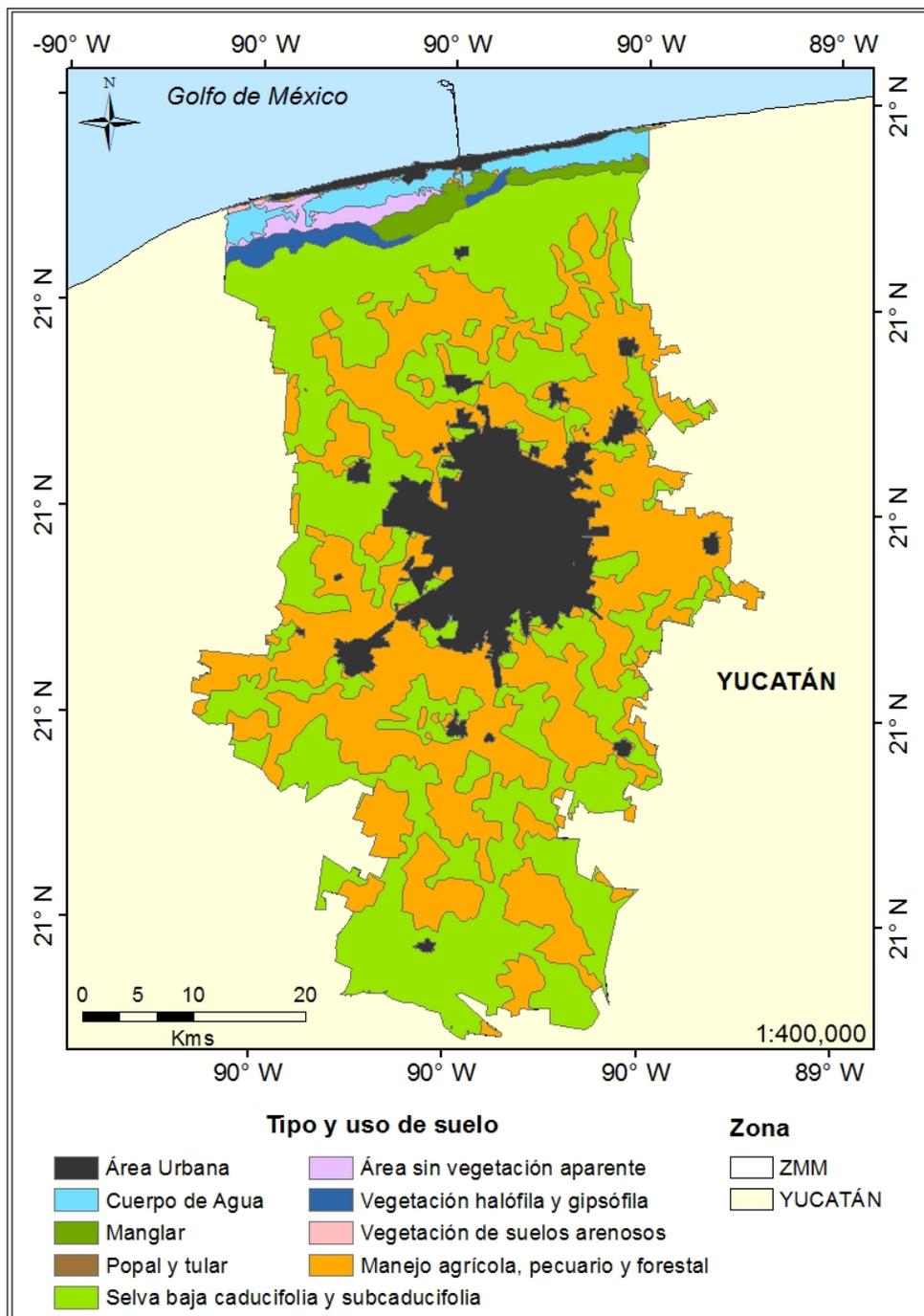


Figura 6.10: Clasificación del uso y tipo de suelo en la ZMM.

7. METODOLOGÍA

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados la presente investigación se dividió en cuatro etapas. Los métodos y técnicas utilizadas se describen a continuación.

7.1. ETAPA 1: LOCALIZACIÓN DE TC'S

Con base en la información existente en la literatura científica sobre la calidad de los suelos, tipo y uso de suelo, localización de zonas urbanas, generación de residuos sólidos, entre otra, en la ZMM se pudo hacer una recopilación de información para identificar las zonas propensas a encontrar TC's.

Mediante el trabajo de investigación, organización y considerando la norma *NMX-AA-132-SCFI-2006* para la toma de muestras en sitios riesgosos y suelos, una lista de instrumentos de medición, documentos de navegación y seguridad, condiciones climáticas locales, suministros adecuados para salidas de campo, la clasificación descrita por Árcega-Cabrera y Romero (2011) de las actividades económicas en la ZMM como fuentes contaminantes y la ayuda de imágenes satelitales obtenidas de forma compartimentada en cuatro bandas (verde, azul, roja e infrarrojo cercano además de la imagen pancromática), que permiten la eliminación de error focal, se procedió a buscar en forma de polígonos TC's en la ZMM.

Los sitios potenciales detectados en las imágenes satelitales fueron confirmados físicamente *in situ* y georreferenciados para determinar su dimensión aproximada y el volumen de residuos sólidos presentes, su clasificación respecto a su peligrosidad de acuerdo al porcentaje de desechos sólidos peligrosos y su crecimiento orgánico identificando los picos con mayor y menor densidad y altura, se consideró que a mayor lejanía del pico central y menor altura es menor el tiempo de existencia de esa sección del TC.

Dentro de cada TC se identificaron los puntos de alarma "hot spot", que contienen una alta concentración de generalmente una sola clase de residuos potencialmente peligrosos (lámparas ahorradoras, pilas, metales, entre otros) de acuerdo con las especificaciones descritas de la norma *NOM-052-SEMARNAT-2005*, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

Cada sitio fue dividido en 6 cuadrantes uniformes y dentro de cada cuadrante al azar se tomó una muestra, al finalizar la toma de muestras, éstas se mezclaron para crear una muestra compuesta y representativa de cada TC.

El análisis de la concentración de los EPT en las muestras compuestas del suelo subyacente de los TC's fueron los datos utilizados y evaluados mediante los lineamientos de normatividad nacional e internacional anteriormente descritos en la **Tabla 2.5 y 2.6** para los tres usos potenciales del suelo y así identificar el peligro que representa cada TC en la ZMM y el acuífero subyacente.

7.2. ETAPA 2: PRE-TRATAMIENTO DE MUESTRAS

La segunda etapa se enfocó en el trabajo de laboratorio para el análisis de las muestras. Se inició con la limpieza del material a utilizar, un análisis de granulometría, cuantificación de MO y GF, digestión ácida de los suelos asistida por horno de microondas y la determinación de la concentración de EPT en suelo mediante el análisis de absorción atómica con un espectrómetro acoplado a horno de grafito o generador de hidruros dependiendo del elemento (THGA AAS).

Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio de Ciencias Ambientales Costeras de la Unidad de Química de Sisal (Facultad de Química), ubicada en las instalaciones de la Unidad Académica Yucatán (UAY) en el municipio de Hunucmá, Estado de Yucatán, México.

En el laboratorio el pretratamiento de las muestras inicio con la separación de los suelos en dos partes para su análisis:

Primera parte.

Parte del suelo se dejó extendido en charolas de aluminio las cuales se introdujeron a una estufa con ventilación (Binder M 53-53-720) a una temperatura de 40 °C para su secado y posterior análisis granulométrico.

Segunda parte.

Se colocó el suelo en moldes de plástico (previamente rotulados) utilizados para crear cubos de hielo y fueron almacenados a -70 °C en un equipo de ultra-congelación (Thermo Scientific) por 24 hrs. Posteriormente las muestras fueron secadas mediante el proceso de liofilizado con un equipo Labcono de vacío y enfriamiento. Finalmente, las muestras fueron almacenadas en bolsas tipo Ziploc en el anexo de sedimentología (lugar fresco) para su resguardo de la luz y posterior análisis.

Los procedimientos experimentales utilizados para el análisis de las muestras de TC's presentes en la ZMM y la obtención de la concentración total de EPT se muestran en el siguiente diagrama (**Figura 7.11**).

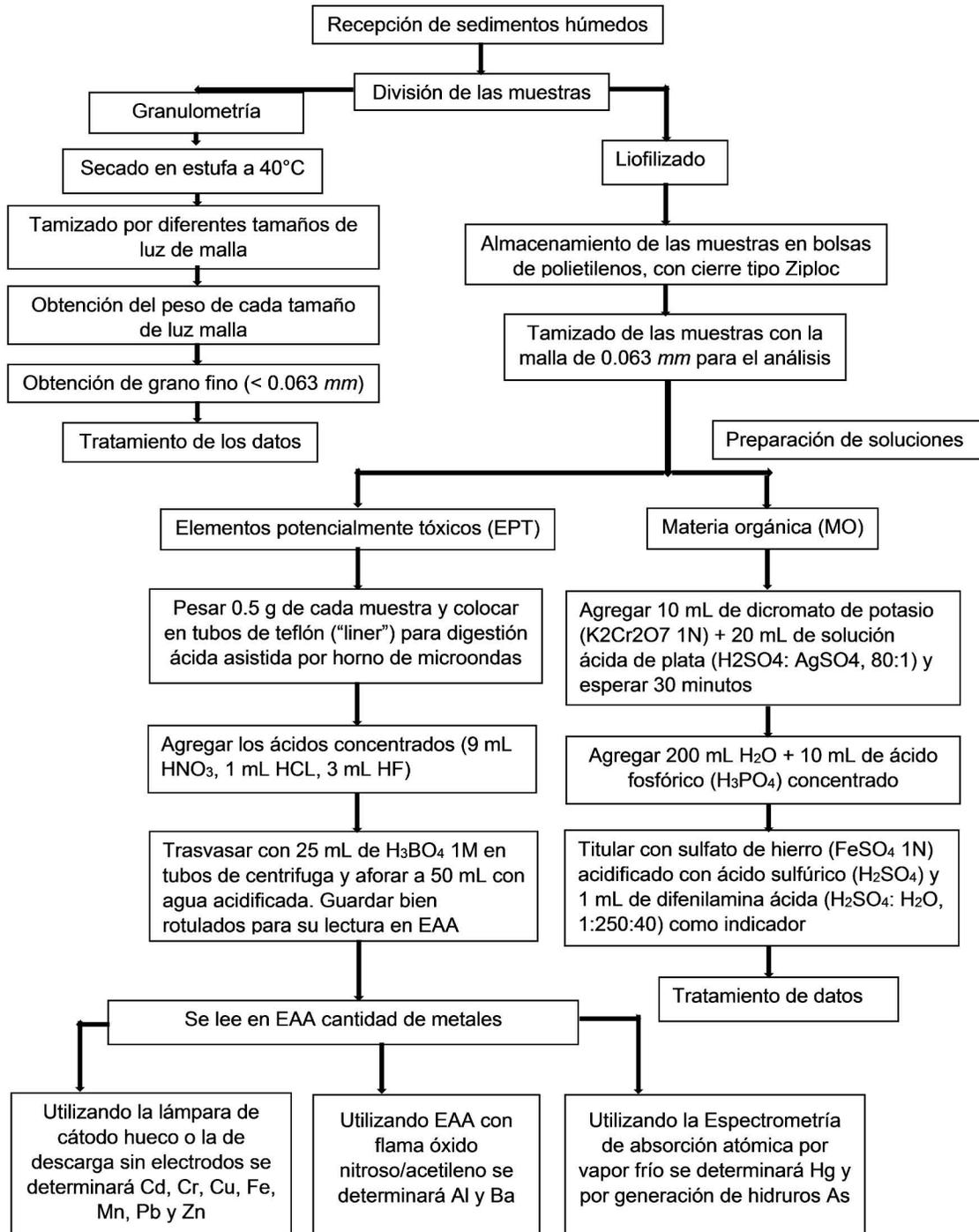


Figura 7.11: Diagrama de flujo de los procedimientos seguidos en el laboratorio para el análisis de las muestras y la obtención de la concentración total de EPT, GF y MO.

7.2.1. LIMPIEZA DE MATERIAL

Para la limpieza del material se siguieron las especificaciones propuestas por la norma *NMX-AA-051-SCFI-2001* que se enfoca en la determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas, todo el material usado para la determinación de la totalidad de los EPT fue exclusivo para el procedimiento y tuvo el mismo tratamiento de lavado.

Para el lavado de material de cristal se remojó durante una hora en una disolución de ácido nítrico al 10 % y se enjuago con agua destilada tipo 1 (Desionizada, tratada con oxidación de UV y pasada por un filtro de 0.2 micras con una resistividad de 18.2 Ohms).

7.2.2. MÉTODO DE GRANULOMETRÍA

El análisis granulométrico (graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria) inicio empleando las muestras que fueron secadas por la estufa y por medio de un tamizado (tamices acoplados en cascada) se determinó la fracción de limos y arcillas $< 63\mu$ a la cual se adsorben de manera preferencial los EPT.

Se emplearon tamices de la marca Fieldmaster (**Figura 7.12a**) de los siguientes tamaños de luz de malla: 500μ , 250μ , 125μ , 63μ y $< 63\mu$.



(a) Tamiz Fieldmaster.



(b) Balanza de precisión Ohaus

Figura 7.12: Herramientas utilizadas para la cuantificación y clasificación de los suelos muestreados en los TC's de la zona de ZMM.

Las fracciones se pesaron con una balanza marca Ohaus de precisión ± 0.01 g (**Figura 7.12b**) y se almacenaron en bolsas de plástico tipo Ziploc para su posterior análisis.

7.2.3. CUANTIFICACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

Para la determinación de carbono orgánico total (COT) se utilizó el método de oxidación húmeda con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y titulación con sulfato ferroso ($FeSO_4$) de Walkley con modificaciones de Byers (1978).

Se inició con el pesado de 0.5 g en la balanza Ohaus de suelo liofilizado y tamizado a través de la malla $< 63\mu$ (limos y arcillas), la utilización de reactivos de grado analítico y el empleo de agua destilada tipo 1 (Desionizada, tratada con oxidación de UV y pasada por un filtro de 0.2 micras con una resistividad de 18.2 Ohms.).

El procedimiento fue:

1. Se colocó el suelo en un matraz Erlenmeyer de 500 mL, se agregaron 10 mL de solución de $K_2Cr_2O_7$ (1N), más 20 mL de solución ácida de plata (H_2SO_4 : $AgSO_4$, 80:1), después de agitar y reposar por 30 min se agregaron 200 mL de H_2O tipo 1, más 10 mL de H_3PO_4 concentrado.
2. Se valoró cada muestra con $FeSO_4$ (1N) acidificado con H_2SO_4 agregado a cada matraz y antes de la titulación 1 mL de solución de difelinamina ácida (Dif: H_2SO_4 : H_2O , 1:250:40) como indicador de termino de titulación.
3. Para estandarizar el procedimiento se preparó un blanco que lleva el mismo tratamiento, pero sin agregar suelo y a partir del volumen de sulfato ferrosos gastado se calculó el factor F, que se empleó para conocer el contenido de carbono orgánico de las muestras.

El cálculo se realizó considerando que 1 mL de $K_2Cr_2O_7$ es equivalente a 3 mg de carbono (**Ecuación 7.1**):

$$COT^{10}(\%) = \frac{[10 - (V2 * F)] * 0.3}{g \text{ de suelo}}; \quad F = \frac{10}{V1} \quad (7.1)$$

F = Factor del sulfato ferroso

V1 = Volumen de sulfato ferroso empleado en la titulación del blanco

V2 = Volumen de sulfato ferroso empleado en la titulación

4. La determinación de COT de cada muestra se realizó por duplicado ¹.

Los resultados obtenidos determinaron la cantidad de MO y GF presentes en cada uno de los TC'S analizados.

¹En el caso de presentar una diferencia igual o mayor a 0.2 mL entre réplicas se repite la determinación.

7.2.4. DIGESTIÓN ÁCIDA ASISTIDA CON HORNO DE MICROONDAS

El análisis y procedimiento de digestión ácida está sujeto a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2003 (DOF, 2003) y los procedimientos descritos por Árcega Cabrera et al. (2009, 2010, 2014a, 2014b y 2016) y Loring y Rantala (1992). Este método se basa en la descomposición de muestras de suelo por medio de ácidos mediante la asistencia de un horno de microondas. Es considerado como un método rápido y multielemental.

La técnica empleada fue la siguiente:

1. Se pesaron con precisión 0.5 g de suelo fino, menor a 0.063 mm de diámetro, así como de material de referencia (Material de referencia 1646a del National Institute of Standards and Technology - NIST) y se transfirieron a tubos de teflón “liners” de 100 mL (**Figura 7.13a**).
2. Se agregó a cada tubo “liners” tres ácidos distintos con orden específico y pipeta específica, con excepción del tubo del sensor ² de temperatura debido a que es de vidrio y en presencia de ácido fluorhídrico se corroe (**Figura 7.13b**).

Los ácidos fueron: 1 mL de HCl (grado analítico concentrado, 36–38 % de pureza) con pipeta de vidrio de 5 mL, 9 mL de HNO₃ (grado analítico concentrado 69–70 % de pureza) con pipeta de vidrio de 10 mL y 3 mL de HF (grado analítico concentrado, 99 % de pureza) con pipeta de plástico de 5 mL con excepción del tubo del sensor.



(a) Tubo “liners”, tapa con rosca y tapones



(b) Sensor de temperatura, tubo “liner” y chaqueta



(c) Ensanchador de juntas de teflón

Figura 7.13: Dispositivos utilizados para la determinación ácida EPT.

²El tubo del sensor se cerró por completo y luego se abrió con un ángulo de 45 grados para evitar error de lectura.

3. Se colocaron los tubos “liners” en la protección (chaquetas), se encapucharon con juntas de teflón expandidas con un dispositivo especial (**Figura 7.13c**), se cubrieron con tapas de rosca (caperuzas) para evitar escurrimiento dentro del equipo y se colocaron dentro en el rotor (**Figura 7.14a**).
4. Se colocó el rotor con muestras en la cámara del horno y se programaron las temperaturas y condiciones potenciales para el proceso de digestión en el horno de microondas “SYNTOS 3000” (Microwave reaction system) (**Figura 7.14a**). La programación de temperatura se muestra en la **Tabla 7.7**.

Tabla 7.7: Condiciones para el proceso de digestión ácida en el horno de microondas.

Condiciones de temperatura y potencia para la digestión ácida de sedimentos en horno de microondas (EPA 3052/16)				
Fases	Temperatura (°C)	Rampa (min)	Tiempo de retención (min)	Ventilación
1	180	0	5	0
2	190	0	20	1
3	0	0	20	3
Ir*=160 °C; potencia 1200 w; presión 0.5 bar s ⁻¹				
*ir= Máxima temperatura permitida en el sensor externo del rotor				
EPA 3052/16 = Clave del método empleado en el laboratorio				

5. Una vez terminado el proceso se dejó enfriar las muestras para evitar quemaduras, se sacaron del horno y se abrieron bajo una campana de extracción para evitar intoxicación y quemaduras por vapor del ácido.
6. Los extractos fueron transferidos a tubos de centrifuga graduados, rotulados y aforados a 50 mL con una solución de 1M de H₃BO₃ (**Figura 7.14b**).



(a) Rotor



(b) Tubo de centrifuga

Figura 7.14: Rotor y tubos de centrifuga empleados para el análisis de las muestras de suelo de los TC's.

7.2.5. DETERMINACIÓN DE EPT POR THGA AAS

La concentración de EPT se determinó mediante la lectura de absorbancia en el espectrómetro de absorción atómica Aanalyst 800 de Perkin Elmer THGA AAS (**Figura 7.15**), acoplado al horno de grafito o generador de hidruros dependiendo del elemento analizado.



Figura 7.15: Espectrómetro de absorción atómica Aanalyst 800 de Perkin Elmer THGA AAS, avalado por NIST.

Para el control de la técnica se utilizó como material de referencia el Mat.1646a avalado por el NIST.

El procedimiento inicia cuando se lleva a cabo una atomización del analito (muestra) en una matriz líquida utilizando un nebulizador (pre-quemador) o cámara de nebulización para crear una niebla de la muestra, lo que permite la observación, selección y medición de su espectro de absorción de luz (anexo 8.5).

Se utilizaron técnicas como:

1. Espectrometría de absorción atómica con flama aire/acetileno, óxido nitroso/acetileno FAAS (flame atomic absorption spectrometry)
2. Espectrometría de absorción atómica por generación de hidruros y vapor frío HGAAS (hydride generation atomic absorption spectrometry)
3. Espectrometría de absorción atómica acoplada a horno de grafito GFAAS (graphite furnace atomic absorption spectrometry)

El método se basa en la producción de átomos libres del analito los cuales absorben radiación de una longitud de onda específica de resonancia (espectro electromagnético) y a una temperatura de calentamiento (acondicionamiento, eliminación del disolvente, pirolisis, atomización y calcinación) específica de cada lámpara se determina el grado de absorción de luz proporcional a la densidad de los átomos encontrados.

La cuantificación los EPT se llevó a cabo de acuerdo a la norma *NOM-117-SSA1-1994* con el método de absorción atómica con espectrometría, relacionada con el análisis instrumental de la muestra (analito). Para la determinación de Al, Ba, Cu, Cr y Fe se utilizó una lámpara de cátodo hueco lumina HCL (Hollow Catode Lamp) y para la lectura de As, Cd, Hg, Pb y Zn se utilizó una lámpara con adaptador electrónico EDL (Electrodeless Discharge Lamp).

Los valores obtenidos fueron comparados contra la norma *NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004* bajo los criterios para remediar sitios contaminados y la **Tabla 8.11** de los valores límite elegidos como importantes, lo que permitió la identificación de los sitios específicos que presentan un peligro para la ZMM. Su concentración permitió continuar con el análisis, la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca (natural) de la ZMM utilizando el método *DRASTICmod* y obtención del riesgo potencial.

7.3. ETAPA 3: PRESIÓN AMBIENTAL POR EPT

La tercera etapa del trabajo se enfocó en la obtención de la presión ambiental (riesgo potencial) mediante la evaluación del producto del peligro representado como una *concentración categórica* de los EPT con base en la normatividad utilizada para los tres usos potenciales del suelo de los TC's y la *vulnerabilidad intrínseca* representada sólo por las variables ambientales (físicas) de la ZMM y el acuífero subyacente.

El análisis se visualizó por medio de la generación de mapas temáticos de vulnerabilidad, clasificación categórica del peligro y la presión ambiental (riesgo potencial).

7.3.1. VULNERABILIDAD INTRÍNSECA

Para el estudio se utiliza el concepto de vulnerabilidad intrínseca $V(x, t)$ expresado como (**Ecuación 7.2**):

$$V(x, t) = V[X(x), F(x, t) // P(I(x, t)), C(x, t), M(x, t) //] \quad (7.2)$$

{ //.....//; bajo condición }

En donde:

$V(\mathbf{x}, t)$ = Es la vulnerabilidad de un lugar (x) y tiempo (t) determinado.

(\mathbf{x}) = Es la ZMM.

(t) = Es el tiempo actual (presente).

$F(\mathbf{x}, t)$ = Son los factores físicos representados por los parámetros geodácticos en un lugar (x) y tiempo (t) determinado.

$P(I(\mathbf{x}, t))$ = Es el peligro representado por los TC's con una severidad ($I(x, t)$) determinada (EPT).

$C(\mathbf{x}, t)$ = Es la capacidad de resiliencia ante un peligro determinado $P(I(x, t))$.

$M(\mathbf{x}, t)$ = Son las características ambientales intrínsecas (naturales) de un lugar (x) en un tiempo (t) determinado.

Considerando la existencias de los TC's como el peligro $P(I(x, t))$ y debido a que la escala y las características del sistema que hacen que técnicamente y financieramente sea extremadamente complejo implementar planes de restauración en el acuífero se considera la capacidad de resiliencia o restauración $C(x, t)$ insuficiente, por consiguiente, para conocer el grado de vulnerabilidad intrínseca “*natural*” de la ZMM el concepto se simplificó de la siguiente manera: $V(\mathbf{x}, t) = V(X(\mathbf{x}), F(\mathbf{x}, t))//M(\mathbf{x}, t)//$.

Para el análisis se emplearon sólo los factores físicos $F(x, t)$ y características ambientales $M(x, t)$ de la ZMM y el acuífero subyacente (geología, tipos y uso de suelo, edafología, nivel del manto freático, entre otras). Los datos fueron obtenidos principalmente del INEGI (2010) y fueron procesados utilizando el método de superposición de índices *DRASTIC* desarrollado por Aller et al. (1987) para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y modificado por Akram y Basheer (2011).

Se eligió el método con base en su eficiente análisis de vulnerabilidad y sus tres supuestos, su sencilla formulación y la facilidad de integrar sus factores dentro del Sistema de Información Geográfica (SIG) (Aller et al., 1987; Rahmna, 2008 en Albornoz-Euán et al., 2015).

El método hace una clasificación numérica de variables ambientales para evaluar la vulnerabilidad que se presenta en alguna zona determinada. Con el producto se pueden generar categorías para cuantificar el grado de vulnerabilidad ante cualquier peligro que presente una amenaza para los recursos naturales o la zona y poder llevar a cabo las estrategias pertinentes para su cuidado, aprovechamiento o restauración.

El método emplea siete variables naturales según el acrónimo *DRASTIC*:

D: Depth (Profundidad del agua subterránea).

R: Recharge (Recarga neta).

A: Aquifer (Litología del acuífero).

S: Soil (Tipo de suelo).

T: Topography (Topografía).

I: Impact (Naturaleza de la zona no saturada).

C: Hydraulic Conductivity (Conductividad hidráulica del acuífero).

El método *DRASTIC* asigna un índice de vulnerabilidad “r”, con un intervalo del 1 al 10, donde 1 es mínima vulnerabilidad y 10 máxima vulnerabilidad para cada una de las características presentes de cada variable analizada del sistema y evalúa a la variable y su influencia en el medio mediante la asignación de pesos “w” como valor de ponderación, con un intervalo del 1 a 5, donde 1 es mínima influencia y 5 máxima influencia en el sistema.

Ambos índices se multiplican y se suman en la siguiente expresión (**Ecuación 7.3**):

$$\begin{aligned} DRASTIC = [D_r * D_w] + [R_r * R_w] + [A_r * A_w] + [S_r * S_w] \\ + [T_r * T_w] + [I_r * I_w] + [C_r * C_w] \end{aligned} \quad (7.3)$$

En donde:

r: Indica el factor de clasificación o valoración de cada característica dentro de la variable.

w: Indica el factor de ponderación para cada variable según su influencia en el sistema.

Para el análisis el método se modificó según las variables ambientales presentes en la ZMM y las características de cada una de ellas en el sistema (**Tabla 7.8**) considerando las modificaciones descritas por Pérez-Ceballos y Pacheco-Ávila (2004) y las modificaciones descritas por Albornoz-Euán et al. (2015), la información descrita por Agüero-Valverde y Pujol-Mesalles, 2000, los criterios recomendado por Rahman, 2008 y los valores propuestos por el Servicio Geológico de Estados Unidos USGS (United States Geological Survey) para variables ambientales con el método *DRASTIC* y las recomendaciones de Shirazi et al. (2012) y fueron:

- Inf:** Índice de nivel freático. Está determinado por la variación respecto a la profundidad de la tabla de agua. Los índices “r” se asignan de acuerdo a la profundidad de la tabla de agua sobre el nivel medio de la superficie del suelo (a menor profundidad de la superficie mayor es el valor del índice y viceversa).
- Ip:** Índice de precipitación. Los índices “r” se asignaron de acuerdo con la cantidad mínima de precipitación presente en la zona (a mayor precipitación mayor flujo de arrastre de EPT).
- Ihs:** Índice de humedad de suelo. Está determinado por la cantidad agua en retención (intersticial) en la ZMM. Los índices “r” se enfocaron a la zona que presenta mayor retención de humedad (a mayor humedad mayor solubilidad y movilidad de EPT).
- Ief:** Índice edafológico. Está determinado por el tipo de suelo presente en el sistema y el parámetro geodáfico textura de suelo. Los índices “r” se enfocaron a la capacidad de retención de EPT en los suelos en función de la cantidad de MO y GF y la perturbación antropogénica (los suelos arcillosos son menos permeables que los arenosos).
- Ig:** Índice geológico. Está determinado por el tipo de sistemas cronoestratigráfico de la ZMM. Los índices “r” se enfocaron a sus características de permeabilidad, dureza, constitución y etapa geológica, asignando el menor valor al sistema más antiguo. Se consideró el parámetro geodáfico mineralogía de arcillas y capacidad de intercambio que en ausencia de MO disuelta o sólida controlarán la movilidad de los EPT (**Figura 1.2b**).
- Its:** Índice de tipo y uso de suelo. Está determinado por las características y los usos de los suelos en la ZMM. Los índices “r” se enfocaron según el sistema edafológico, la perturbación antropogénica y MO (entre más perturbado y menos MO mayor infiltración de EPT).
- Iad:** Índice de alcalinidad y dureza de agua. Los índices “r” se asignaron de acuerdo con la cantidad mínima de concentración de sales disueltas en la ZMM. Se consideró el parámetro geodáfico de pH y la conductividad por su relevancia en la movilidad y biodisponibilidad de EPT en el intercambio de cationes y la formación de compuestos más estables.
- Ifa:** Índice de fracturas. Los índices “r” se asignaron por la cantidad de fracturas en la roca de los ZMM (a mayor fracturas mayor infiltración y arrastre de EPT).

El método *DRASTIC* se modificó de la siguiente manera (**Ecuación 7.4**):

$$DRASTIC_{mod} = [Inf_r * Inf_w] + [Ipr * Ipw] + [Ihs_r * Ihs_w] \quad (7.4) \\ + [Ief_r * Ief_w] + [Igr * Ig_w] + [Iad_r * Ida_w] + [Ifa_r * Ifa_w]$$

Tabla 7.8: Asignación de índices “r” y pesos “w” mediante el método *DRASTIC_{mod}* a las variables ambientales de la ZMM.

Variables	Índice “r” del método “DRASTIC _{mod} ”										Pesos de ponderación “w”
	1 mínima vulnerabilidad				10 máxima vulnerabilidad						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1 - 5
Nivel freático en m (Inf)						20	10	4	2	1	5
Precipitación en mm (Ip)						125 - 400	400 - 600	600 - 800	800 - 1200	1200 -1500	4
Humedad de suelo (Ihs)						0 meses	1 meses	2 meses	3 meses	Cuerpo de agua	4
Edafología (Ief)					Rendzina	Litosol	Solonchak	Regosol	Área urbana	Cuerpo de agua	5
Geología (Ig)							Cuaternario reciente	Cuaternario pleistoceno	Terciario superior	Terciario eozeno	3
Tipos y Uso de Suelo (Its)		Manglar	Popal y tular	Vegetación halófila y gipsófila	Vegetación de suelos arenosos	Selva baja caducifolia y subcaducifolia	Manejo agrícola, pecuario y forestal (plantaciones)	Áreas sin vegetación aparente	Área urbana	Cuerpo de agua	5
Alcalinidad (Ia)								300 - 400	200 - 300	<200	4
Fallas y fracturas (Ifa)									Suelo	Fractura	5

Los resultados obtenidos mediante el método *DRASTIC_{mod}* se procesaron para elaborar el mapa de vulnerabilidad intrínseca (**Figura 8.33**) y la **Tabla 8.18** de vulnerabilidad. Su obtención permitió clasificar la ZMM en zonas de alta, media y baja vulnerabilidad.

7.3.2. CLASIFICACIÓN CATEGÓRICA DE LOS EPT Y LOS TC'S

Para el estudio se empleó el concepto de peligro $P(x, t)$ expresado como (**Ecuación 7.5**):

$$P(x, t) = P[X(x), I(x, t), T(I(x, t)), Pr(I(x, t))] \quad (7.5)$$

En donde:

\mathbf{x} = Representan las coordenadas del sitio X en un tiempo (t) determinado.

$\mathbf{Pr(I(x, t))}$ = Representa la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno con grado de severidad determinado $I(x, t)$.

$\mathbf{T(I(x, t))}$ = Representa la temporalidad de la severidad $I(x, t)$.

Para el análisis de peligro el factor $X(x)$ se representó por los TC's analizados en la ZMM, el factor de temporalidad $T(I(x, t))$ y probabilidad de ocurrencia $Pr(I(x, t))$ se consideró constante y alta respectivamente al comprobar *in situ* la existencia de los TC's.

CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN

Para la evaluación de la presión ambiental mediante el factor de intensidad o severidad $I(x, t)$ se consideró realizar una clasificación categórica del peligro considerando la concentración total de los EPT analizados en cada TC's de acuerdo con los tres usos potenciales del suelo (residencial, industrial y comercial) y la normatividad nacional e internacional anteriormente descrita (**Tabla 2.5 y 2.6**).

Los EPT fueron clasificados en **bajo**, **medio** y **alto** mediante los siguientes criterios: 1) la concentración de los EPT es mayor o igual a la norma establecida (**alto**), 2) la concentración de los EPT se encuentra 10% por debajo de la norma establecida (**medio**) y 3) la concentración de los EPT se encuentra 20% por debajo de la norma establecida (**bajo**). Así también, los TC's se clasificaron mediante rangos en **1**, **2** y **3**, donde: 1) más de la mitad de los EPT analizados en cada TC superan el LMP (**1**), 2) la mitad de los EPT analizados en cada TC superan los LMP (**2**) y 3) menos de la mitad de los EPT analizados en cada TC no superan los LMP (**3**).

Los resultados obtenidos en el análisis se procesaron y se evaluaron con el factor vulnerabilidad intrínseca para así poder identificar la presión ambiental que ejercen los EPT en la ZMM y el acuífero subyacente.

7.3.3. PRESIÓN AMBIENTAL (RIESGO POTENCIAL)

Para la evaluación de la presión ambiental se empleó el concepto de riesgo potencial expresado como el producto del peligro por la vulnerabilidad, es decir (**Ecuación 7.6**):

$$Riesgo(x, t) = [Peligro P(I(x, t))] * [Vulnerabilidad V(x, t)] \quad (7.6)$$

Es importante mencionar que para poder describir el riesgo potencial es necesario estrictamente contar con los dos factores, la vulnerabilidad $V(x, t)$ y el peligro $P(I(x, t))$, en ausencia de uno de los factores el riesgo es nulo.

Para la identificación y clasificación la presión ambiental se utilizó un cuadro latino simétrico (la variables puede estar en los renglones o columnas) utilizando la **clasificación categórica de los EPT** (factor peligro) y la **vulnerabilidad intrínseca** representada sólo por las características físicas ambientales de la ZMM, el cuadro se expresó de la siguiente manera (Ocada, 2004):

Tabla 7.9: Clasificación del riesgo potencial.

Presión ambiental (Riesgo Potencial) R = (V * P)		Vulnerabilidad Intrínseca (V)		
		Bajo	Medio	Alto
Clasificación categórica de EPT (P)	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	Medio	Medio	Medio	Alto
	Alto	Medio	Alto	Alto

Bajo los criterios anteriormente descritos los resultados se procesaron y analizaron obteniendo la **Tabla 8.35**, así también, se representaron en forma de mapas temáticos en la **Figura 10.36, 10.37 y 10.38**.

7.4. ETAPA 4: GENERACIÓN DE MAPAS

Para generar el mapa vulnerabilidad intrínseca, clasificación categórica y presión ambiental (riesgo potencial) en la ZMM ante el impacto de los EPT se consideró como herramienta básica la utilización del software ArcGis 10.1.

Su bajo costo y fácil manejo permite hacer la representación geoespacial de los datos y las variables analizadas, identificar sitios vulnerables a la contaminación y dar herramientas que permitan el manejo y toma de decisiones sobre los recursos naturales.

Para el análisis geoespacial se utilizó como herramienta base *Algebra de Mapas* del software ArcGis 10.1, capas vectoriales y capas raster de datos geográficos disponibles en línea del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SDS) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

El procesamiento de los datos básicamente siguió los siguientes pasos:

1. Abrir software ArcMap 10.1.
2. Se coloca la proyección geográfica con que se va a trabajar.
3. Se localizan todas las capas (variables analizadas) tipo polígono para trabajar.
4. Se genera la zona de estudio (polígono de interés utilizado para delimitar) con un nuevo archivo tipo "Shape".
5. Se extraen los datos de interés por medio de la zona de estudio creada (ejemplo, extracción de datos edafológicos delimitados por la zona de estudio).
6. Una vez obtenido el recorte de interés se asignan los índices generados por la metodología *DRASTICmod* a las características de la variable mediante la tabla de atributos "Attribute Table".
7. Se agrupan las clases con base en los índices asignados.
8. Se localiza el recorte procesado con los índices agrupados por clase y se transforma el recorte tipo vectorial a archivo tipo raster.
9. Se clasifica mediante rangos de vulnerabilidad las sumatoria de los raster.
10. Se genera un mapa con las características deseadas.

En el siguiente diagrama se muestra el concepto general del procedimiento para obtener los mapas temáticos de la ZMM:

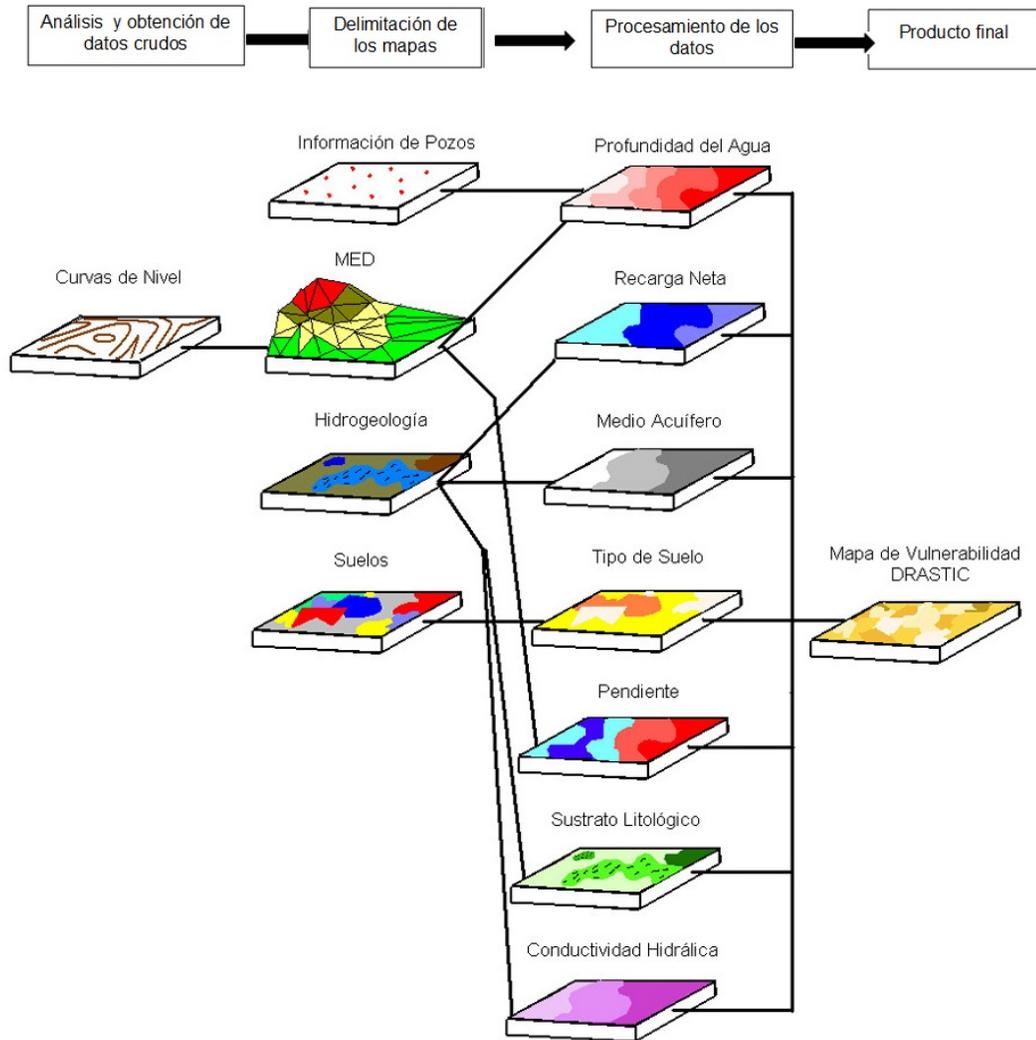


Figura 7.16: Diagrama de flujo para la generación de mapas temáticos en la ZMM. Diagrama parcialmente modificado de Agüero-Valverde y Pujol-Mesalles, 2000.

8. RESULTADOS

8.1. LOCALIZACIÓN DE LOS TC's EN LA ZMM

Mediante la utilización de las imágenes satelitales y los criterios anteriormente descritos se analizaron y evaluaron 18 TC's en la ZMM.

En cada TC's se identificó la concentración de los EPT mediante la técnica analítica de espectrofotometría de absorción atómica acoplada a horno de grafito y/o flama aire-acetileno y como resultado se obtuvo la **Tabla 8.10**.

Tabla 8.10: Concentración de EPT y variables geoquímicas en los TC's de la ZMM.

Coordenadas			Elementos potencialmente tóxicos y variables geoquímicas (mg/kg)													
X	Y	ID	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Pb	Sn	V	Zn	MO	GF
-89.70965	20.71610	2A	110	16	305	1	301	45	107	0	36	4	118	62	649	2235
-89.70965	20.71610	6C	162	2	75	2	89	94	274	0	203	19	39	184	352	2123
-89.70965	20.71610	5B	148	2	21	1	42	7	89	0	76	43	46	11	459	2182
-89.58912	20.74021	2B	154	2	20	1	18	14	138	0	15	3	37	7	287	7784
-89.58912	20.74021	2C	67	19	345	1	368	26	1276	0	41	5	132	7	335	2920
-89.58912	20.74021	5C	64	18	420	2	353	57	1147	0	120	38	117	36	726	2212
-89.58349	20.75582	1A	53	65	58	1	21	12	21	0	3	2	30	4	280	2468
-89.58349	20.75582	3A	101	2	34	0	104	16	37	0	8	2	12	5	179	2075
-89.58349	20.75582	1C	19	2	70	1	6	65	164	0	19	4	47	5	476	1169
-89.56954	20.85674	4B	54	13	68	2	4	10	251	0	203	19	40	148	307	2202
-89.56954	20.85674	1B	197	2	78	2	219	39	156	0	177	59	37	202	262	3583
-89.53723	20.91185	140C	143	17	1252	3	718	11	340	0	2387	2070	87	1223	146	2749
-89.53846	20.98537	64B	57	13	205	1	124	55	1991	0	19	26	60	6	436	4511
-89.80197	21.03607	3B	27	2	326	1	15	97	381	0	281	84	54	177	499	1764
-89.53518	20.97161	140B	53	21	394	1	831	47	158	0	53	36	79	30	502	1368
-89.53518	20.97161	309C	41	2	311	1	376	78	140	0	95	39	65	31	479	1756
-89.53518	20.97161	140A	68	2	383	1	18	66	588	0	48	2	75	13	854	1453
-89.58196	21.12010	3C	75	1	367	3	18	17	328	0	191	62	40	88	807	1415

Geoespacialmente los TC's seleccionados y analizados se ubicaron preferentemente al este y sur de Mérida, colindando con los municipios de Conkal, Tixpéhual, Kanasín, Timucuy y Abalá, así también, entre Abalá y Umán y dentro del municipio de Ucú, como se puede visualizar en la **Figura 8.17**.

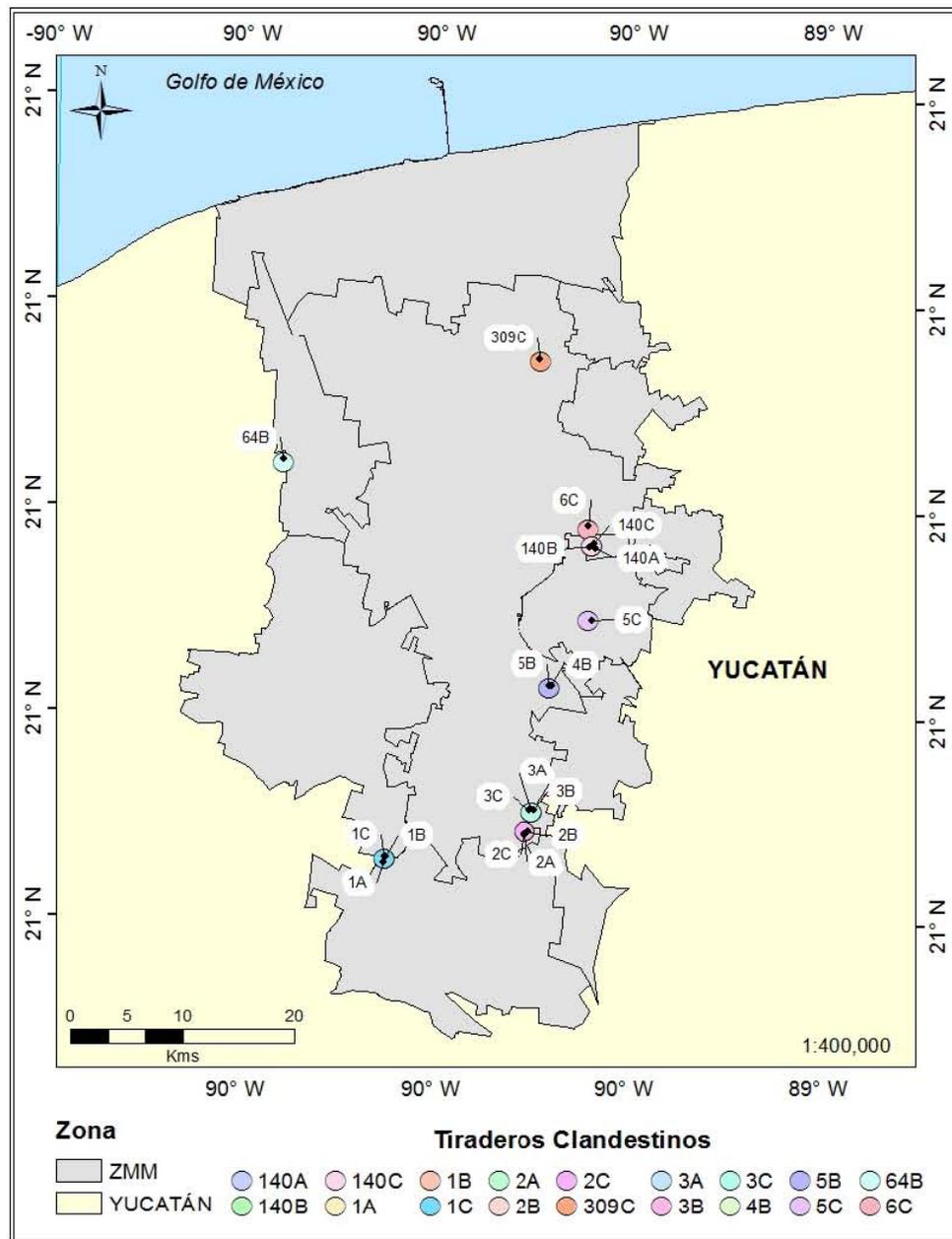


Figura 8.17: Localización de los TC's analizados y detectados en la ZMM.

8.2. EVALUACIÓN DE LOS EPT Y LOS TC'S

8.2.1. LINEAMIENTOS NORMATIVOS DE LOS EPT

Identificando a los EPT como agentes perturbadores, se realizó una comparación de la concentración total de los EPT de los TC's (**Tabla 8.10**) y los límites permisibles propuestos por las organizaciones anteriormente descritas (**Tabla 2.3 y 2.4**) para los tres usos potenciales del suelo, obteniendo la **Tabla 8.11**.

Tabla 8.11: Lineamientos normativos utilizados como índices para la categorización del peligro (extraídos de la **Tabla 2.5 y 2.6**).

EPT	Aluminio (Al)	Arsénico (As)	Bario (Ba)	Cadmio (Cd)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Fierro (Fe)	Mercurio (Hg)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	Vanadio (V)	Zinc (Zn)
LMP (mg/kg)	50	1	103	0.40	50	36	200	0.1	70	1	20	50
<ul style="list-style-type: none"> • EPT: Elementos potencialmente tóxicos • LMP: Límites máximos permisibles 												

Algunos EPT como el Al, Ba y Fe de manera natural se encuentran altamente concentrados en el suelo por lo que a nivel mundial es difícil normarlos. Con el fin de hacer una comparación en el estudio se consideraron las concentraciones límite de Al, Ba y Fe de 50, 103 y 200 mg/kg respectivamente debido a que se ha identificado que algunas plantas y microorganismos llegan a sufrir afectaciones con estas concentraciones y en la zona de estudio su concentración de forma natural es relativamente baja (**Tabla 2.4**).

Para conocer e identificar si el comportamiento en el sistema de los EPT y las variables geoquímicas es de forma natural o están siendo afectados por factores externos (ejemplo factores fisicoquímicos, o contaminación antropogénica) se llevó a cabo un análisis de normalidad.

Este análisis nos permite identificar la frecuencia con la que distintas variables asociadas a fenómenos naturales presentan una distribución normal (distribución gaussiana), sin embargo, variables que están siendo afectadas por factores externos regularmente presentan una distribución no normal, con probabilidades de predicción mínima (Pertegas y Pita, 2001).

8.2.2. ANÁLISIS DE NORMALIDAD

Se realizaron tres pruebas estadísticas distintas con el fin de poder identificar las variables normales y no normales, bajo la hipótesis nula donde todas las variables son normales con una confianza de 95 % o una probabilidad de error de $p > 0.05$.

Para la comparación de las variables se utilizó la prueba de Kolmogorov–Smirnov la cual asume que la media y desviación estándar se conocen, la prueba de Kolmogorov–Smirnov modificada por Lilliefors que asumen que la media y desviación estándar no se conocen y la prueba de Shapiro-Wilk’s que asume que todas las muestras son normales, considerando pequeñas poblaciones ($n < 30$).

De las pruebas estadísticas de normalidad la más eficiente para el estudio fue la de Shapiro-Wilk’s, bajo el criterio del tamaño de la población ($n=18$). Esta identificó que solo 4 variables analizadas presentaron una distribución normal (Cu, V, Al y MO) (datos resaltados en rojo) (**Tabla 8.12**).

Tabla 8.12: Análisis de normalidad (Kolmogorov–Smirnov, Lilliefors, y Shapiro-Wilk’s).

Análisis de normalidad de EPT, materia orgánica y grano fino.							
Variable	N	max D	Kolmogorov - Smirnov	Lilliefors	Shapiro - Wilk's	p	Normalidad
As	18	0.28	$p < .15$	$p < .01$	0.64	0.00	No
Ba	18	0.24	$p > .20$	$p < .05$	0.71	0.00	No
Cd	18	0.23	$p > .20$	$p < .05$	0.84	0.01	No
Cr	18	0.23	$p > .20$	$p < .05$	0.78	0.00	No
Cu	18	0.19	$p > .20$	$p < .10$	0.91	0.07	Si
Hg	18	0.25	$p < .20$	$p < .01$	0.89	0.04	No
Pb	18	0.40	$p < .01$	$p < .01$	0.38	0.00	No
Sn	18	0.49	$p < .01$	$p < .01$	0.29	0.00	No
V	18	0.17	$p > .20$	$p < .20$	0.91	0.08	Si
Zn	18	0.34	$p < .05$	$p < .01$	0.44	0.00	No
Al	18	0.21	$p > .20$	$p < .05$	0.91	0.08	Si
Fe	18	0.31	$p < .10$	$p < .01$	0.70	0.00	No
MO	18	0.17	$p > .20$	$p < .20$	0.94	0.30	Si
GF	18	0.25	$p < .20$	$p < .01$	0.71	0.00	No

Para mostrar la variación de los parámetros medidos se generaron gráficas de cajas y bigotes (box and whiskers) de las variables que consideró la prueba estadística Shapiro-Wilk’s como normales (**Figura 8.18**) y como no normales (**Figura 8.19**).

Para visualizar la distribución la **Figura 8.18** se representó mediante la media poblacional y desviación estándar, mientras que la **Figura 8.19** se representó por medio de la mediana, cuartiles, mínimos y máximos. Ahora bien, una vez identificadas las variables se transformaron con $\log(x+1)$ para evitar que los análisis posteriores fueran influenciados por la diferencia en orden de magnitud.

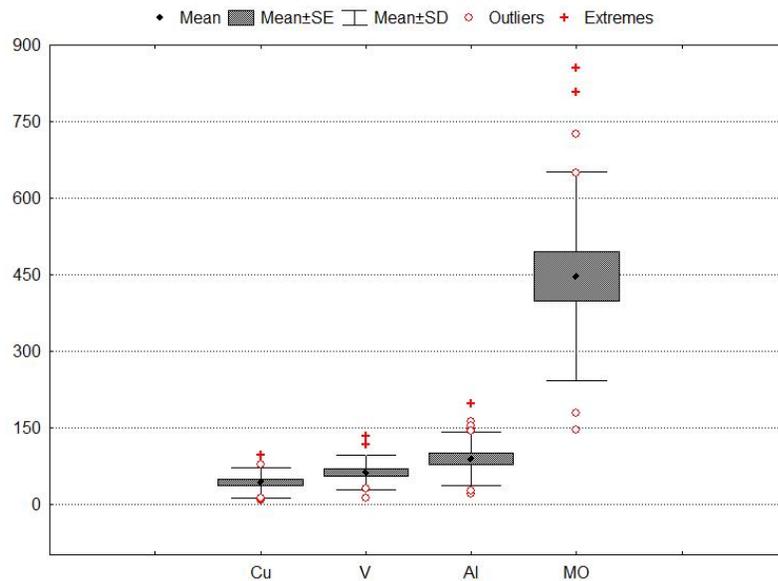


Figura 8.18: Variables normales (mg/kg), Cu, V, Al y MO.

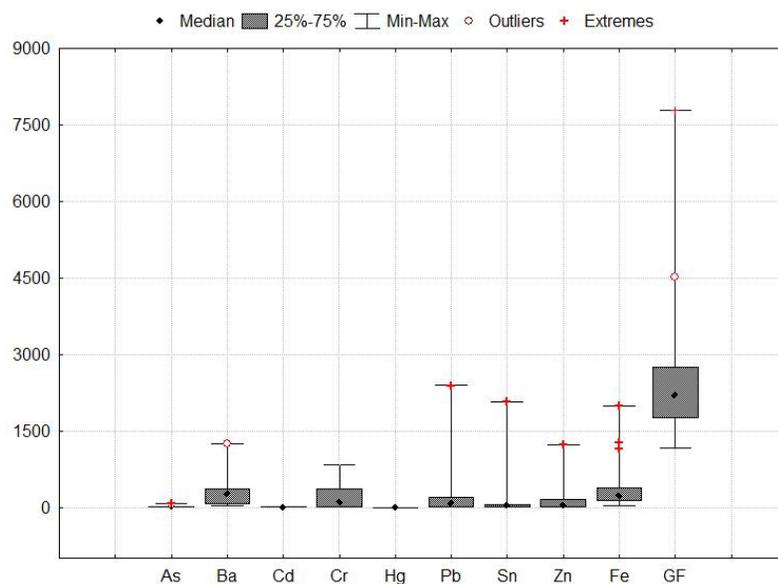


Figura 8.19: Variables no normales (mg/kg), Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, Sn, Zn, Fe y GF.

8.2.3. ANÁLISIS DESCRIPTIVO

Por medio de un análisis descriptivo de las variables normales (**Tabla 8.13**) y no normales (**Tabla 8.14**) se identificó al Al, Fe y Hg (a excepción del sitio 140C para el Hg) como los EPT's que no rebasaron los lineamientos normativos propuesto (**Tabla 8.11**) en ningún TC y cabe señalar que específicamente el As, Cd, Sn y V rebasaron el valor de norma de 1, 0.4, 1 y 20 mg/kg respectivamente, en el 100 % de los TC's (a excepción del sitio 3B para el V).

Tabla 8.13: Análisis descriptivo de las variables normales.

Análisis descriptivo de variables normales (mg/kg).					
Variable	Valor de N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Cu	18	42.0	6.8	96.8	29.8
V	18	61.8	12.2	131.9	33.4
Al	18	88.4	19.3	196.5	51.9
MO	18	446.3	146.1	854.5	204.9

Tabla 8.14: Análisis descriptivo de las variables no normales.

Análisis descriptivo de variables no normales (mg/kg).						
Variable	Valor N	Media	Mínimo	Máximo	Cuartil inferior	Cuartil superior
As	18	2.0	1.0	65.5	1.8	16.5
Ba	18	254.8	20.2	1252.3	67.8	367.3
Cd	18	1.1	0.5	3.4	0.8	1.9
Cr	18	96.7	3.8	831.4	17.6	352.7
Hg	18	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
Pb	18	64.9	3.0	2387.0	19.1	191.3
Sn	18	22.4	1.6	2069.8	3.8	42.8
Zn	18	30.7	4.2	1223.3	6.8	148.1
Fe	18	207.4	21.5	1990.8	138.3	380.8
GF	18	2192.0	1168.7	7784.0	1756.0	2749.3

El EPT que presentó el valor máximo de concentración en los TC's fue el Pb (2387 mg/kg), seguido del Sn (2070 mg/kg), Fe (1991 mg/kg), Ba (1252 mg/kg) y Zn (1223 mg/kg), siendo los TC's que presentaron la mayor concentración de estos EPT's el 5C, 6C, 2C, 2B y 140A, geoespacialmente localizados en el municipio de Kanasín, entre Tixpéhual y Mérida y Mérida Timucuy (**Figura 8.17**).

Los TC's con la mayor concentración de MO y GF fueron el 2B, 64B, 5C, 140A y 3C y los de la menor concentración los TC's 3A, 140C, 1C, 4B y 1A (**Tabla 8.15**).

Tabla 8.15: Concentración de variables geoquímicas en los TC's de la ZMM.

Variables geoquímicas (mg/kg)																		
TC	2A	6C	5B	2B	2C	5C	1A	3A	1C	4B	1B	140C	64B	3B	140B	309C	140A	3C
MO	649	352	459	287	335	726	280	179	476	307	262	146	436	499	502	479	854	807
GF	2235	2123	2182	7784	2920	2212	2468	2075	1169	2202	3583	2749	4511	1764	1368	1756	1453	1415

TC: Tiradero Clandestino, MO Materia Orgánica y GF: Grano Fino

Geoespacialmente los TC's se localizaron al sureste de la ZMM (**Figura 8.20**).

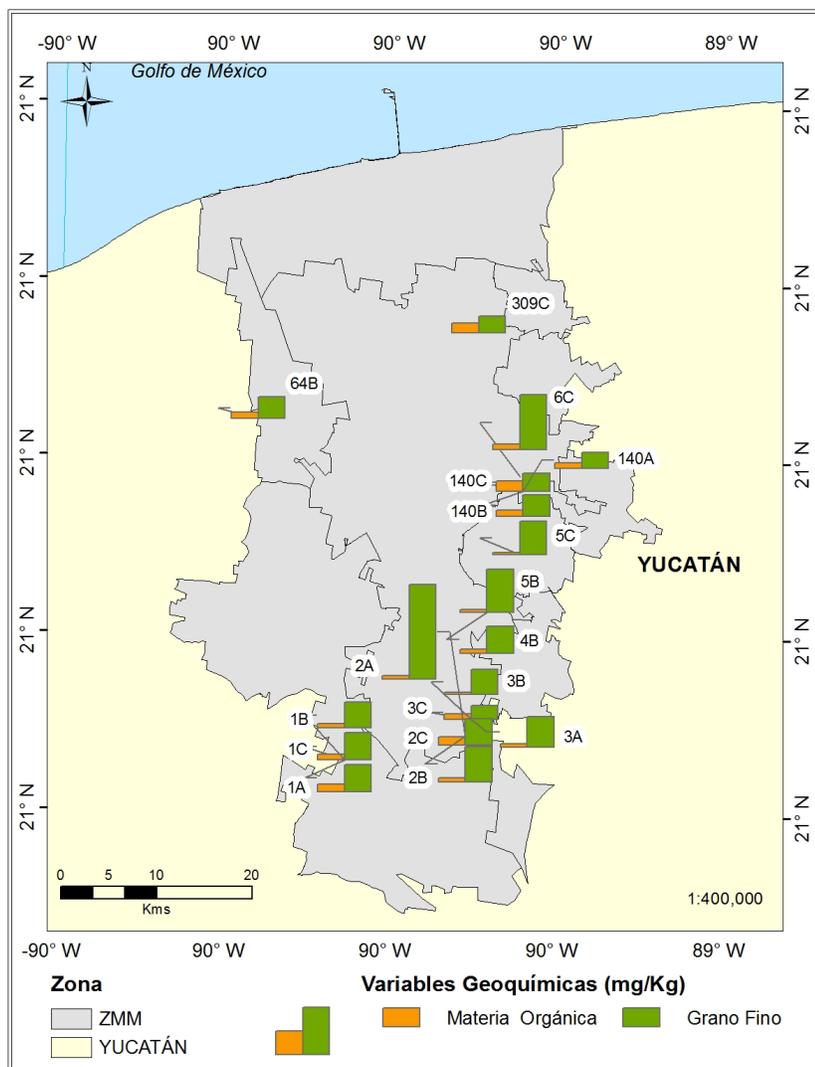


Figura 8.20: Proporción de materia orgánica y grano fino (limos y arcillas) en los TC's de la ZMM.

8.2.4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Para conocer en mayor medida la relación de los EPT, las variables geoquímicas y los TC's analizados, se llevó a cabo un análisis de componentes principales (PCA) con una proyección 2D (**Figura 8.21**).

En la **Figura 8.21** se observa en forma de porcentaje el agrupamiento de factores. Dicho análisis explica más del 62.9 % de la variabilidad del fenómeno observado. El factor 1 explica el 38.61 % de la variabilidad y el 2 explica el 24.38 % de la variabilidad.

Las variables que resultaron con un peso significativo en el sistema fueron el Al, Ba, Cd, Cu, Fe, Hg, Pb, Sn, V, Zn, MO y GF.

Como método de aproximación en la **Figura 8.21** el GF muestra una relación inversa con la MO y el Cu, así como, con el Hg, V, Fe y Ba. El Ba, V, Hg, Fe y Cu están relacionados directamente con la MO e inversamente con el GF. El Pb, Cd, Sn y Zn presentan una mayor relación con el Al y el GF más que con el MO.

Por otro lado, en la **Figura 8.22** con proyección 2D se observa a los TC's 2A, 3B, 3A, 1C y 3C mayormente asociados a variables como el GF, Al, MO y Cu, los TC's 2C, 2B, 6C, 140C, 140A, 309C y 64B asociados a variables como el Ba, V y Fe y los TC's 5C, 1B, 4B y 5B se ven mayormente relacionados con variables como el Pb, Cd, Sn y Zn.

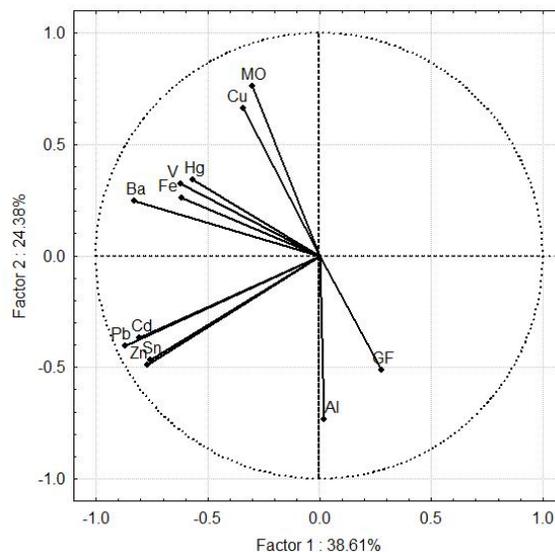


Figura 8.21: PCA de EPT significativos.

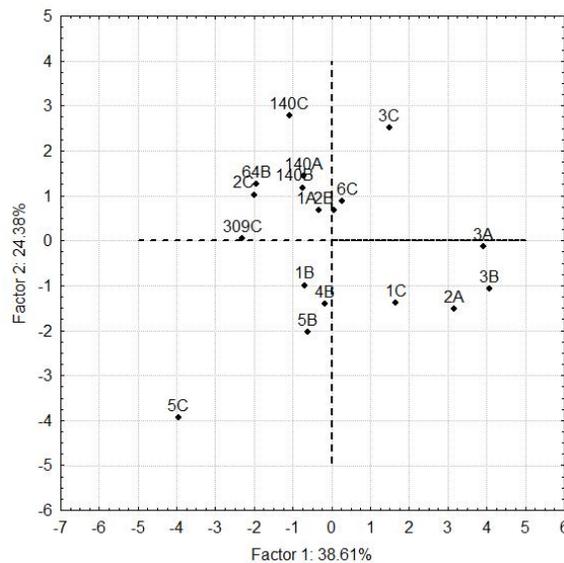


Figura 8.22: Proyección 2D de los TC's empleando las EPT significativos.

8.2.5. ANÁLISIS DE FACTORES

Para entender en mayor medida los procesos de asociación de los EPT y las variables geoquímicas dentro de los TC's se realizó un análisis de factores utilizando solo las variables que probaron ser significativas por el PCA, como resultado se generó la **Tabla 8.16** con tres factores que explican la mayor variabilidad de los datos (> 59 % de la variabilidad).

Bajo el análisis se observó que el factor 1 se integró por el Cd, Pb, Sn y Zn (**Tabla 8.16**) y por medio de un análisis canónico se identificó su relación directa con el Al e inversa con la MO.

El factor 2 se integró por el Cu, Hg y MO, que presentó una relación inversa con el Al y el GF, finalmente, las variables del factor 3 fueron el Ba, V y Fe, que presentaron una relación directa con la MO pero inversa con el Al.

Para identificar la incidencia de los factores generados en los TC's se realizó la **Tabla 8.17** expresada en porcentaje, como método de aproximación se identifica al TC 64B como el más influenciado por el factor 1, al TC 3A por el factor 2 y al TC 140C por el factor 3.

Tabla 8.16: Análisis de factores de las variables significativas

Análisis de factores con máxima variabilidad (>.59). Extracción: Análisis de componentes principales.			
Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Ba	0.51	0.37	0.61
Cd	0.86	-0.02	0.23
Cu	-0.07	0.60	0.44
Hg	0.37	0.61	0.17
Pb	0.95	0.03	0.17
Sn	0.88	-0.09	0.14
V	0.19	0.14	0.85
Zn	0.95	0.00	0.01
Al	0.30	-0.68	-0.13
Fe	0.20	0.05	0.87
MO	-0.15	0.68	0.43
GF	-0.15	-0.87	0.21

Tabla 8.17: Influencia de los factores en los TC's de la ZMM.

Proporción de factores en cada TC's			
TC's	Factor 1	Factor 2	Factor 3
2B	50%	43%	7%
64B	93%	5%	2%
1B	29%	25%	46%
2C	92%	5%	3%
5C	84%	6%	10%
140C	22%	2%	76%
2A	67%	20%	13%
1A	60%	35%	5%
5B	35%	35%	30%
4B	45%	8%	47%
6C	37%	24%	39%
140A	84%	11%	5%
3B	53%	9%	38%
3A	38%	54%	7%
309C	64%	15%	21%
3C	63%	8%	29%
140B	74%	12%	14%
1C	71%	21%	7%

TC's: Tiraderos Clandestinos

8.2.6. ANÁLISIS CLUSTER

Con el objetivo de identificar similitudes entre los TC's dadas por la concentración de los EPT y las variables geoquímicas (MO y GF) que probaron ser significativas, se llevó a cabo un análisis de agrupamiento (Análisis Cluster) utilizando el método de varianza mínima de Ward y el coeficiente de correlación de Pearson.

En el dendograma (**Figura 8.23**) se observa la formación de 4 grupos de TC's, el grupo 1 (verde) se integró por el TC 5C, el grupo 2 (rojo) por los TC's 64B, 309C, 4B, 5B y 1B, el grupo 3 (azul) por los TC's 3A, 3B, 2A y 1C y el grupo 4 (anaranjado) por los TC's 6C, 3C, 140C, 2B, 140B, 140A, 2C, 1A.

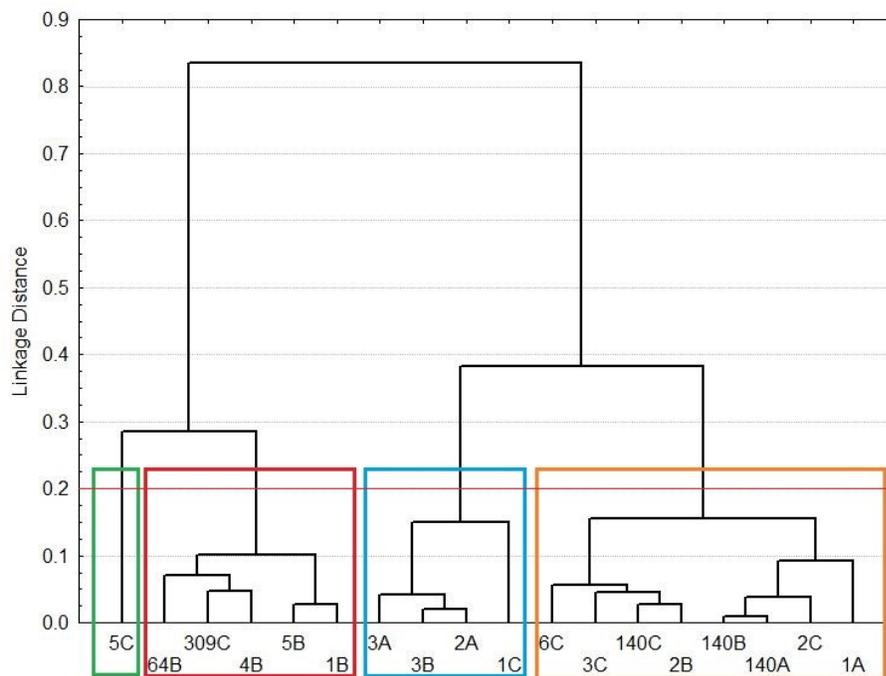


Figura 8.23: Análisis de agrupación de los TC's de la ZMM con variables significativas.

Geoespacialmente los TC's del grupo 1 y 2 se localizaron en el municipio de Umán, noreste de Mérida, Kanasín, norte de Timucuy y sur de Umán, los TC's del grupo 3 se localizaron al sur de Umán y sur de Mérida y los TC's del grupo 4 se localizaron al sur de Mérida, norte de Kanasín y este de Tixpéhuatl (**Figura 8.34**).

8.2.7. ANÁLISIS DEL FACTOR 1

Con base en el análisis de agrupación (**Figura 8.23**) y el porcentaje de influencia del análisis de factores en los TC's (**Tabla 8.16 y 8.17**), se realizó un análisis de agrupamiento para identificar las similitudes entre los TC's asociados al grupo 2 (64B, 309C, 4B, 5B y 1B) y las variables asociadas al factor 1 (Cd, Pb, Sn y Zn).

Mediante el análisis se identificó el agrupamiento de los TC's 64B, 309C y 4B y los TC's 5B y 1B (**Figura 8.24**).

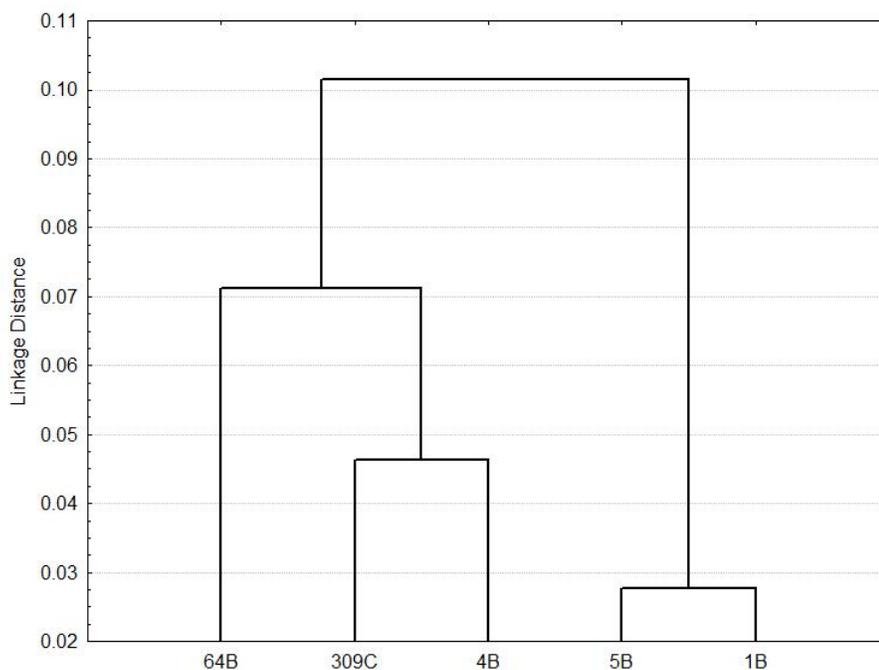


Figura 8.24: Análisis de agrupación del grupo 2 con variables asociadas al factor 1.

Por medio del análisis descriptivo se identificó a los TC's 5B y 1B como los sitios con la mayor concentración (mg/kg) de Zn, así como, al TC 64B como el sitio con la menor concentración de Zn, por otra parte, los TC's 4B y 309C se caracterizaron por presentar una concentración similar de Cd, Pb y Sn.

Empleando un PCA y un análisis con proyección 2D (**Figura 8.25 y 8.26**) se identificó al TC 309C inversamente asociado con el Zn, al 64B mayormente asociado con el Sn y Pb y a los TC's 5b, 4B y 1B con mayor asociación al Zn que al Cd pero inversamente asociados con el Sn y Pb.

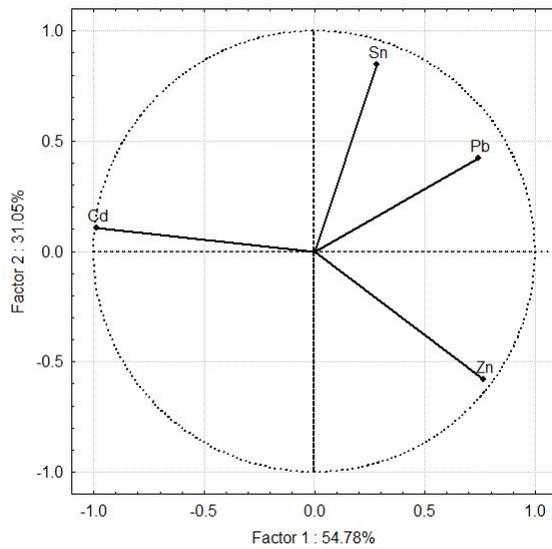


Figura 8.25: PCA del grupo 2 y EPT asociados al factor 1.

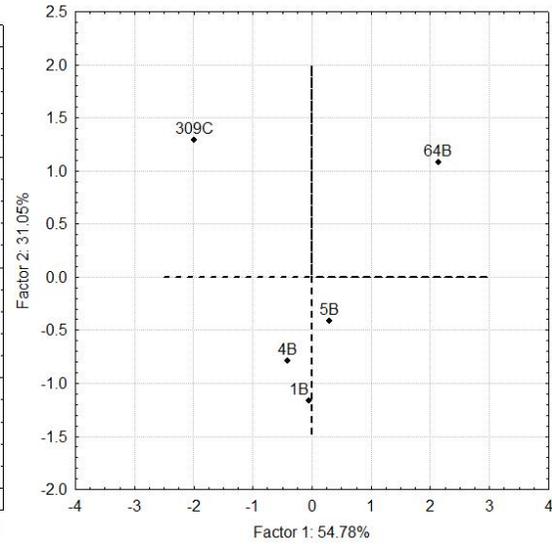


Figura 8.26: Proyección 2D de los TC's del grupo 2 y EPT asociados al factor 1.

Geoespacialmente los TC's mayormente impactados por los EPT asociados al factor 1 no presentan alguna agrupación visual significativa comparada con los TC's restantes, sin embargo, los TC's 309C y 64B se localizaron al noreste de Mérida y al oeste de Ucú respectivamente, los TC's 5B y 4B relativamente juntos en el sureste de Mérida y el TC 1B al sur de Umán colindando al norte de Abalá. Su ubicación geoespacial probablemente esté indicando que los TC's son influenciados por la actividad antropogénica de forma similar en toda la ZMM (**Figura 8.34**).

8.2.8. ANÁLISIS DEL FACTOR 2

Con la finalidad de identificar las similitudes entre las variables (Cu, Al, Hg, MO y GF) asociadas al factor 2 (**Tabla 8.16**) y los TC's asociados al grupo 3 (3A, 3B, 2A y 1C), se llevó a cabo un análisis de agrupamiento (**Figura 8.27**).

En el análisis se identificó la formación de dos grupos, los TC's 3A, 3B y 2A y el TC 1C, asociados probablemente por la diferencia en abundancia de las variables.

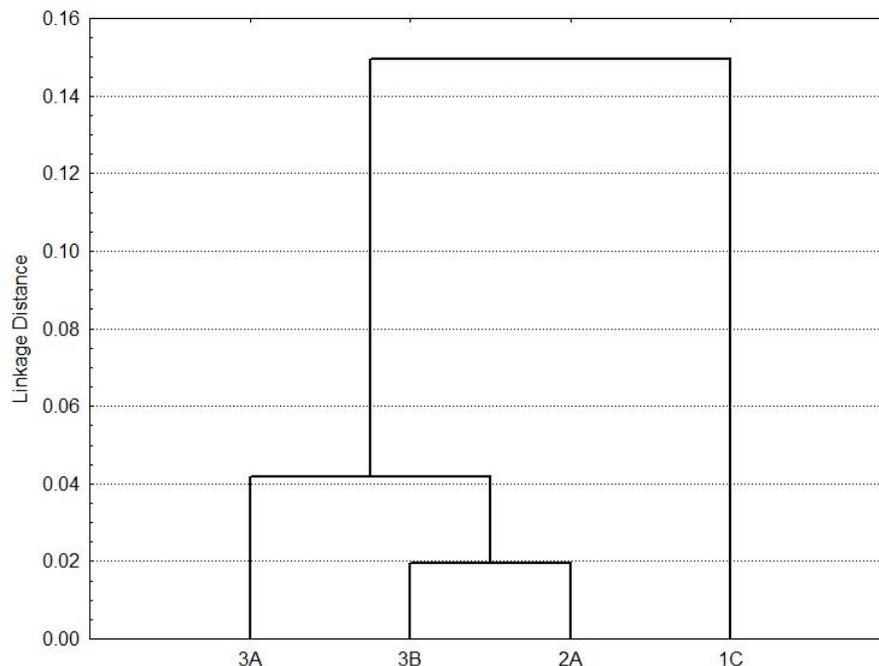


Figura 8.27: Análisis de agrupación del grupo 3 con EPT asociados al factor 2.

Mediante el análisis descriptivo se identifica al TC 1C como el sitio con la concentración de Cu más baja de todos los TC's analizados en la ZMM, sin embargo, dentro del grupo 3 fue el TC con mayor concentración de MO, los TC's 3B y 2A presentaron como característica una similitud respecto a la concentración de los EPT, por otra parte, el TC 3A se diferenció por presentar la menor concentración de Hg, así mismo, la variable Hg fue la que presentó la menor concentración de todos los EPT analizados en todos los TC's de la ZMM (**Tabla 8.14**).

Es importante destacar que mediante el análisis descriptivo se identificó a la variable GF como la más concentrada de todas (promedio de 2192 mg/kg), seguida de la MO (promedio 446.3 mg/kg) (**Tabla 8.14**). Por otra parte, de las variables analizadas asociadas al factor se identificó al Al como el EPT más concentrado (promedio de 88.4 mg/kg), seguido del Cu (42 mg/kg) y el Hg (0.04 mg/kg).

Es relevante indicar que Al no supero el lineamiento propuesto en ningún TC analizado, aún cuando se identificó como un elemento común en la ZMM (ver **Tabla 2.4** del **Apartado 2.2**).

Ahora bien, por medio de un PCA y un análisis con proyección 2D (**Figura 8.28 y 8.29**), se identificó al TC 2A mayormente asociado con la variable GF y Hg que con el Al, el TC 3A inversamente relacionado con el Hg y el Al, el TC 3B mayormente asociado con el Cu e inversamente relacionado con la MO y el TC 1C mayormente asociado con la MO e inversamente correlacionado con el Cu.

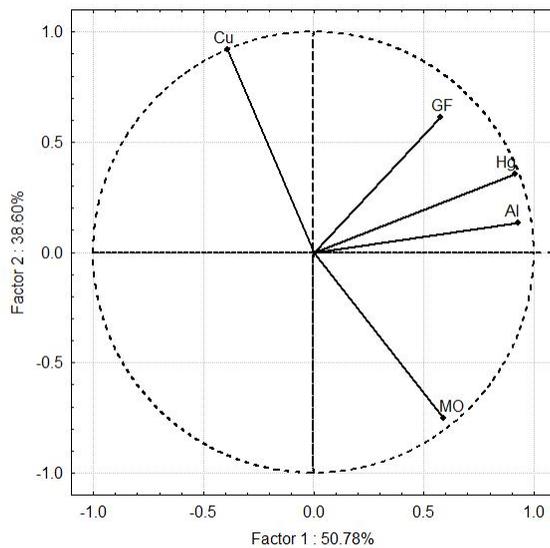


Figura 8.28: PCA del grupo 3 y EPT asociados al factor 2.

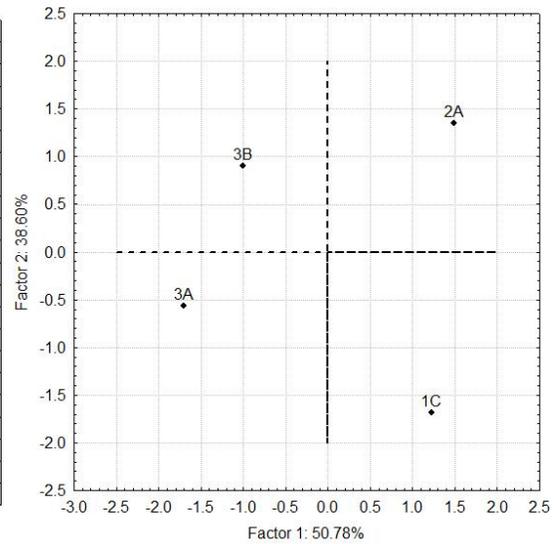


Figura 8.29: Proyección 2D de los TC's del grupo 3 y EPT asociados al factor 2.

En el análisis con proyección 2D (**Figura 8.29**) los TC's 2A y 1C se comportan de acuerdo a lo anteriormente mencionado, sin embargo, es probable que los TC's 3A y 3B presenten una relación inversa con las variables asociadas al factor debido a su concentración.

Geoespacialmente los TC's 3A, 3B y 2A se localizan entre la parte sureste de Mérida, norte de Abalá y este de Timucuy, mientras que el TC 1C se ubica al sur de Umán colindando al norte de Abalá (**Figura 8.34**).

8.2.9. ANÁLISIS DEL FACTOR 3

Por último, para identificar las similitudes entre los TC's dadas por la concentración de las variables se realizó un análisis de agrupamiento del grupo 4 (6C, 3C, 140C, 2B, 140B, 140A, 2C y 1A) y las variables (Ba, V y Fe) asociadas al factor 3 (**Tabla 8.16**) (**Figura 8.30**).

Mediante el análisis se identificó la formación de dos grupos de interés, el grupo conformado por los TC's 6C, 3C, 140C y 2B y el grupo con los TC's 140B, 140A, 2C y 1A.

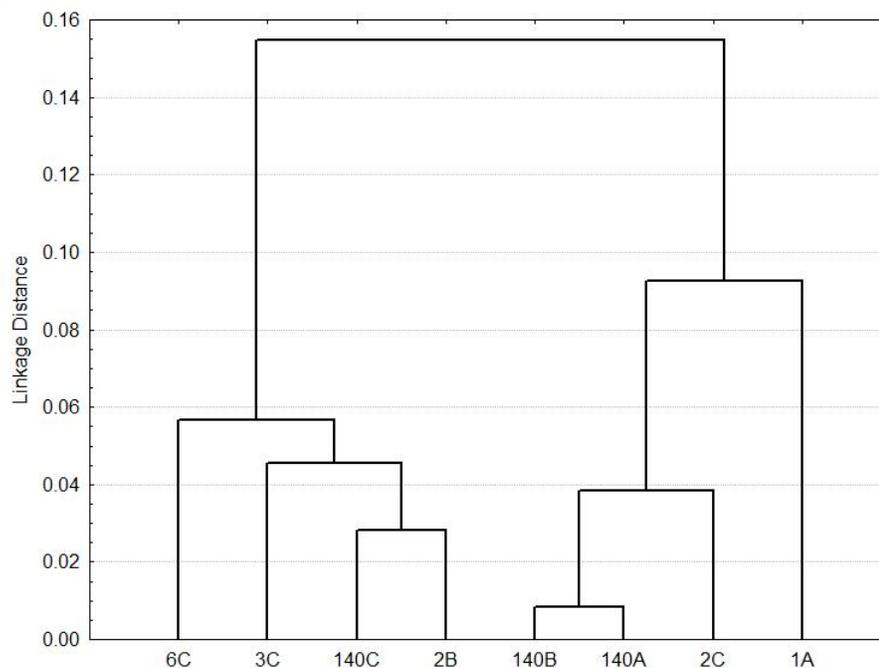


Figura 8.30: Análisis de agrupación del grupo 4 con EPT asociados al factor 3.

Por medio de un análisis descriptivo se identificó al TC 1A y 2C como los sitios con la menor y mayor concentración de Fe y V respectivamente, así como a los TC's 6C y 140C con los sitios con la concentración de Ba y V más alta, ahora bien, los TC's 2B y 140B presentaron como característica principal la menor concentración de Fe.

Utilizando un análisis PCA y un análisis con proyección 2D (**Figura 8.31 y 8.32**), se identificó a los TC's 2B y 2C asociados directamente con el V y Ba, los TC's 6C y 140C asociados con el Fe, el TC 3C asociado inversamente con el V y Ba y los TC's 140A, 140B y 1A asociados inversamente con el Fe más que con el V y Ba.

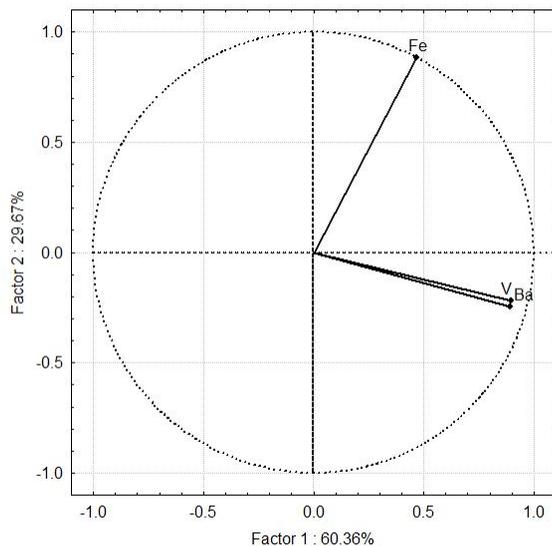


Figura 8.31: PCA del grupo 4 y EPT asociados al factor 3.

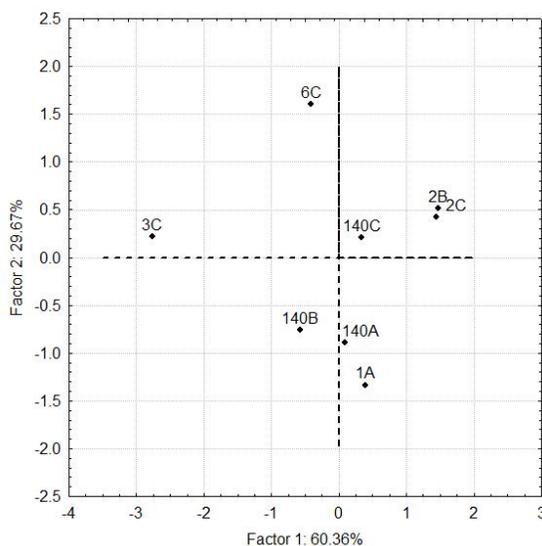


Figura 8.32: Proyección 2D de los TC's del grupo 4 y EPT asociados al factor 3.

Geoespacialmente los TC's 6C, 3C, 140C y 2B se localizan en la parte este y sureste de Mérida y los TC's 140B, 140A, 2C y 1A al norte de Kanasín, sur de Mérida y sur de Umán o noroestes de Abalá (**Figura 8.34**).

Ahora bien, una vez identificadas las relaciones entre los EPT, las variables geoquímicas (MO y GF) y los TC's se llevó a cabo el análisis de vulnerabilidad intrínseca de la ZMM y el acuífero subyacente.

8.3. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

Empleando el análisis de vulnerabilidad intrínseca con el método DRASTICmod (**Ecuación 7.4**) se obtuvieron los resultados mostrados en la **Tabla 8.18**.

Estos valores se clasificaron según su condición baja (verde), media (amarillo) y alta (rojo) (**Tabla 8.18**).

Tabla 8.18: Clasificación de la vulnerabilidad intrínseca con el método DRASTICmod.

Clasificación de vulnerabilidad intrínseca	Intervalo	Porcentaje
BAJA	236 - 265	22%
MEDIA	266 - 294	57%
ALTA	295 - 323	22%

En la **Figura 8.33** se muestra la distribución de tales vulnerabilidades en la zona de estudio, donde cada pixel corresponde a 1 km².

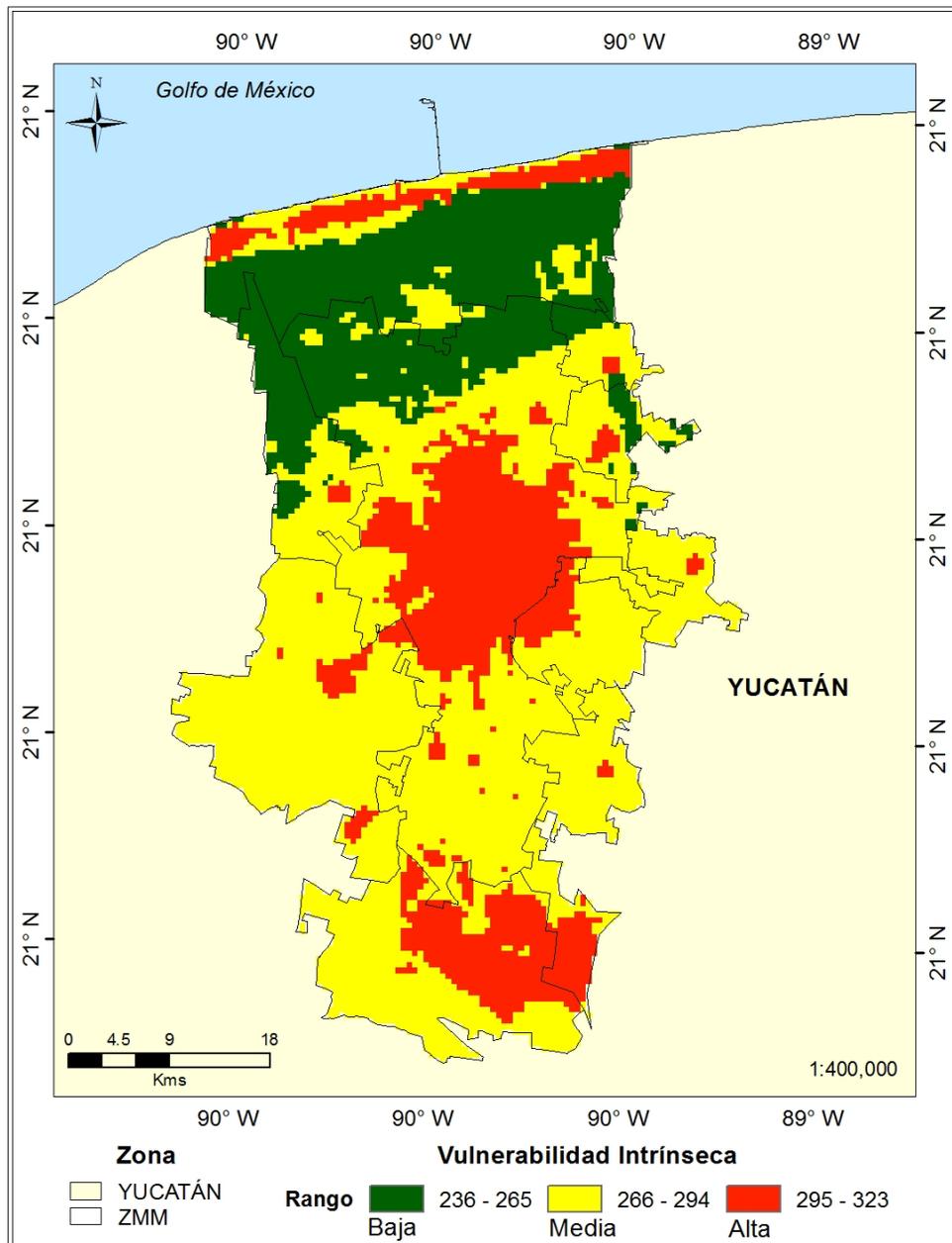


Figura 8.33: Clasificación de la vulnerabilidad intrínseca en la ZMM con el método “DRASTICmod”.

8.4. CLASIFICACIÓN CATEGÓRICA DE LOS EPT Y LOS TC'S

Para identificar el grado de incidencia de los EPT y los TC's en la ZMM y el acuífero subyacente se emplearon los lineamientos normativos expresados en la **Tabla 8.11**, la clasificación categórica (bajo, medio y alto) de los EPT de acuerdo con los criterios anteriormente descritos ($\geq 0 =$ a la norma, $10\% <$ a la norma y $20\% <$ a la norma) y la clasificación por rangos (1, 2 y 3) asignados por el número (cantidad) de EPT que superan los LMP en cada TC analizado (**Tabla 8.19**).

Tabla 8.19: Número de EPT que superan los LMP en cada TC's.

Coordenadas		Sitio muestreado (TC's)	Número de EPT según su concentración			Rango
X	Y	ID	20% menor a la norma	10% menor a la norma	Mayor o igual a la norma	
-89.7096	20.7161	1A	4	0	8	1 (61% de los TC's)
-89.7096	20.7161	1B	4	0	8	
-89.5891	20.7402	2C	4	0	8	
-89.5695	20.8567	5B	4	0	8	
-89.5372	20.9119	5C	4	0	8	
-89.8020	21.0361	64B	4	0	8	
-89.5352	20.9716	140B	4	0	8	
-89.5385	20.9854	6C	5	0	7	
-89.5352	20.9716	140A	5	0	7	
-89.5352	20.9716	140C	5	0	7	
-89.5820	21.1201	309C	5	0	7	2 (11% de los TC's)
-89.5891	20.7402	2B	6	0	6	
-89.5695	20.8567	4B	6	0	6	
-89.7096	20.7161	1C	7	0	5	3 (27% de los TC's)
-89.5835	20.7558	3C	7	0	5	
-89.5891	20.7402	2A	8	0	4	
-89.5835	20.7558	3A	8	0	4	
-89.5835	20.7558	3B	8	0	4	
			45% de los EPT	0% de los EPT	55% de los EPT	

De acuerdo con la **Tabla 8.19** el 45 % de los EPT analizados se encuentran 20 % por debajo del límite normativo considerado y el 55 % superan los lineamientos propuestos. Ahora bien, se puede identificar que en el 72 % (rango 1 y 2) de los TC al menos la mitad de los EPT superan los lineamientos normativos propuestos para los tres usos potenciales del suelo en la ZMM.

Por medio de un análisis geoespacial se identifica que los TC's con la mayor cantidad de EPT que superan su LMP (1A, 1B, 2C, 5B, 5C, 64B, 140B, 1 y 6C) se distribuyen en toda la ZMM, sin embargo, por la localización y cantidad de sitios muestreados la mayoría de estos se ubican preferentemente al sureste de la ZMM (**Figura 8.34**).

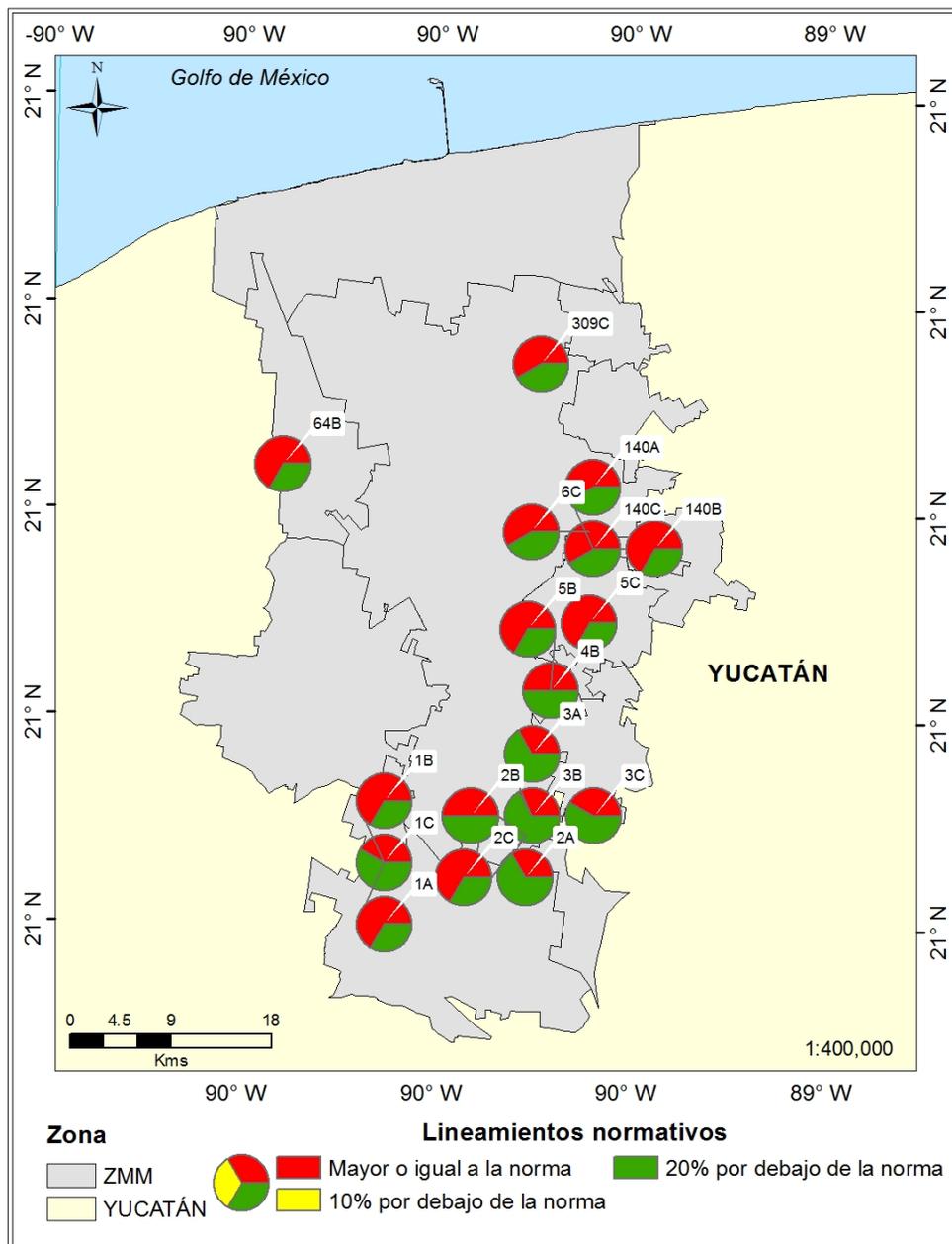


Figura 8.34: Proporción de TC's que rebasan la normatividad de la ZMM.

8.5. ANÁLISIS DE LA PRESIÓN AMBIENTAL

Por medio del análisis de vulnerabilidad intrínseca de la ZMM (Tabla 8.18) y la clasificación categórica de los EPT y los TC's (Tabla 8.19) se llevó a cabo el análisis de la presión ambiental empleando el cuadro simétrico latino (Tabla 7.9). Los resultados se muestran en la Tabla 8.35.

Figura 8.35: Análisis de la presión ambiental.

x	y	ID	Al		As		Ba		Cd		Cr		Cu		Fe		Hg		Pb		Sn		V		Zn		SUMA (R)			mg/kg							
			P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	B	M	A	MO	GF	Lugar		
			P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	P	V	R	B	M	A	MO	GF
-89.535	20.972	140B	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	B	M	M	0	4	8	4.8	17.6	4	
-89.710	20.716	1B	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	4	8	3.5	21.2	8	
-89.710	20.716	1A	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	4	8	6.5	22.3	12	
-89.537	20.912	5C	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	4	8	1.5	27.5	13	
-89.589	20.740	2C	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	4	8	7.3	22.1	14	
-89.570	20.857	5B	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	4	8	2.6	35.8	16	
-89.535	20.972	140A	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	5	7	5.0	13.7	2	
-89.582	21.120	309C	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	5	7	8.1	14.2	3	
-89.538	20.985	6C	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	5	7	4.4	45.1	17	
-89.535	20.972	140C	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	6	6	8.5	14.5	7	
-89.570	20.857	4B	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	6	6	3.1	22.0	9	
-89.589	20.740	2B	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	6	6	3.3	29.2	15	
-89.583	20.756	3C	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	7	5	4.8	11.7	1	
-89.710	20.716	1C	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	7	5	4.6	21.8	10	
-89.583	20.756	3B	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	B	M	M	B	M	0	8	4	1.8	20.7	5
-89.583	20.756	3A	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	8	4	2.8	24.7	11	
-89.589	20.740	2A	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	M	A	A	M	M	B	M	M	A	M	A	A	M	A	A	A	M	A	0	8	4	2.9	77.8	18	
-89.802	21.036	64B	B	M	B	A	B	M	A	B	M	A	B	M	B	B	B	A	B	M	A	B	A	B	M	A	B	M	A	B	M	4	7	1	5.0	17.6	6
Cuantificación del valor R para cada EPT	Bajo		1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Medio		17	1	9	1	7	9	17	17	10	0	2	12																							
	Alto		0	17	9	17	10	9	0	0	8	18	16	6																							
P = Peligro, V = Vulnerabilidad y R = Riesgo; B = Bajo, M = Medio y A = Alto; MO = Materia Orgánica y GF = Grano Fino																																					

Para la evaluación de la presión ambiental la vulnerabilidad intrínseca **V** se representó por el valor donde se localiza geoespacialmente cada TC en la ZMM (Figura 8.33) (vulnerabilidad baja (verde), media (amarillo) y alta (rojo)) , el valor de la clasificación categórica de los EPT y los TC's (peligro) **P** se representó bajo los criterios anteriormente descritos ($\geq 0 = a$ la norma, $10\% < a$ la norma y $20\% < a$ la norma) (Tabla 8.19) y el valor de la presión ambiental (riesgo potencial) **R** se representó como el producto de los dos factores (Ecuación 7.6).

Considerando cada valor **R** (color azul) como puntos, en la columna **Suma R** se hace una cuantificación de los valores **R** obtenidos para cada TC.

Para el análisis se identifica a los TC's 140B, 1B, 1A, 5C, 2C y 5B (color rosa) como los sitios con más valores **R** altos para la ZMM y el acuífero subyacente, asimismo, los TC's 3B, 3A, 2A (color piel) y 64B (color mostaza) son los sitios de menos valores **R** altos. Por otra parte, los EPT con valores **R** altos fueron el As, Cd, Cr, Sn y V.

9. DISCUSIÓN

El presente estudio fue realizado con el objetivo de añadir información relevante, carente y urgente, a las bases de información que permiten elaborar estrategias gubernamentales para 1) prevenir la contaminación, 2) caracterizar y manejar de manera óptima los recursos naturales y 3) dar solución a las problemáticas sociales, de salud y bienestar. Para lo anteriormente mencionado se llevó a cabo un análisis híbrido de los métodos más utilizados en el análisis de vulnerabilidad (DRASTICmod), peligro (dado por la contaminación en la zona) y riesgo (dada por la presión ambiental) (Antonakos y Lambrakis, 2006 en Aguilar-Duarte et al., 2016).

Este estudio integra en su estructura el método DRASTICmod y el análisis geoespacial para describir y sintetizar las propiedades físicas y atributos medioambientales en la ZMM y el acuífero subyacente. De igual manera, integra las estrategias normativas, de calidad, de carácter técnico y de uso potencial socio-económico de los suelos, para identificar los procesos y funciones potenciales de degradación de los recursos naturales dados por la concentración de EPT y la presencia de los TC's.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que, a pesar de la normativa existente nacional e internacional, es un hecho que la poca educación ambiental, el tipo de cultura, el estilo de vida y los patrones de producción y consumo de la mayoría de la población (Sepulveda y Edwards, 1996; FUNDAR, 2002), sobrepasan los esfuerzos de las instituciones (SEMARNAT, PROFEPA, CONAGUA, SEDUMA y JAPAY) encargadas de impulsar la protección, restauración, conservación, aprovechamiento y desarrollo sostenible de los recursos, bienes y servicios ambientales.

En ese sentido, la misma presencia de los 18 TC's identificados en la ZMM, así como la concentración de los diferentes EPT evaluados, muestran una clara carencia de respeto a las instituciones y sus normativas ambientales, y un claro menoscabo de los esfuerzos y las políticas públicas de control de la contaminación, saneación básica, protección a la salud, aumento de la calidad de vida de la población (LGS, 1984), manejo, control y disposición final de RSU (LGEEPA, 1988) y el marco regulatorio que clasifica y da competitividad jurídica a los órganos de gobierno (LGPGIR, 2003).

El presente estudio analiza las especificaciones mexicanas de protección ambiental y restricciones normativas enfocadas a identificar suelos contaminados por EPT (SSA, 2007), identificando con ello dos debilidades 1) institucionales y 2) normativas. La primera, se enfoca en el reducido grupo de elementos que se emplean para evaluar y remediar suelos contaminados (As, Ba, Be, Cd, Cr, Mg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y V); la segunda, en el enfoque de carácter laxo y uso general para todo el país.

Como recomendación, y teniendo en cuenta mi formación como Manejador Sustentable, en un futuro considero necesario actualizar las normativas y dirigir su implementación a análisis de elementos como el Aluminio (Al), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Estaño (Sn) y Zinc (Zn) que si bien algunos de ellos son elementos con actividad biológica reconocida (Cu, Fe y Zn), y que para generar un daño al medio ambiente o al ser humano se requeriría una concentración en el orden de los mg/Kg, no podemos obviar el hecho de que pueden estar generando sinergia con algún otro EPT (Al y Sn por ejemplo), contaminante o característica propia del sitio, y con ello contribuir a la presión ambiental.

De igual manera en este sentido se debería incluir también normativas, o al menos que se solicite dentro de las normativas el estudio de las variables geoquímicas como el porcentaje de grano fino (GF) y la cantidad de materia orgánica (MO), que influyen significativamente en los procesos de bioacumulación, toxicidad, movilidad y transformación química y bioquímica de los EPT (Arcega-Cabrera et al., 2009, 2016, 2017; Förstner, 1987 y Cattani et al., 2006 en Fernández, 2011; Galán y Romero, 2008; García et al., 2012; Zúñiga-Ontiveros, 2012; Arcega-Cabrera et al., 2014a).

En ese contexto, también se recomienda implementar estudios estratégicos y específicos en suelos de uso potencial humano integrando las relaciones de aproximación de los EPT para su manejo. Por ejemplo, los grupos espaciales formados en un análisis de agrupamiento de los TC's, puede ser resultado de la concentración similar de EPT específicos y por ende, ante esta situación se pueden implementar estrategias o acciones específicas de saneamiento (química-Cd y Pb, mecánica-Fe, biológica-Cu o térmica-Hg) (Volke y Velasco, 2002).

De igual forma, estas relaciones de aproximación encontradas en este estudio, pueden estar indicando la influencia de las características propias del sistema natural tales como el porcentaje de grano fino (a mayor superficie relativa con respecto al volumen se espera una mayor adsorción y por ende concentración), o la presencia de materia orgánica que a mayor cantidad podrá acumular EPT adsorbiéndolos (ver **Apartado 1.3**), o incluso, en sitios kársticos como lo es nuestro Estado, podría encontrarse un efecto de dilución de la concentración de EPT relacionada con la presencia de carbonatos de calcio o magnesio (Loring y Rantala, 1992; Sadiq, 1992).

Lo anterior lo observamos en los resultados obtenidos donde se encuentra una relación directa entre el Ba, V, Hg, Fe y Cu con la MO e inversa con el GF, lo que indica que se está llevando a cabo un proceso de concentración de estos elementos en los sitios de adsorción de la MO, y que dichos elementos no son naturales, ya que de serlo su relación con el GF sería directa (ver **Apartado 1.3**). Por esto último, es probable que en los TC's de la ZMM estos elementos sean antropogénicos (Bautista-Zúñiga et al., 2003).

De estos elementos el de mayor preocupación en términos de la presión ambiental sería el Hg ya que 1) no tiene fusión biológica conocida, 2) es tóxico para las formas primarias de los organismos en el orden de los mg/Kg en sólidos y $\mu\text{g/L}$ en fluidos y 3) puede fácilmente formar compuestos organometálicos y ser integrado a la red trófica biomagnificándose (Juárez-Sanz et al., 2007; Arnal, 2010).

En cuanto al Ba y V, tenemos que estos elementos son utilizados como indicadores de la presencia de compuestos del petróleo, que en los TC's se esperaría sean resultado de la mala disposición de aceites, lubricantes, hidrocarburos y más, los cuales una vez en el suelo conservan su preferencia a asociarse con la MO y el Fe (ver **Apartado 1.3**) (Hernández, 2012).

Respecto al Pb, Cd, Sn y Zn, en los resultados obtenidos se observa que presentan una mayor relación con el Al y el GF más que con la MO, indicando que probablemente estos EPT tienen un importante componente natural (Loring y Rantala, 1992) sin embargo, su presencia asociada con la MO indica que también pueden ser resultado de la degradación y posterior liberación de estos elementos a partir de residuos antropogénicos, principalmente industriales como la construcción, el hogar o los productos electrónicos (Solano Marín, 2005; John, 2011; Tello de Meneses, 2014).

La principal fortaleza del análisis integral aquí implementado es el uso paralelo de las características medioambientales del sistema a través de métodos para el análisis de la vulnerabilidad intrínseca pero modificados con base en las características propias de la ZMM (DRASTICmod). Este tipo de análisis, como se muestra en los resultados obtenidos nos permitió generar 1) información temática carente, relevante y urgente para la toma de decisiones y para la sostenibilidad del recurso agua principalmente por parte de instituciones como SDS, CONAGUA, SEMARNAT, PROFEPA, entre otras y 2) sugerir estrategias de remediación que serán eficientes y precisas si se lleva a cabo su correcta implementación.

Cabe señalar que a pesar del amplio uso del método DRASTIC en diversas partes del mundo, su eficacia no ha sido siempre exitosa y los resultados que se obtienen deben ser tomados con precaución ya que es un método subjetivo en cuanto a la ponderación de los pesos de las variables y por ende está dirigido por el investigador que lo realiza (Rupert, 2001 y Lima et al., 2011 en Albornoz-Euán et al., 2015). Con esto en mente el análisis realizado llevó a cabo las modificaciones propuestas (**Apartado 7.3.1**) generando un método DRASTIC_{mod} que considera las características medioambientales muy particulares de la ZMM y el acuífero subyacente (**Tabla 7.8** y **Figura 8.33**).

Este estudio consideró relevantes algunas de las estrategias y estudios de vulnerabilidad ante la contaminación que coinciden en involucrar 1) la capacidad del filtro natural de los sistemas, 2) la capacidad de atenuación por actividades biológicas (Aguilar et al., 2011 y Ruiz-Marín et al., 2013 en Aguilar-Duarte et al., 2016) y 3) las características físicas y ambientales (Lin, 2003, Ravbar y Goldscheider, 2009 y Aguilar et al., 2013 en Aguilar-Duarte et al., 2016), siendo éstas últimas las aplicadas en el modelo utilizado. En este estudio se rescata la visión transdisciplinaria, al integrar el grado de incidencia de los EPT y los TC's con la vulnerabilidad de la ZMM y el acuífero subyacente, bajo los lineamientos normativos expresados en la **Tabla 8.11** para los tres usos potenciales del suelo (industrial, residencial y comercial).

Como ejemplo de lo anterior, en nuestro estudio se considera que geoespacialmente la vulnerabilidad alta se localiza al sureste, centro y norte de la ZMM, la vulnerabilidad media al centro y sur, la vulnerabilidad baja al norte (**Figura 8.33**) y que dicha vulnerabilidad está asociada a las áreas donde el uso y tipo de suelo es urbano, las condiciones edafológicas cuentan con una limitada profundidad de suelo, existe una elevada zona de precipitación y humedad y los cuerpos de agua existentes están a la intemperie (**Apartado 6.1.1**). Entonces, bajo este marco, los TC's que se encuentran al norte de la ZMM pueden interaccionar más rápido con el acuífero subyacente en función de su poca profundidad (Villasuso et al., 1988 en Graniel-Castro et al., 2003), facilitando la movilidad de los EPT al acuífero (**Tabla 8.10**) si algún fenómeno fisicoquímico, antropogénico u otro se llega a presentar (superávit hidráulico, huracán, urbanización, deforestación, u otros); sin embargo, debido a que la mayoría de las actividades económicas, industriales y zonas urbanas se localizan al sur (Árcega-Cabrera y Romero-Bernical, 2011) la interacción de los EPT será menor en función de densidad de TC's (**Figura 8.17**).

Resumiendo, la vulnerabilidad es mayor en la zona norte, centro y sureste de la ZMM, pero el peligro se ubica en la zona sureste y este principalmente (mayor densidad de TC's), por lo que de tomar en cuenta exclusivamente el resultado de un DRASTIC no modificado, se estaría ubicando la zona de mayor presión ambiental en el norte, cuando la tendencia encontrada muestra que se ubica en zona sureste y este de la ZMM.

En cuanto las características de los TC's tenemos que los sitios 1A, 2C, 5C y 6C contienen gran cantidad de MO y GF en coordinación con una alta concentración de EPT que superan el límite normativo, por consiguiente, es probable que en los TC's se estén presentando las condiciones ambientales para que se acumulen los EPT en el tiempo, generando así zonas potencialmente peligrosas (**Figura 8.20**).

Tomando en cuenta el estudio previo de (González y Rodríguez, 2006) del antiguo relleno sanitario de Mérida, los diversos para metros geodáfcos que favorecen o afectan la movilidad de los EPT (Förstner, 1987; Galán y Romero, 2008; Hernández, 2012) e identificando que la mayor densidad de TC's analizados están espacialmente distribuidos al sureste de la ZMM (**Figura 8.34**), se tiene que considerar que si los EPT llegan a permear como lixiviados hacia el agua subterránea, en un futuro se puede llegar a generar alguna problemática de salud pública o ambiental incluso hacia la zona norte dados los flujos preferenciales generales del acuífero y la poca profundidad de la tabla de agua en esa zona (**Figura 6.5**) (Villasuso et al., 1988; Marín, 1990; Buckley et al., 1994 en Graniel-Castro et al., 2003).

Con base en la clasificación categórica de los EPT el peligro de un sitio también está relacionado con aquellos EPT que se encuentran cercanos (10 % y 20 % por debajo) al valor de norma y que en el tiempo podrían llegar a representar un riesgo potencial elevado si el aporte de residuos sólidos a los TC's se mantiene. Aún más, cuando en promedio tenemos que la mitad de los EPT analizados (55 %) para cada TC probablemente representan un riesgo con base en su concentración; sin embargo, es recomendable llevar a cabo el análisis de la forma química (especiación), dinámica y cinética de los mismos, para poder evaluar su toxicidad e impacto en el sistema (Galán y Romero, 2008; Hernández, 2012; Mann et al., 2011). Esto resulta más urgente si tomamos en cuenta que en el 72 % de los TC's más de la mitad de los EPT determinados presentan una concentración que rebasa o es igual al valor de la norma (**Figura 8.19**). Es por lo anterior que para mejorar estudios futuros se recomienda lo anterior.

10. RECOMENDACIONES

Considerando los resultados del estudio respecto a la vulnerabilidad intrínseca en la ZMM, el peligro que representan los EPT identificados en las TC y el riesgo potencial de contaminación hacia la ZMM y el acuífero subyacente, se recomienda implementar un programa de monitoreo de TC's y de los EPT, así como generar y mejorar las estrategias de planeación, desarrollo, protección y manejo sostenible de los recursos naturales (suelos y agua), con el fin de anticipar o controlar los impactos generados por la contaminación y llevar a cabo su uso óptimo evitando su degradación anticipada (Elena, 2001; Garbisu et al., 2002).

Dentro de las recomendaciones dirigidas hacia las entidades competentes del Estado de Yucatán, se plantea:

1. Llevar a cabo una limpieza y traslado de los residuos sólidos identificados en los TC's a sitios de disposición final que cuenten con una adecuada captación de los lixiviados formados.
2. Llevar a cabo una estrategia de ordenamiento y manejo de residuos sólidos con el fin de evitar que se sigan generando tiraderos clandestinos.
3. Considerar el monitoreo *in situ* de todo el Estado para localizar los TC's existentes y llevar las estrategias de remediación y saneación.
4. Realizar medidas de limpieza preventivas, correctivas y de seguridad pública considerando como criterio la vulnerabilidad intrínseca de cada TC's (**Figura 10.36**), el peligro que representa (**Figura 10.37**) o el riesgo potencial (**Figura 10.38**), para solucionar la problemática de la contaminación identificada en este estudio, con el fin de prevenir daños ambientales y de salud pública en un futuro.

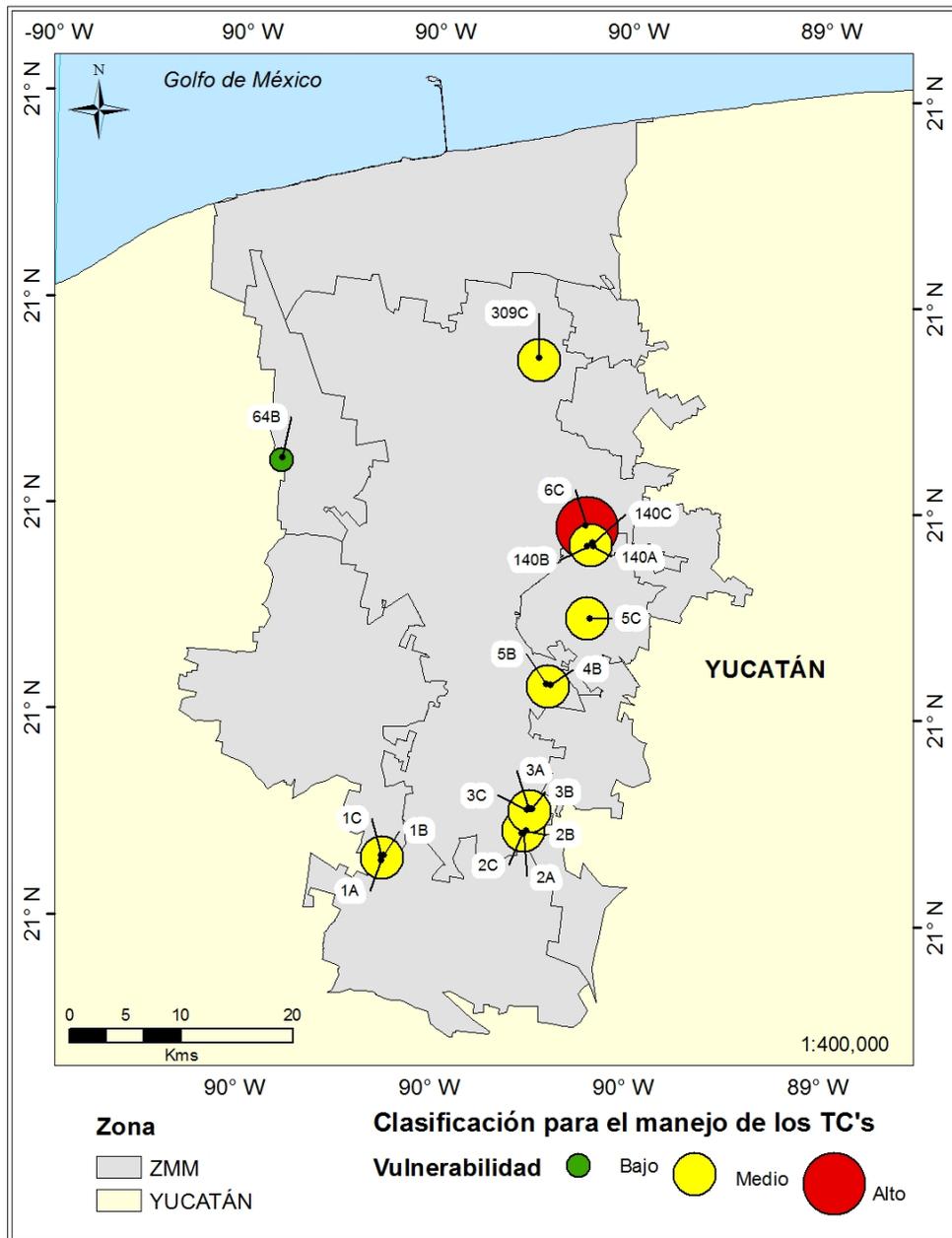


Figura 10.36: Manejo de los TC's por vulnerabilidad intrínseca mediante el método DRATICmod.

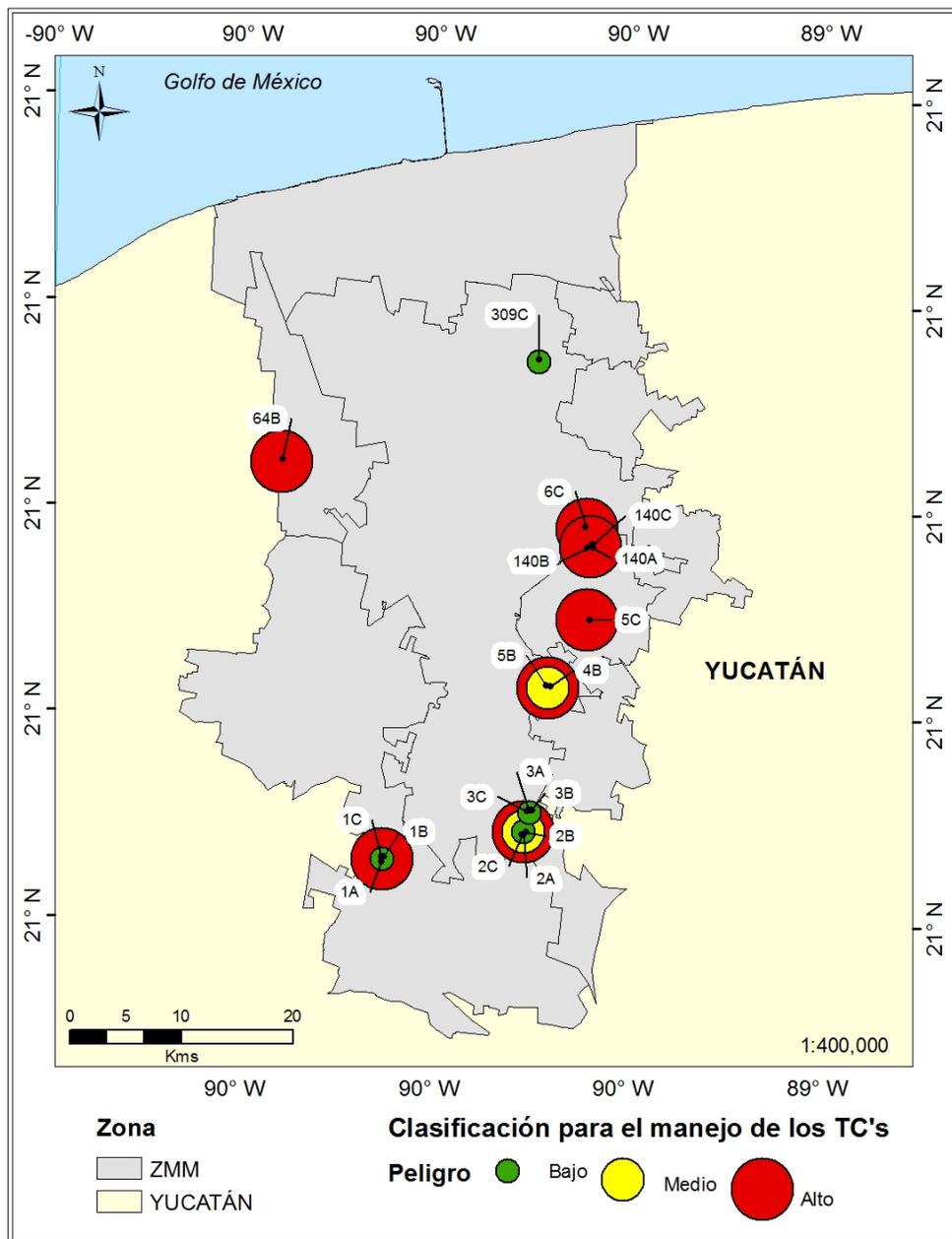


Figura 10.37: Manejo de los TC's por los criterios de peligro empleando la **Tabla 8.19**.

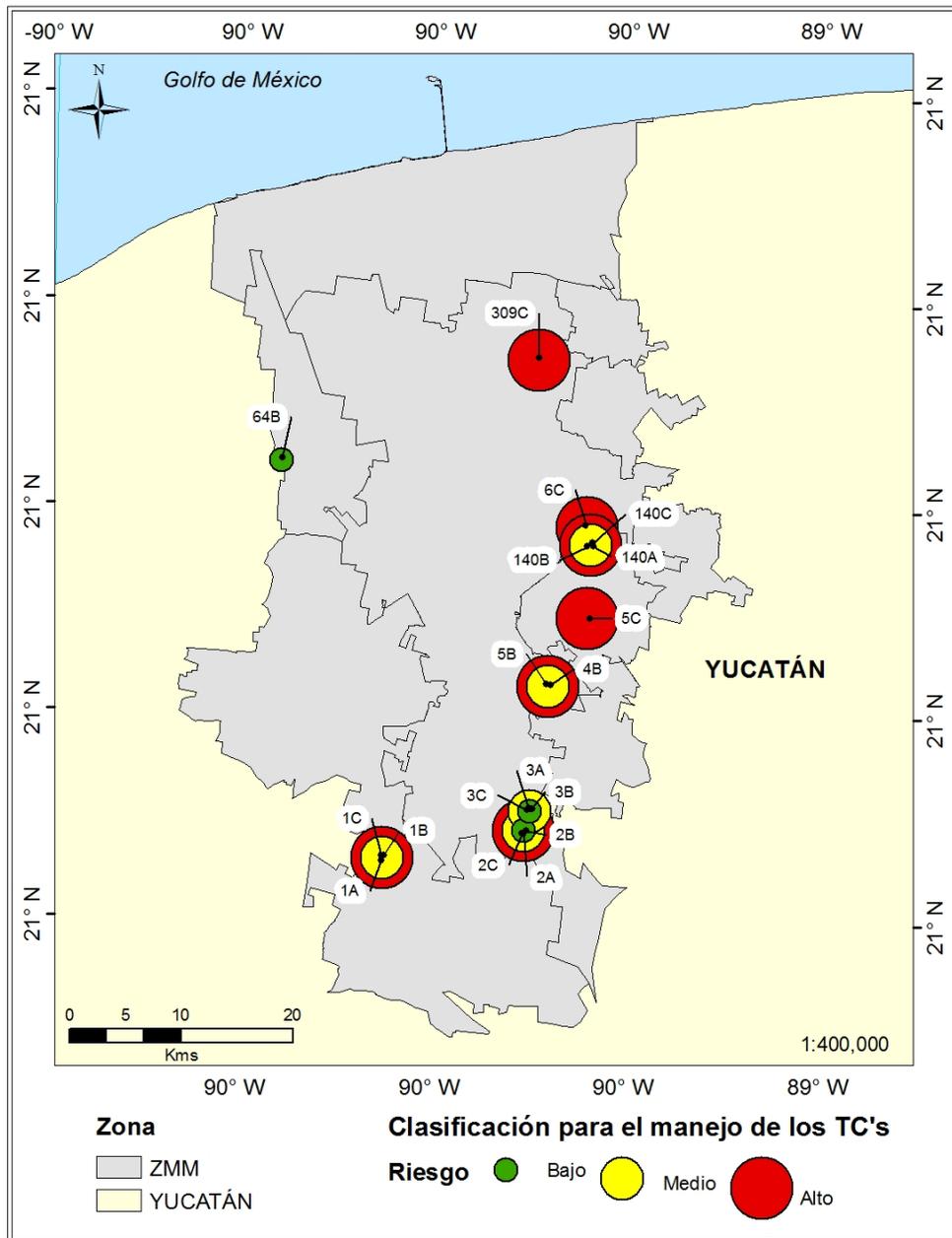


Figura 10.38: Manejo de los TC's por los criterios de riesgo potencial empleando la **Tabla 8.35**.

5. Con el fin de poder llevar a cabo alguna estrategia de remediación o mitigación se recomienda abordar en la literatura la implementación de tratamientos específicos (físicoquímico, biológico, térmico u otro) según la incidencia de los EPT encontrados (Volke y Velasco, 2002) (ver **Tabla 31** en el **Anexo 8.5**).

Es necesario seleccionar adecuadamente la técnica y tecnología (**Tabla 10.20**) que se enfoque directamente en las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes, las características de los TC's y su ubicación, para evitar que se implemente alguna técnica incorrecta que promueva la movilidad o anticipe el deterioro de los recursos naturales (principalmente el suelo y agua) (Volke y Velasco, 2002). De acuerdo con Volke y Velasco, 2002, se recomienda seleccionar la tecnología de acuerdo a los procesos más factible y fáciles de implementar, considerando:

- Los procesos químicos de los contaminantes, sean estas reacciones de hidrólisis, oxidación, reducción y fotólisis.
- Los procesos físicos o de transporte como la sorción (retención de las sustancias por otra al entrar en contacto), advección (transporte de la sustancia por el medio en donde se encuentra), dispersión, difusión, volatilización y solubilización.
- Los procesos biológicos de biodegradación, biotransformación y toxicidad.

Tabla 10.20: Ventajas y desventajas en el tratamiento de EPT (Volke y Velasco, 2002).

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Biológico	<ul style="list-style-type: none"> • Son efectivos en cuanto a costo. • Son tecnologías más benéficas para el medio ambiente. • Los contaminantes generalmente son destruidos. • Se requiere un mínimo o ningún tratamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren mayor tiempo de tratamiento. • Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos. • No puede emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.
Físicoquímico	<ul style="list-style-type: none"> • Son efectivos en cuanto a costo. • Pueden realizarse en periodos cortos. • El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los residuos generados por técnicas de separación deben tratarse o disponerse: aumento en el costo y necesidad de permisos. • Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación.
Térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Permite tiempo rápidos de limpieza 	<ul style="list-style-type: none"> • El grupo de tratamiento más costoso. • Los costos aumentan en función del empleo de energía y equipo. • intensivos en mano de obra y capital.

6. Llevar a cabo una estrategia de concientización social, empresarial y gubernamental para el manejo adecuado de los residuos sólidos generados. La separación y la reutilización son partes fundamentales.

7. Llevar a cabo la gestión estricta de leyes o normas enfocadas en monitorear constantemente los sitios impactados y en caso de ser necesario, multar y obligar a sanear el sitio.
8. Solicitar a las instancias federales fondos para generar más plantas de tratamiento de residuos sólidos en el estado de Yucatán.
9. Informar a la población el estado actual de la contaminación mediante la implementación de cursos, talleres, videos, libros y otros medios de comunicación, para generar una conciencia en el cuidado de los recursos y el impacto que se está generando por el manejo inadecuado de sus residuos sólidos.

11. CONCLUSIONES

1. En la zona metropolitana de Mérida (ZMM) se está llevando a cabo la incorrecta disposición de residuos sólidos urbanos e industriales, evidencia de esto son los tiraderos clandestinos (TC's) ubicados en el presente estudio y que están ampliamente distribuidos en la zona.
2. La degradación medioambiental de los residuos sólidos urbanos e industriales en los TC's está generando un aporte al suelo subyacente de algunos elementos potencialmente tóxicos (EPT) en concentraciones superiores a los límites propuestos por las normas nacionales e internacionales establecidos para el suelo, utilizado para actividades agrícolas, residenciales o comerciales.
3. De acuerdo con las características medioambientales y empleando el método DRASTICmod, el 21.6% de la ZMM presenta una vulnerabilidad intrínseca baja (intervalo de 236 - 265), el 56.9% una vulnerabilidad intrínseca media (intervalo de 266 - 294) y el 21.5% una vulnerabilidad intrínseca alta (intervalo de 295 - 323).
4. Las zonas con mayor vulnerabilidad intrínseca se localizan al sureste, centro y norte de la ZMM y coinciden con las áreas donde el uso y tipo de suelo es urbano, las condiciones edafológicas cuentan con una limitada profundidad de suelo, existe una elevada zona de precipitación y humedad y los cuerpos de agua existentes son superficiales.
5. En la zona norte, aunque se presenta una baja vulnerabilidad se tiene que tener en cuenta que los TC's que se encuentren cercanos pueden interactuar más rápido con el acuífero subyacente por la poca profundidad con la que cuenta.
6. El 55% de los EPT presentes en los diferentes TC's representan un peligro alto para el acuífero subyacente ya que superan o son iguales al límite normativo.

7. El 72% de los TC's analizados en el estudio presentaron 6 o más EPT con un riesgo alto para el acuífero subyacente.
8. Considerando el riesgo alto para el acuífero subyacente de la ZMM dado por la vulnerabilidad intrínseca y específica es necesario llevar a cabo estrategias de mitigación y remediación para evitar que el acuífero se contamine.

Referencias

- Agüero-Valverde, J. y Pujol-Mesalles, R. (2000). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. *Presentado en la VII Conferencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI /Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía*, Páginas 20–22.
- Aguilar, I. A. (2010). Calidad del agua: Un enfoque multidisciplinario. *Instituto de Investigaciones Económicas UNAM*, Página 308.
- Aguilar-Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., y Delgado, C. (2013). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(2):243–263.
- Aguilar-Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., Ihl, T., y Delgado, C. (2016). IVAKY: Índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3):913–933.
- Akram, A. H. H. y Basheer, A. E. S. (2011). Assessment of aquifer vulnerability to contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip-Palestine, using the DRASTIC model within GIS environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(4):833–847.
- Albornoz-Euán, B. s. I., González-Herrera, R. A., Pacheco-Ávila, J. G., y Zetina-Moguel, C. (2015). Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación Aplicando DRASTIC Modificado al Acuífero de Yucatán. *Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental, A.C. (AMICA)*, Página 6.
- Alcocer, D. J., Lugo, V. A., Sánchez, R. M., y Escobar, B. E. (1999). Contaminación del agua subterránea, en la Península de Yucatán. *Imagen Veterinaria*, 1(1):41–50.
- Aller, L., Lehr, J. H., y Petty, R. (1987). DRASTIC: A Standardized System to Evaluate Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. *National Water Well Association*, Páginas 38–57.
- Arcega-Cabrera, F., Armienta, M. A., Daesslé, L. W., Castillo-Blum, S. E., Talavera, O., y Dótor, A. (2009). Variations of Pb in a mine-impacted tropical

- river, Taxco, Mexico: Use of geochemical, isotopic and statistical tools. *Applied Geochemistry*, 24(1):162–171.
- Arcega-Cabrera, F., Castillo-Blum, S. E., y Armienta, M. A. (2010). Tetraethyl lead release from sediments in a mine-impacted tropical river. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 26(2):119–127.
- Arcega-Cabrera, F. y Fargher, L. F. (2016). Education, fish consumption, well water, chicken coops, and cooking fires: Using biogeochemistry and ethnography to study exposure of children from Yucatan, Mexico to metals and arsenic. *Science of the Total Environment*, 568:75–82.
- Arcega-Cabrera, F., Noreña-Barroso, E., y Ocegüera-Vargas, I. (2014a). Lead from hunting activities and its potential environmental threat to wildlife in a protected wetland in Yucatan, Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 100(1):251–257.
- Arcega-Cabrera, F., Velázquez-Tavera, N., Fargher, L., Derrien, M., y Noreña-Barroso, E. (2014b). Fecal sterols, seasonal variability, and probable sources along the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. *Journal of contaminant hydrology*, 168:41–49.
- Árcega-Cabrera, F. E. y Romero-Bernical, D. (2011). Análisis del riesgo potencial del acuífero de la zona metropolitana de Mérida a través de sistemas de información Geográfica. *Centro Mario Molina*, Página 42.
- Arnal, N. (2010). Intoxicación por cobre. Efectos sobre la composición lipídica y el sistema de defensa antioxidante. *Facultad de Ciencias Médicas*, Página 277.
- ATSDR (1999). Toxicological Profile for Cadmium. *U.S. Department of Health and Human Services*, Página 10.
- Auge, M. (2004a). Hidrogeología Ambiental. *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)*, Página 127.
- Auge, M. (2004b). Vulnerabilidad de acuíferos: Conceptos y métodos. *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)*, 4:38.
- Bahillo, C. G. (2005). Crecimiento económico y desarrollo sostenible en el medio rural ¿Utopía o realidad? *Desarrollo Rural y Cooperativismo Agrario*, 9:9–20.
- Bautista, F. (2011). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la península de Yucatán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2):7–8.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., y Aguilar, Y. (2015). Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán México: Enfoque Geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 2(6):303–315.
- Bautista-Cruz, A., Etchevers, B. J., del Castillo, R. F., y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Asociación Española de Ecología Terrestre*,

- revista ECOSISTEMAS*, 13(2):90–97.
- Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, J., Manu, A., y Lozano, R. (2003). Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en leptosoles cársticos. *Terra Latinoamericana*, 21(1):1–11.
- Bernache, P. G. (2006). Cuando la basura nos alcance: El impacto de la degradación ambiental. *CIESAS*, 1:551.
- Bolio, O. J. y Iracheta, C. A. (2014). Programa Integral de Desarrollo Metropolitano (PIDEM). *Coordinación Metropolitana de Yucatán (COMELY)*, Página 123.
- Bolio-Barrios, E. R., Cabrera-Sansores, A., Bautista, F., y Pacheco-Ávila, J. (2011). Uso de la metodología EPIK para determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México. *Teoría y Praxis*, 9:55–72.
- Brown, L. R. (2004). SALVAR EL PLANETA. PLAN B: ECOLOGIA PARA UN MUNDO EN PELIGRO. *Paidós controversias*, 4:334.
- Bundschuh, J., Pérez, C. A., y Litter, M. (2008). IBEROARSEN: Distribución del Arsénico en las Regiones Ibérica e Iberoamericana. *CYTED*, Página 230.
- Caballero, S. E. D. (2011). Los rellenos sanitarios: Una alternativa para la disposición final de los residuos sólidos urbanos. *CienciaUAT*, 6(2):14–17.
- Cabrera-Sansores, A., Pacheco-Ávila, J. G., Cuevas, S. E., Ramírez, J., Comas, M., y Cámara, A. (2002). Hidrogeoquímica del Agua que Subyace a la JAPAY I, en Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería*, 6(3):29–40.
- Cánepa, V. L., Maldonado, V., Barrenechea, A., y Aurazo, M. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. *CEPIS-OPS*, Página 597.
- Castro, F., Hogenboom, B., Baud, M., Martínez-Alier, J., Sejenovich, H., Walter, M., Kleiche-Dray, M., Waast, R., Andrade A., P., Bull, B., Aguilar-Støen, M., Parker, C., Baigorrotegui, G., Estenssoro, F., Toni, F., Hirsch, C., Barkin, D., Lemus, B., y Urkidi, L. (2015). Gobernanza ambiental en América Latina. *Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales*, 1:376.
- CENAPRED (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. *Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres*, 1:222.
- Cervantes, R. M. y Sánchez, S. R. (1987). Recurso, Ecología, Sociedad. *Revista de la Coordinación General de Estudios de Posgrado, Ecología*, 6:1–17.
- CIMARES (2011). Política nacional de mares y costas de México: gestión integral de las regiones más dinámicas del territorio nacional. *México: Comisión Intersectorial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas*, Página 97.
- Civita, M. y De Maio, M. (1997). SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

- Metodologia and automatizzazione. *Metodologia and automatizzazione*, Página 191.
- CNUMAD (1992). Declaracion De Rio Sobre El Medio Ambiente Y El Desarrollo. Páginas 1–4.
- CONAGUA (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. *Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, Página 138.
- CONAPO (2015). Índice de rezago social por municipio 2015. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*.
- CPEUM (1917). Contitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. *Diario Oficial de la Federación*, Página 295.
- CPEY (2014). Constitución Política del Estado de Yucatán. *Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán*, Página 150.
- Cuevas, E., Pacheco-Ávila, J. G., Cabrera, S. S. A., Coronado, V., Vázquez, J., y Comas, M. (2002). Calidad química y bacteriológica del agua subterránea en el principal campo de pozos para el abastecimiento de Mérida, Yucatán, México. *Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.*, Página 10.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I. C., y Zwahlen, F. (2002). Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10(2):340–345.
- Davis, A. D., Long, A. J., y Wireman, M. (2002). KARSTIC: A sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. *Environmental Geology*, 42(1):65–72.
- DEC-TN (2010). Assessment Levels for Soil , Sediment and Water. *Department of Environment & Conservation-State of Tennessee*, Páginas 1–56.
- Delgado, C., Pacheco-Ávila, J. G., Cabrera-Sansores, A., Batllori, S. E., Orellana, R., y Bautista, F. (2009). Calidad agrícola del acuífero del estado de Yucatán, México. *CIGA-UNAM*.
- Doerfliger, N. y Zwahlen, F. (1997). EPIK: A new method for outlining of protection areas in karstic environment. *karst waters and environmental impacts*, Páginas 117–123.
- Durán, F. H. (2013). El marco político: políticas ambientales y desarrollo sustentable. *German Agency for Technical Cooperation*, Páginas 13–36.
- Durán, R. y Méndez, M. (2010). Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. *Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA*, Página 496.
- Duruibe, J. O., Ogwuegbu, C., y Egwurugwu, Y. (2007). Contaminación de Metales Pesados y Efectos Biotóxicos Humanos. *International Journal of Physical Sciences*, 2(5):112–118.

- Elena, J.-C. B. (2001). La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada. *Colegio de Ingenieros ambientales de México, A. C., Instituto de Ingeniería de la UMAM y FEMISCA*, Página 936.
- Febles-Patrón, J. L. y Hoogesteijn, A. (2008). Análisis del Marco Legal para la Protección del Agua Subterránea en Mérida, Yucatán. *Revista UADY Ingeniería*, 3(3):71–79.
- Fernández, C. P. P. (2011). Determinación de la fracción biodisponible de metales trazas (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) en suelos tratados con biosólidos por medio de métodos biosimuladores validados a través de ensayos con plantas de maravilla. *Universidad de Chile*, Página 59.
- Förstner, U. (1987). Changes in metal mobilities in aquatic and terrestrial cycles. *Lewis Publishers*, Páginas 3–26.
- Foster, S. y Hirata, R. (1988). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. *Manual del CEPIS*, 7:79.
- Friday, G. P. (1999). Ecological Screening Values for Surface Water, Sediment, and Soil. *Savannah River Site*, (WSRC-TR-98-00110):68.
- FUNDAR (2002). Minería, comunidades y medio ambiente: Investigaciones sobre el impacto de la inversión canadiense en México. *Centro de Análisis e Investigación A.C.*, Página 40.
- GAHP (2013). Summary Guidance on Soil Screening Levels. *Global Alliance on Health and Pollution*, Página 8.
- Galán, H. E. y Romero, B. A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 10:48–60.
- Garbisu, C., Amézaga, I., y Alkorta, I. (2002). Biorremediación y ecología. *ECOSISTEMAS-AEET*, 11(3):1–2.
- García, C. D., Olivares, R. S., Santana, R. J. L., Lima, C. L., Ruiz, G. L., Calderón, P. P. A., y Ávila, R. I. (2012). Evaluación De Riesgos a La Salud Por Exposición a Metales Pesados En Cercanías De Sitios Potencialmente Peligrosos Con Actividad Agrícola. *Revista Cubana de Salud y Trabajo*, 13(1):10–8.
- GEA (2018). Grupo de Estudios Ambientales.
- Gijón, Y. N., Pacheco-Ávila, J., Euán, Á. J. I., y Pérez-Ceballos, R. (2009). Análisis espacial de la vulnerabilidad y riesgo del agua subterránea a la contaminación en el Estado de Yucatán, México. *CIGA-UNAM*, Página 1.
- Goldscheider, N. (2005). Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrological Journal*, 13(4):555–564.
- Goldschmidt, V. (1970). Geochemistry. *Oxford University Press*, Página 16.
- Goncharuk, V. V., Bagrii, V. a., Mel'nik, L. a., Chebotareva, R. D., y Bashtan, S. Y.

- (2010). The use of redox potential in water treatment processes. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 32(1):1–9.
- González, H. R. y Rodríguez, C. R. (2006). Contaminación del acuífero yucateco por lixiviado de residuos municipales. *IAHS-AISH*, (308):635–640.
- González, R. M., Moguel, C. Z., Bolio, M. C., y Canul, R. P. (2004). Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb en sedimentos y en tres especies de pepino de mar (clase holothuroidea) de las costas del Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, 8(2):7–19.
- González-Fierro, A., Vázquez-Botello, A., Villanueva-Fragoso, S., y Ponce-Vélez, G. (1995). Presencia de metales en sedimentos recientes y organismos de la laguna Sontecomapan, Veracruz, México. *Hidrobiológica*, 4(1-2):35–43.
- Grael-Castro, E., Carrillo-Rivera, J., y Cardona-Benavides, A. (2003). Dispersividad de solutos en el carst de Yucatán, México. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 7(3):49–56.
- Hernández, H. J. (2012). Especiación de metales pesados contaminantes en los suelos y acuífero del río de los remedios. *Instituto Politécnico Nacional*, Página 112.
- Herrera-Silveira, J. A. y Morales-Ojeda, S. M. (2009). Impactos al acuífero y su efecto en la condición costera de Yucatán: Mareas rojas y eutrofización. In Bautista, F., Quintana, P., Aguilar, D. Y., Ávila-Pacheco, J. G., y Cabañas, D., editors, *Análisis de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la península de Yucatán*, Página 12. Mérida, Yucatán.
- INECC y SEMARNAT (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*, Página 201.
- INEGI (2002). Estudio Hidrológico del Estado de Yucatán. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, Página 92.
- INEGI (2010). Perfil sociodemográfico. Estados Unidos Mexicanos. Censo de Población y Vivienda 2010. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, 12:156.
- INEGI (2011). Residuos Sólidos Urbanos. *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2011*.
- INEGI (2014). Residuos sólidos urbanos por municipio y delegación 2014. *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015*.
- INEGI (2015). Recolección per cápita diaria de residuos sólidos urbanos por entidad federativa. *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015*.
- ISDR (2004). Priority areas to implement disaster risk reduction “Building disaster-resilient communities and nations”. *United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR)*.
- IUSS, SRIC, y FAO (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos*, 103:117.

- Jaramillo, J., Cepeda, F., y OPS (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Panamericana de la Salud (CEPIS/OPS)*, Página 10.
- Jiménez, B., Marín, L., Morán, D., Fuentes, O. A. E., Alcocer, J., y Martínez, V. H. (2005). El agua en México vista desde la academia. *Academia Mexicana de Ciencias*, Página 411.
- John, E. (2011). Nature's building blocks: An A-Z Guide to The Elements. *Oxford University Press*, Página 584.
- Juárez-Sanz, M., Cerdán, M., y Sanchez-Sanchez, A. (2007). Hierro en el sistema suelo-planta. *Química del Sistema Suelo Planta*, Páginas 1–32.
- LGEEPA (2012). Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. *Diario Oficial de la Federación*, Página 114.
- LGPGIR (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. *Diario Oficial de la Federación*, Página 52.
- López, M. R., Cobos, G. V. M., y von Osten, J. R. (2009). Evaluación de los niveles de hidrocarburos (alifáticos y aromáticos policíclicos) en el agua subterránea de la ciudad de Mérida, Yucatán, México. In Bautista, F., Quintana, P., Aguilar, D. Y., Ávila-Pacheco, J. G., y Cabañas, D., editors, *Análisis de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la península de Yucatán*, Página 19. Mérida, Yucatán.
- Lothar, J. (1830). Tabla Periódica de los Elementos. Páginas 1–10.
- Mann, R. M., Vijver, M. G., y Peijnenburg, W. J. G. M. (2011). Metals and Metalloids in Terrestrial Systems: Biomagnification and Subsequent Adverse Effects. *Ecological Impacts of Toxic Chemicals*, Páginas 43–62.
- Marín, L. E., Steinich, B., Pacheco, J., y Eseolero, O. a. (2000). Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer, Merida, Yucatan, Mexico. *Geofísica International*, 39(004):359–365.
- Martí, C. M. A. (2007). Principios de ecotoxicología: diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente. *Tebar*, Página 320.
- Mendez, N. R., Medina, H. E., Quintal, F. C., Castillo, B. E., y Sauri, R. M. (2002). Tratamiento por adsorción de lixiviados de un relleno sanitario. *AIDIS*, Páginas 1–8.
- Morales, C. J. (2007). Estudio para remoción de metales pesados en los lixiviados de rellenos sanitarios. *Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizale*, Página 96.
- Mujica, V., Amador, M. A., Torres, M., y de Jesús, F. (2003). Mercurio y metales tóxicos en cenizas provenientes de procesos de combustión e incineración.

- Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(2):93–100.
- Nájera, H., Castañón, J., Figueroa, J., y Rojas-Valencia, M. (2009). Caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *REDISA*, Páginas 1–9.
- NCR (1993). Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty. *National Academies Press*, Página 224.
- Nguyet, V. T. M. y Goldscheider, N. (2006). A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. *Hydrogeology Journal*, 14(8):1666–1675.
- Ocoda, L. (2004). Significado Probabilístico de los Calificativos Bajo, Medio y Alto de Peligro, Riesgo, Vulnerabilidad y Probabilidad de Desastre. *Revista de Investigación de Física*, 7(1,2):38–44.
- OECD (1994). OECD core set of indicators for environmental performance reviews. *Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, Environment Monographs*, (83).
- Pacheco-Ávila, J. G., Sansores, A. C., y Ceballos, R. P. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería Revista Académica*, 8(2):165–179.
- PAECC (2014). Programa Especial de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Yucatán. *Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán*, Página 119.
- Pérez-Ceballos, R. y Pacheco-Ávila, J. (2004). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería Revista Académica*, 8(1):33–42.
- Pérez-Ceballos, R., Pacheco-Ávila, J., y Euán-Ávila, J. (2008). Evaluación a escala regional de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México. *Ambiente Ecológico*, Páginas 1–18.
- Pertegas, S. y Pita, S. (2001). Investigación: La distribución normal 1/12. *Cad Aten Primaria*, 8:268–274.
- PNPGIR (2009). Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012. *Diario Oficial de la Federación*, Página 174.
- PSIDS (2015). Programa Sectorial de Infraestructura para el Desarrollo Sustentable. *Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán*, Página 72.
- Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, 28(1):32–53.
- Ravbar, N. y Goldscheider, N. (2007). Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of Karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsologica*, 36(3):397–411.

- Ravbar, N. y Goldscheider, N. (2009). Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. *Hydrogeology Journal*, 17(3):725–733.
- Rocío, L.-J. (1989). El efecto de los basureros sobre los suelos. *Omnia*, 5(13):65–69.
- Sancha-Fernández, A. M. y Espinoza, C. (2002). Evaluación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas con compuestos orgánicos volátiles: caso de la ciudad de Santiago de Chile. *AIDIS-MEMISCA*, 28:1–8.
- SEDESOL (2017). Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2017. *Diario Oficial de la Federación*.
- SEDUMA (2009). Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. *DOF*, Página 120.
- SEMARNAT (2003). NOM-083-SEMARNAT-2003: Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. *Diario Oficial de la Federación*, Página 19.
- SEMARNAT (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, Página 382.
- SEMARNAT y GTZ (2006). Guía para la elaboración de programas municipales para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*, Página 76.
- Sepúlveda, S. y Edwards, R. (1996). Desarrollo sostenible: Agricultura, recursos naturales y desarrollo rural. *Iica/Bmz/Gtz*, Página 501.
- Shirazi, S., Imran, H., y Shatirah, A. (2012). GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: a review. *Journal of Risk Research*, 15(8):991–1011.
- Solano Marín, A. M. (2005). Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc. *TDR (Tesis Doctorales en Red)*, Página 370.
- SSA (2007). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. *Diario Oficial de la Federación*.
- Stempvoort, D. V., Ewert, L., y Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: A GIS-Compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18(1):25–37.
- Tello de Meneses, V. L. (2014). Variación anual de As y metales en sedimentos de

- Ría Lagartos, Yucatán. *TESIUNAM*, Página 97.
- Trejo, R. (1996). Procesamiento de la basura urbana. *Trillas*, Página 283.
- Valcarce, R. M. y Rodríguez, W. (2011). Cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos cubanos empleando la metodología Ekv modificada. *Taller sobre Aguas subterráneas y Contaminación*, 7:1–7.
- Van Beynen, P., Niedzielski, M., Bialkowska-Jelinska, E., Alsharif, K., y Matusick, J. (2012). Comparative study of specific groundwater vulnerability of a karst aquifer in central Florida. *Applied Geography*, 32(2):868–877.
- Volke, S. T. y Velasco, T. J. A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. *Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)*, Páginas 1–64.
- White, W. M. (2012). Geochemistry: Portrait of Earth's coming of age. *Nature*, 485(7399):452–453.
- YARA (2014). Heavy Metal Guidelines in Soil Technical Bulletin. *Technical Bulletin Yara-UK*, (6):1.
- Zúñiga-Ontiveros, A. (2012). Dinámica y Toxicidad Potencial de Metales en la Laguna de Celestún, Yucatán México. *TESIUNAM*, Página 97.
- Zwahlen, F. (2003). Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers. *European Commission for Science*, Página 42.

Anexos

Elementos Potencialmente Tóxicos

Tabla 21: Arsénico (As)

Arsénico (As)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la salud
<p>Símbolo: As Número Atómico: 33 Peso Atómico: 74.92 g/mol Punto de Sublimación: 616°C (Lothar-Meyer, 1830; John, 2011).</p> <p>De acuerdo con su abundancia en la corteza terrestre se posiciona en el lugar número 53, con una concentración estimada de 1.5 a 1.7 mg/kg, en algunos suelos incluyendo urbanos de 1 a 15.9 mg/kg, en agua de mar de 1.6 ppb y en la atmósfera en concentraciones traza (de 1 a 3 ng/m³), sin embargo, su concentración puede aumentar por la actividad antropogénica de la zona (de 100 a 300 ng/m³ en la industria del carbón o eléctrica) (Albert, 1997; Nordberg et al., 2001; John, 2011; Alekseenko y Alekseenko, 2014).</p> <p>Una de las principales causas de la liberación de As al ambiente se da por actividades antropogénicas (80000 ton/año) tales como la minería y el manejo inadecuado de RSU (Albert, 1997; Bundschuh et al., 2008; John, 2011; Matschullat, 2000).</p> <p>En el ambiente su especiación va a depender directamente del parámetro redox, pH, otras especies químicas presentes y la actividad biológica en la MO. La desorción será influenciada directamente por la temperatura y la salinidad bajo condiciones típicas (pH entre 6.5 y 8.5 en aguas subterráneas) (Bundschuh et al., 2008; Smedly et al., 2001 en Ziegler-Rivera, 2014).</p>	<p>Entre los compuestos inorgánicos en la industria los más utilizados son el tricloruro de As (AsCl₃) usado para la industria de la cerámica; el trióxido de As (As₂O₃) en la industria textil para conservar cuero y madera; el arsenito cálcico (Ca (As₂H₂O₄)) y el acetoarsenito cúprico (Cu (COOCH₃)₂ 3Cu(AsO₂)₂) son utilizados como insecticidas y pigmentos para barcos y submarinos; el arsenito sódico (NaAsO₂) como herbicida, inhibidor de la corrosión y como agente de secado en la industria textil (Albert, 1997; Nordberg et al., 2001).</p> <p>Dentro de los compuestos orgánicos más comunes está el ácido cacodílico ((CH₃)₂AsOOH) que se utiliza para la fabricación de herbicidas y defoliantes y la dimetilarsina y la trimetilarsina que están presentes en la transformación metabólica de los compuestos de As en bacterias y hongos (Albert, 1997; Nordberg et al., 2001).</p> <p>En México sólo se ha detectado la presencia de As de forma natural en aguas subterráneas del norte, tal es el caso del acuífero aluvial del noroeste, norte y centro de México, áreas de actividad minera del norte y centro de México y aguas geotérmicas del centro de México (Arreguín-Cortés et al., 2010).</p> <p>A nivel mundial en el año 2016 la minería de As fue alrededor de 36,500TM (USGS, 2017).</p>	<p>En su forma orgánica el As llega a causar efectos tóxicos, sin embargo, los agentes hemolíticos utilizados en la industria (gas arsina y arsinas sustituidas) llegan a ser letales al instante cuando se inhalan concentraciones mayores a 250 ppm, así también, en la inhalación de 25 a 50 ppm en un periodo de 30 minutos (Nordberg et al., 2001).</p> <p>Por otra parte, la exposición al As inorgánico suele ir acompañada de anemia y leucopenia, especialmente granulocitopenia, cáncer de piel, pulmón, hígado y linfa. Así también, llega a ser letal en la ingesta de 70 a 180 mg de trióxido de As o en su defecto también causar irritación de estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel e irritación de los pulmones, conjuntivitis, bronquitis y disnea, molestias gastrointestinales, vómitos, perturbación en el corazón, daño en el cerebro, entre otros padecimientos (Albert, 1997; ATSDR, 2007; Duruibe et al., 2007; Förstner, 1987; OMS, 2016).</p> <p>La Agencia de Protección Ambiental (EPA), la Norma Oficial Mexicana de Salud Ambiental (NOM-127-SSA1-1994) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) limitan su concentración de 50 a 10 ppb/L en el consumo de agua potable, la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) limita su exposición promedio a 10 mg/m³ de As en el aire del trabajo (jornada de 8 o 24 horas al día) y la Alianza Global sobre Salud y Contra la Contaminación (GAHP) propone un límite en suelo residencial de 0.61 ppm, industrial de 2.4 ppm y agrícola de 12 ppm, entre otras organizaciones (SSA, 2000; EPA, 2001; ATSDR, 2007; NIOSH/PCPS, 2011; GAHP, 2013; OMS, 2016).</p>

Tabla 22: Aluminio (Al)

Aluminio (Al)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la salud
<p>Símbolo: Al Peso atómico: 26.98 g/mol Punto de ebullición: 2467 °C Punto de fusión: 661 °C (Lothar-Meyer, 1830; NIOSH/IPCS, 2011 John, 2011).</p> <p>De acuerdo con su abundancia en la corteza terrestre se posiciona en el lugar número tres (8.2%), con una concentración estimada en suelos que varía de 0.5 a 10% (aproximadamente de 38,200 mg/kg a 71,300 mg/kg), en agua de mar de 0.5 ppb y en la atmósfera en concentraciones traza, sin embargo, su concentración puede aumentar de acuerdo con la actividad industrial presente en la zona (Nordberg et al., 2001; John, 2011; Alekseenko y Alekseenko, 2014; Tello de Meneses, 2014).</p> <p>Debido a que naturalmente el Al forma parte de la estructura química del suelo (asociado con silicatos, Ba, Zn, V, Cr, Fe y más), su especiación en el medio va a depender directamente del parámetro pH, siendo los compuestos solubles los que determinarán el grado de toxicidad ambiental. Así pues, en intervalos de pH de 6.5 a 7.5 se formarán hidróxidos insolubles (Al(OH)₃), en medios ácidos sales solubles (Al⁺³) y en medios alcalinos compuestos aluminatos solubles (Al(OH)₄) (Botello et al., 2005; Tello de Meneses, 2014).</p>	<p>El Al es considerado el metal más importante y el más utilizado de la industria, debido a sus características su principal uso es para la formación de aleaciones principalmente con Cr, Zn, Si, Mn, Mg y Ni (Nordberg et al., 2001; ATSDR, 2008; ELIKA, 2014).</p> <p>En la industria los compuestos de aluminio son fundidos, extruidos y procesados para la fabricación de múltiples productos los cuales son 100% reciclables. Se le puede encontrar en la industria alimenticia (envases, utensilios, colorantes, sales y otros), eléctrica (alambres, cables y otros), de construcción (puertas, cerraduras y otros), aeroespacial, militar, automotriz, farmacéutica (astringentes, antiácidos, entre otros) y otras (Nordberg et al., 2001; ATSDR, 2008; Zúñiga-Ontiveros, 2012; ELIKA, 2014).</p> <p>A nivel mundial se estima que en el año 2016 la extracción de Al fue aproximadamente de 118,000TM, siendo el mineral más extraídos la bauxita (262,000TM), seguido de la gibbsita (Al₂O₃ · 3H₂O) y bohemita (Al₂O₃ · H₂O) por su importancia desde el punto de vista comercial (USGS, 2017).</p>	<p>Las personas se ven expuestas a partículas suspendidas de polvos, aerosoles, humos y otros, en la fabricación y refinamiento del metal, en los procesos de producción de polietileno, cracking del petróleo, caucho (cloruro de aluminio), en la ingesta de alimentos (aproximadamente de 3 a 100 mg Al/día), entre otros procesos (Albert, 1997; Nordberg et al., 2001; Nesse et al., 2003), sin embargo, la intoxicación por concentraciones elevadas (>100 µg/m³) dependerá directamente del pH y la presencia de ácido carboxílico en el tracto gastrointestinal que facilitará el grado de absorción o la formación de especies neutras de fácil eliminación (Alcalde, 2001; Nordberg et al., 2001; Nesse et al., 2003; John, 2011).</p> <p>La intoxicación viene acompañada de daños fisiológicos (alteración pulmonar, osteomalacia, entre otros), metabólicos como la enfermedad de Shaver (fibrosis intersticial progresiva) o trastornos conductuales por necrosis como la enfermedad Alzheimer (Alcalde, 2001; Crapper-McLachlan, 1986; Tello de Meneses, 2014; Zúñiga-Ontiveros, 2012).</p> <p>La EPA, la NOM-127-SSA1-1994 y la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) mediante el Nivel de Contaminación Máximo Secundario (SMCL) basado sólo en el sabor, olor y color, recomienda una concentración de Al de 0.05 a 0.2 mg/L en el consumo de agua embotellada y potable, la OSHA propone un límite legal de exposición de 15 mg/m³ de polvo total y de 5 mg/m³ de fracción respirable en una jornada de trabajo 8 hrs/día (Nordberg et al., 2001; Nesse et al., 2003; ATSDR, 2008; NIOSH/IPCS, 2011; ELIKA, 2014).</p>

Tabla 23: Bario (Ba)

Bario (Ba)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la salud
<p>Símbolo: Ba Número atómico: 56 Peso atómico: 137.2327 g/mol Punto de ebullición: 1637 °C Punto de fusión: 729 °C (Lothar-Meyer, 1830; NIOSH/IPCS, 2011; John, 2011).</p> <p>De acuerdo con su abundancia en la corteza terrestre se posiciona en el lugar número 14 (0.04%), con una concentración estimada en suelos de 500 mg/kg a 853.12 mg/kg, en agua de mar de 10 ppm (Océano Atlántico) a 20 ppm (Océano Pacífico) y en la atmósfera en concentraciones traza, sin embargo, su concentración puede aumentar de acuerdo con la actividad industrial presente en la zona (ATSDR, 1995; Nordberg et al., 2001; John, 2011; Alekseenko y Alekseenko, 2014).</p> <p>Debido a que el Ba se asocia con elementos como el S, C y O, además del Al, Zn, V, Cr y Fe presentes en los suelos, su especiación va a depender directamente de la mineralogía de arcilla, la materia orgánica (MO), carbonatos, otros iones (principalmente cloruro, nitrato y carbonato), el parámetro redox y el pH (a menor pH mayor solubilidad) (Goldschmidt, 1970; Church, 1972; Neubrand, 2000 en Kaur, 2013).</p>	<p>Desde el punto de vista comercial uno de los compuestos más utilizados en la industria es el sulfato bórico ($BaSO_4$), empleado para la fabricación de pinturas de alta calidad, como contraste en el diagnóstico radiológico y para la fabricación de vidrio, papel, marfil artificial y celofán. Así también, se emplea el hidróxido de bario ($Ba(OH)_2$), carbonato de bario ($BaCO_3$), óxido de bario (BaO), peróxido de bario (BaO_2), cloruro de bario ($BaCl_2$) y el nitrato de bario ($Ba(NO_3)_2$), para la fabricación de pirotecnia, lubricantes, pesticidas, anticorrosivos, pigmentos, caucho, ladrillos, cemento, cerámica, esmaltes, mármol, cristal, desecante de gases, disolvente, como agente oxidante, líquido de perforación, ablandador de agua, entre otras utilidades (ATSDR, 1995; Nordberg et al., 2001; Kaur, 2013).</p> <p>Se estima que a nivel mundial la producción de Ba para el año 2016 fue de alrededor de 7,140 TM (USGS, 2017).</p>	<p>Por su elevada manipulación industrial se han liberado compuestos tóxicos y peligrosos (principalmente compuestos solubles de cloruro, nitrato e hidróxido de Ba) que afectan a los organismos, principalmente cuando se encuentran disueltos en agua (lagos, ríos, arroyos y otros) y suelos (ATSDR, 1995; Kaur, 2013).</p> <p>Las personas se ven expuestas diariamente a concentraciones elevadas de Ba (aproximadamente 1 mg/día) principalmente en la ingesta de alimentos contaminados (NIOSH/IPCS, 2011; OMS, 2016).</p> <p>La intoxicación por Ba se acompaña de dificultades para respirar (neumoconiosis y baritosis), dolores gastrointestinales, alteraciones en los tejidos musculares y en el sistema nervioso central, inflamación en el cerebro e hígado, daños hepáticos y cardiovasculares, aumento en la presión sanguínea y la muerte (ingesta de cloruro) con concentraciones de 0.8 a 0.9 g (ATSDR, 1995; Nordberg et al., 2001; Kaur, 2013).</p> <p>El DHHS, la IARC y la EPA no han clasificado al Ba como carcinogénico en seres humanos, sin embargo, limitan su concentración a 0.002 ppm/L en el consumo de agua potable, así como, la NOM-127-SSA1-1994 a 0.7 mg/L. La OSHA el, Instituto Nacional para la Salud y Seguridad Ocupacional (U.S. NIOSH), el Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) y la Conferencia Americana de Sanitarios Industriales de Gobierno (ACGIH) proponen un límite de 5 a 15 mg/m^3, de 50 mg/m^3 y de 0.5 mg/m^3 respectivamente en el aire de trabajo con jornadas promedio de 8 hrs/día (ATSDR, 1995; Nordberg et al., 2001; NIOSH/IPCS, 2011).</p>

Tabla 24: Cadmio (Cd)

Cadmio (Cd)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la Salud
<p>Símbolo: Cd Número atómico: 48 Peso atómico: 112.411 g/mol Punto de ebullición: 766.8 °C Punto de fusión: 321.1 °C (Lothar-Meyer, 1830; NIOSH/IPCS, 2011; John, 2011).</p> <p>Por su abundancia en la corteza terrestre se posiciona en el lugar número 65, con una concentración estimada de 0.13 mg/kg, en suelos una variación que va de 0.07 a 1.1 mg/kg, en agua de mar 0.1 ppb (1 ppt en la superficie) y en la atmósfera en concentraciones traza de 1 a 50 ng/m³, sin embargo, su concentración puede aumentar de acuerdo con la actividad industrial presente en la zona (John, 2011; Alekseenko y Alekseenko, 2014; Kabata Pendias, 1986 en Salas-Fernández, 2016).</p> <p>En el medio, su especiación va a depender directamente del parámetro pH, encontrando como principales especies solubles en el suelo los iones libres de Cd²⁺, CdSO₄ y CdCl₂ (pH >6.5), sin embargo, en presencia de complejos orgánicos los principales iones serán CdCl⁺, CdOH⁺, CdHCO⁺, CdCl⁻, CdCl₂⁻, Cd(OH)⁻ y Cd(OH)₂⁻ (Kabata-Pendias, A. y Pendias, H., 1992b; Kabata-Pendias, A., 2001 en Solano Marín, 2005).</p>	<p>En la industria su principal uso es para la fabricación de baterías pequeñas (portátiles y recargables), teléfonos móviles, semiconductores, celdas solares, tubos electrónicos de vacío y películas fotográficas (silicatos y boratos) (ATSDR, 1999; Tello de Meneses, 2014). Así también, para la fabricación de agentes anticorrosivos o como protector de acumuladores y rectificadores, como compuesto en los procesos de electrodeposición con el acero, hierro y aleaciones con plata, para soldaduras y reactores nucleares, procesos de galvanotecnia (óxido, hidróxido y cloruro) y más (Nordberg et al., 2001; Jiménez, A. 2003b en Solano Marín, 2005).</p> <p>En la industria el sulfuro (amarillo) y el sulfoseleniuro (rojo) de Cd principalmente se emplean como pigmentos para plásticos, tintes y pinturas fosforescentes; el estearato como estabilizador térmico en el plástico de PVC (cloruro de polivinilo); el cloruro es utilizado para baños galvanoplásticos, colorante de pirotecnia, aditivo en solución de estaño, mordente para la impresión textil, espejos especiales, endurecimiento de cristales y cerámicas y como fungicida (ATSDR, 1999; Nordberg et al., 2001; Tello de Meneses, 2014).</p> <p>Ahora bien, se estima que a nivel mundial la producción de Cd en el año 2016 fue aproximadamente de 23,000 TM (USGS, 2017).</p>	<p>Debido a la extensa manipulación del Cd de forma industria el ser humano ha facilitado la liberación de compuestos tóxicos al medio, donde los organismos se ven expuestos a concentraciones elevadas principalmente en la ingesta de alimento contaminado (principalmente viseras, mariscos y arroz), inhalación de partículas suspendidas (polvo y humo de tabaco), contacto dérmico y transporte por vía materna (lactancia) (Galán y Romero, 2008; Nava-Ruíz y Méndez-Armenta, 2011; Madeddu, 2005, Mas y Azcue, 1993 en Salas-Fernández, 2016).</p> <p>En la intoxicación de carácter agudo por inhalación (≥1 mg/m³) se presentan alteraciones digestivas, fiebre, dolor torácico, disnea, neumonitis, edema pulmonar, anemia, albuminuria, hepatitis, anuria y en algunos casos la muerte (Solano Marín, 2005). En la ingesta (≥15 mg/L) anemia hipocrómica (destrucción de hematíes y déficit de Fe), manchas amarillas en piezas dentales, náuseas, vómito, dolor abdominal, diarrea y en algunos casos la muerte (ATSDR, 1999; Nordberg et al., 2001; Duruibe et al., 2007; Pérez-García y Azcona-Cruz, 2012; García et al., 2012).</p> <p>El DHHS, la IARC, la EPA y la NOM-127-SSA1-1994 consideran una concentración límite de 0.005 mg/L de Cd en el consumo de agua potable, así mismos, la IARC indica que una concentración ≥ 100 nmol de Cd/L de sangre resulta crítica para los organismos, la OMS recomienda tomar medidas de control si se presenta una concentración ≥ 50 nmol de Cd/L de sangre o 3 nmol/mmol de creatinina en orina con el fin de evitar daños renales (ATSDR, 1999; Nordberg et al., 2001; NIOSH/IPCS, 2011).</p>

Tabla 25: Cobre (Cu)

Cobre (Cu)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la Salud
<p>Símbolo: Cu Número atómico: 28 Peso atómico: 63.54 g/mol Punto de fusión: 1084 °C Punto de ebullición: 2567 °C (Lothar-Meyer, 1830; ATSDR, 2004; Hernández, 2006; NIOSH/IPCS, 2011).</p> <p>De acuerdo con su abundancia en la corteza terrestre se posiciona en el lugar número 26, con una concentración estimada de 47 mg/kg, en suelos de 20 a 39 mg/kg, en agua de mar de 0.2 ppb y en la atmósfera en concentraciones insignificantes, sin embargo, su concentración puede variar de acuerdo con la actividad industrial presente en la zona (John, 2011; Alekseenko y Alekseenko, 2014).</p> <p>Es importante destacar que a nivel mundial es el tercer metal más utilizado en la industria (detrás de Fe y Al) y esto es debido a su elevada maleabilidad, eficiencia en la conducción eléctrica y de calor, ser dúctil, presentar un punto de fusión y ebullición altos, tener gran resistencia a la oxidación y ser necesario en diversos procesos biológicos (enzimáticos y proteicos) (Arnal, 2010; John, 2011; Alekseenko y Alekseenko, 2014)</p> <p>Su especiación va a depender directamente de la conductividad, pH y la MO, así como de la mineralogía de arcillas, temperatura y alcalinidad (Nordberg et al., 2001; Arnal, 2010).</p>	<p>Debido a las propiedades químicas del Cu más del 75% de la producción mundial se utiliza para la fabricación de componentes electrónicos y aleaciones (Ni, Sn, Zn, Al, Au, Pb, Cd, Cr, Be, Si, P, entre otros). Así también, se utiliza para la fabricación de cañerías, baterías de cocina, equipos farmacéuticos, pigmentos y como precipitante químico (Nordberg et al., 2001).</p> <p>Dentro de los compuestos más utilizados en la industria destacan los sulfatos, óxidos y cromatos, empleados como algicidas y molusquicidas, fungicidas vegetales, insecticidas, pigmentos, mordentes y más (Arnal, 2010; ATSDR, 2004; Nordberg et al., 2001).</p> <p>El Cu es liberado al ambiente de forma natural por lixiviación mineralógica, tormentas de polvo, descomposición de la vegetación, incendios forestales y aerosoles marinos, sin embargo, la amplia utilización del Cu en la industria ha permitido la liberación de compuestos en concentraciones elevadas afectando los ecosistemas, principalmente por la actividad minera (≥ 200.000 mg/L), la agricultura, quema de combustibles fósiles, manejo inadecuado de RSU, descarga de aguas residuales y otras (Arnal, 2010; Nordberg et al., 2001).</p> <p>Se estima que la producción mundial de Cu en el año 2016 fue aproximadamente de 19,400 TM (USGS, 2017).</p>	<p>Debido a su importancia en distintas funciones biológicas no es común que se presenten daños o intoxicación en la exposición al Cu (Uriu-Adams y Keen, 2005 en Arnal, 2010; ATSDR, 2004), sin embargo, en la manipulación industrial de compuestos de Cu (clorato cúprico, ditionato cúprico, azida cúprica o acetilido cuproso) existe un riesgo explosivo. La concentración elevada de polvos en el ambiente llegan a causar chalcosis, uveítis, abscesos, pérdida de ojos, congestión y perforación nasal, úlceras, fiebre, náuseas, gastralgias y diarrea, además de influir negativamente en la actividad microbiana y la descomposición de la MO reduciendo el crecimiento de las plantas y más (Nordberg et al., 2001; Duruibe et al., 2007; García et al., 2012;)</p> <p>Los organismos se ven expuestos a concentraciones elevadas de Cu principalmente en la ingesta de alimento (ostras o mariscos de concha, hígado, setas, nueces, chocolate, entre otros), agua e inhalación de partículas suspendidas (sales de cobre) (John, 2011; Nordberg et al., 2001).</p> <p>Considerando su elevada utilización la EPA propone como límite máximo permisible una concentración de 1.3 mg/L en el consumo de agua potable, el Ministerio de Agricultura de los EE.UU. recomienda una dosis diaria de 900 mg/día para personas mayores de 80 años de edad, la OSHA establece un límite para vapores en el aire de 0.1 mg/m³ y de 1 mg/m³ para polvos de cobre (ATSDR, 2004; NIOSH/IPCS, 2011).</p>

Tabla 26: Cromo (Cr)

Cromo (Cr)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la salud
<p>Símbolo: Cr Número atómico: 24 Peso atómico: 51.996 g/mol Punto de fusión: 1860 °C Punto de ebullición: 2672 °C (Lothar-Meyer, 1830; John, 2011).</p> <p>De forma natura el Cr se encuentra ampliamente distribuido en el medio generalmente en su estado trivalente (rocas, animales, plantas y suelos).</p> <p>De acuerdo con su abundancia en la corteza terrestre se posiciona en el lugar número 21, con una concentración estimada de 83 mg/kg, en suelos una variación de 39 a 200 mg/kg, en agua de mar de 0.24 ppb y en la atmósfera en concentraciones apenas detectables, sin embargo, su concentración puede aumentar de acuerdo con la actividad industrial presente en la zona (John, 2011; Zúñiga-Ontiveros, 2012).</p> <p>En el medio su especiación va a depender directamente del parámetro redox, MO (los complejos solubles de Cr^{VI} se reducen a complejos insolubles de Cr^{III} a mayor MO) y pH (Cr^{III} pH básico, Cr^{III} anfótero y Cr^{VI} pH ácido) (John, 2011; NIOSH/IPCS, 2011).</p>	<p>En la industria generalmente se emplean los compuestos que contienen más del 40% de óxido de Cr (principalmente dicromato sódico, dicromato potásico y el trióxido de cromo), siendo su principal uso la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistencia al calor (acero inoxidable Fe-Ni), piezas de automóvil y equipos eléctricos, aleaciones con fines específicos que contienen Ni, Ti, Nb, Co, Cu y otros M's, además de ser utilizado para la fabricación de vidrios, esmaltes de color, pigmento inorgánico con Pb (verde), Mo (naranja) y más (Nordberg et al., 2001; Duruibe et al., 2007; Hernández, 2012).</p> <p>Se conoce el uso de peróxidos, ácido percrómico y perchromatos además de halogenuros (fluoruro, cloruro, yoduro y bromuro) de Cr como compuestos comunes en actividades industriales de galvanoplastia, curtido de cuero, producción de piezas textiles, en la utilización de combustibles fósiles (gas natural, petróleo y carbón), como protector de madera, papel y más (Nordberg et al., 2001; Hernández, 2012).</p> <p>Se estima que a nivel mundial la producción de Cr en el año 2016 fue aproximadamente de 30,400 TM. (USGS, 2017).</p>	<p>Considerando que el Cr en su estado trivalente (Cr^{III}) es un oligoelemento que sirve como regulador de diversas funciones biológicas, potenciador de la insulina y activador de diversos mecanismos metabólicos (permite la reacción con hidratos de carbono, lípidos y proteínas), resulta poco probable la intoxicación por el compuesto, sin embargo, en su estado hexavalente (Cr^{VI}) resulta dañino por su capacidad de atravesar la membrana celular y ser bioacumulable (Duruibe et al., 2007; Molina et al., 2010; NIOSH/IPCS, 2011; ATSDR, 2012).</p> <p>El DHHS, la IARC y la EPA clasifican al compuesto Cr^{VI} (principalmente cromatos de Pb, Zn y Ca y trióxidos de Cr) como carcinogénico, llegando a causa cáncer de pulmón (≥ 50 mg Cr^{VI}/m³), tumores estomacales, irritación de nariz, sangrado y lesiones del tabique nasal, erupciones cutáneas, úlceras, problemas respiratorios (tos, cefalea, disnea y dolor retroesternal con exposiciones de 20 a 30 mg/m³ de ácido crómico), debilitamiento del sistema inmune, daños hepáticos, renales, gastrointestinales, hematológicos, alteraciones en el material genético y la muerte (Emsley, 2001 y Wright, 2003 en Molina et al., 2010; NIOSH/IPCS, 2011; ATSDR, 2012; Pazos-Capeans, P., 2007 en Zúñiga-Ontiveros, 2012).</p> <p>Debido a su toxicidad la NOM-127-SSA1-1994 y la OMS recomienda una concentración límite de Cr de 0.05 mg/L en el consumo de agua potable, la EPA y la FDA determinan que los niveles de Cr en agua no debe exceder una concentración de 0.1 mg/L, la OSHA propone como límite legal una concentración de 0.005 mg/m³ de Cr^{VI} y de 0.5 mg/m³ de Cr^{III} en el aire del trabajo con jornadas de 8 hrs/día (NIOSH/IPCS, 2011; ATSDR, 2012).</p>

Tabla 27: Hierro (Fe)

Hierro (Fe)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la salud
<p>Símbolo: Fe Número atómico: 26 Peso atómico: 55.845 g/mol Punto de fusión: 1535 °C Punto de ebullición: 2750 °C (Lothar-Meyer, 1830; Hernández, 2006; NIOSH/IPCS, 2011).</p> <p>A nivel mundial el Fe es el segundo metal más utilizados en la industria (detrás del Al) y esto es debido a su elevada dureza, ductilidad, resistencia a la corrosión, puntos de ebullición y fusión altos, gran eficiencia en la conducción eléctrica (11.2 106 Ωm) y de calor (80.2 Wm⁻¹ K⁻¹), eficiencia como agente reductor u oxidante y ser magnético (Lothar-Meyer, 1830; Hernández, 2006; NIOSH/IPCS, 2011).</p> <p>De acuerdo con su abundancia en la corteza terrestre se posiciona en el lugar número 4, con una concentración estimada de 46,500 mg/kg, en suelos una variación de 22,300 a 38,000 mg/kg, en agua de mar 2.5 ppb y en la atmósfera en concentraciones traza, sin embargo, su concentración puede variar dependiendo el grado de industrialización de la zona (John, 2011; NIOSH/IPCS, 2011; Alekseenko y Alekseenko, 2014)</p> <p>En el medio su especiación va a depender directamente del parámetro redox, pH, MO (ligandos orgánicos), mineralogía de arcilla, carbonatos y otros minerales, que determinarán la solubilidad o precipitación de quelatos en suelos y agua (Murad y Ficher, 1988; Lindsay, 1979 en Juárez-Sanz et al., 2007).</p>	<p>El Fe es un elemento primario ampliamente distribuido en el medio (agua, suelo, organismos y más), siendo los compuestos de Fe más utilizados los óxidos y carbonatos, que constituyen los minerales más importantes de donde se obtiene el metal (Nordberg et al., 2001).</p> <p>Debido a sus propiedades se emplea básicamente en todas las industrias (automotriz, aeronáutica, de construcción, farmacéutica, quirúrgica, militar, alimenticia (aditivos y suplementos), agrícola, tecnológica, textil, entre otras), siendo su principal uso la fabricación de piezas de Fe y acero fundido, aleaciones con otros metales (combinación con C, Mn, Si, Cr y otros) y para el tratamiento de aguas residuales (cloruro de hierro – FeCl₃) (Nordberg et al., 2001; Tello de Meneses, 2014).</p> <p>Es importante mencionar que debido a su abundancia y utilidad a nivel mundial la producción de Fe para el año 2017 fue aproximadamente de 1,150 millones de TM y la de acero de 1,600 millones de TM (USGS, 2017).</p>	<p>Los organismos se ven expuesto a concentraciones elevadas de Fe principalmente en la ingesta de alimento (presente en la mayoría de los alimentos) he inhalación de partículas suspendidas, sin embargo, al ser un oligoelemento esencial para diversas funciones biológicas la intoxicación por Fe es poco frecuente (NIOSH/IPCS, 2011).</p> <p>En la inhalación o contacto dérmico con óxidos de Fe se puede producir irritación pulmonar y gastrointestinal, conjuntivitis, coriorretinitis y retinitis, neumoconiosis (siderosis) con tos y falta de aire (Nordberg et al., 2001).</p> <p>La IARC, la OSHA, la ATSDR y la Association Advancing Occupational and Environmental Health (ACGIH) han catalogado a los óxidos de Fe como co-carcinogénico cuando se combinan con otras sustancias llegando a causar cáncer de pulmón y de próstata, además de enfermedades neurodegenerativas como el Parkinson, Alzheimer o el síndrome de Hallervorden-Spatz (Duruibe et al., 2007; Valle-López et al., 2011).</p> <p>Considerando la elevada toxicidad del óxido de Fe la OSHA hace una recomendación límite de exposición de 10 mg/m³ en el aire de trabajo durante una jornada de 8 hrs, la NIOSH limita su exposición en aire a 5 mg/m³ (jornada de 10 hrs) y la ACGIH limita su concentración en aire a 5 mg/m³ (jornada de 8 hrs) (Nordberg et al., 2001; NIOSH/IPCS, 2011)</p>

Tabla 28: Mercurio (Hg)

Mercurio (Hg)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la salud
<p> Símbolo: Hg Número atómico: 80 Peso atómico: 200.59 g/mol-1 Punto de fusión: -38.83 °C Punto de ebullición: 356.7 °C </p> <p> El Hg es un metal blanco, plateado, pesado y líquido a temperatura ambiente, sin embargo, debido a las presiones y características del medio se presenta generalmente en estado sólido en forma de sales. </p> <p> Dentro de sus principales características destaca por la facilidad de formar enlaces monovalentes Hg(I) o divalentes Hg(II) de sales como Hg(NO₃)₂ o Hg(ClO₄)₂, que se caracterizan por ser altamente solubles a soluciones oxidantes (ácido nítrico, ácido sulfúrico concentrado, agua regia y el cloro gaseoso) y altamente discernibles en agua (John, 2011; NIOSH/IPCS, 2011). </p> <p> El Hg se combina y se absorbe por los organismos (bacterias) formando compuestos orgánicos de mercurio u organomercuriales como el dimetilmercurio, fenilmercurio, etilmercurio y metilmercurio. </p>	<p> El mercurio se utiliza principalmente para crear amalgamas con casi todos los M's excepto Fe, Ni, Cd, Al, Co y Pt, en la fabricación de termómetros, barómetros, bombas de difusión, tubos de rayos X, en la investigación en laboratorios químicos, físicos y biológicos, engranajes eléctricos (baterías y tubos de luz fluorescente), en el curtido y tratamiento para flexibilizar las pieles, producción de cloro y de sosa caustica, productos para odontología, pinturas, pesticidas, catalizadores químicos y más. </p> <p> En la industria algunos compuestos orgánicos de Hg son utilizados como antisépticos, germicidas, diuréticos y anticonceptivos, como pesticidas, algicidas, fungicidas, herbicidas y limocidas, como conservadores de pinturas, ceras y pastas, en pinturas al látex y en el tratamiento antimoho de tejidos, papel, corcho y madera para su uso en climas húmedos y más. (Nordberg et al., 2001; Tello de Meneses, 2014). </p> <p> Debido a su elevada utilización a nivel mundial la producción de mercurio en el año 2017 ronda las 4,500 TM (USGS, 2017). </p>	<p> Las actividades como la minería, la quema de combustibles fósiles e incineración de RSU, el refinamiento y la producción de compuestos de Hg han propiciado la liberación de grandes cantidades de Hg en los ecosistemas llegando a ser catalogado por la OMS (2017) como uno de los diez elementos o grupos químicos que plantean una problemática en la salud por sus propiedades carcinogénicas y teratogénicas (ATSDR, 1999b). </p> <p> Los organismos se ven expuestos a elevadas concentraciones de Hg principalmente en la ingesta de alimento contaminado (peces de gran tamaño, algunas frutas y verduras), inhalación de partículas suspendidas (polvos, humos y aerosoles) y por contacto dérmico, llegando a causar trastornos gastrointestinales, calambres y espasmos, edema pulmonar, trastornos renales, digestivos, insomnio, párkinson y en algunos casos la muerte (ATSDR, 1999b; Nordberg et al., 2001; Duruibe et al., 2007). </p> <p> Considerando su elevada toxicidad la EPA limita su concentración a 2 ppm en el consumo de agua potable, la FDA establece un límite de metilmercurio en 1 ppm por parte de mariscos, la OSHA establece un límite de 0.1 mg/m³ y 0.05 mg/m³ de vapor de mercurio metálico para turnos de 8 hrs/semana laboral (ATSDR, 1999b). </p>

Tabla 29: Plomo (Pb)

Plomo (Pb)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la salud
<p>Símbolo: Pb Número atómico: 82 Peso atómico: 207.19 g/mol Punto de fusión: 327.5 °C Punto de ebullición de 1750 °C</p> <p>El Pb es un elemento que puede ser encontrado de forma natural principalmente como mineral de galena (sulfato de plomo), cerusita (carbonato), anglesita (sulfato), corcoita (cromato), wulfenita (molibdato), piromorfita (fosfato), mutlockita (cloruro) y vanadinita (vanadato) (Nordberg et al., 2001).</p> <p>Destaca por ser un elemento altamente flexible, resistente a la corrosión de ácidos como el sulfúrico y clorhídrico pero soluble con ácido nítrico, elevada afinidad de asociarse con el azufre y más.</p> <p>Por sus propiedades como elemento anfótero es capaz de formar sales con ácido, óxidos y otros compuestos organometálicos (John, 2011; NIOSH/IPCS, 2011; Alekseenko y Alekseenko, 2014; Tello de Meneses, 2014).</p>	<p>Industrialmente, su obtención es por medio de la trituración en seco, la molienda en húmedo (para obtener una pasta), la clasificación gravimétrica y la flotación (Molina et al., 2010).</p> <p>Se estima que aproximadamente el 40% de Pb es utilizado de forma industrial en su forma metálica para la construcción, eléctrica, mecánica y otras, el 25% para la formación de aleaciones (principalmente óxidos y el tetraetil para baterías eléctricas, caucho, pinturas, barnices, esmaltes y vidrio) con elementos como el Sn, Cu, As, Sb, Bi, Cd y Na con fines específicos y el 35% como compuesto químico para diversos productos y procesos industriales, siendo los principales compuestos empleados el monóxido (PbO), dióxido (PbO₂), tetróxido (Pb₂O₄), sesquióxido (Pb₂O₃), carbonatos, sulfatos, cromatos, arseniatos, cloruros, silicatos y azida de plomo (Nordberg et al., 2001; Molina et al., 2010).</p> <p>Para el año 2017 se estima que a nivel mundial la producción de Pb fue aproximadamente de 4,820 TM (USGS, 2017).</p>	<p>Los organismos se ven expuestos a concentraciones elevadas de Pb principalmente en la ingesta de alimento contaminado, inhalación de partículas suspendidas y contacto dérmico (aproximadamente 65% en comida, 20% ingesta de agua y 15% en la inhalación), llegando a causar afectaciones moderadas como dolor de cabeza, vértigo o insomnio, así también, intoxicaciones agudas que derivan en trastornos neurológicos, hematológicos, endocrinos, renales, de reproducción y desarrollo, cáncer y la muerte (Molina et al., 2010; Nava-Ruiz y Méndez-Armenta, 2011; Duruibe et al., 2007).</p> <p>Debido a la alta toxicidad del Pb el DHHS, la EPA y IARC consideran al Pb inorgánico como carcinogénico en seres humanos. El CDC indica que una concentración de Pb de 10 µg/día/L es perjudicial para niños, por lo que la EPA limita su concentración a 15 mg/L en el consumo de agua potable, la OMS a 0.01 mg/L y la norma NOM-127-SSA1-1994 a 0.01 mg/L (ATSDR, 1999b).</p>

Tabla 30: Estaño (Sn)

Estaño (Sn)		
Características	Uso y distribución	Impacto en la salud
<p>Símbolo: Sn Número atómico: 50 Peso atómico: 118.71 g/mol (Tello de Meneses, 2014) Punto de ebullición: 2603 °C Punto de fusión: 231.9 °C.</p> <p>El Sn es un metal de color plateado, duro, dúctil, maleable, insoluble en agua y resistente a la corrosión de sustancias neutras divido que al contacto con el oxígeno formar una película delgada que lo protege.</p> <p>Es un metal escaso en la corteza terrestre y principalmente se le puede encontrar como mineral casiterita en forma de dióxido (SnO₂), además de compuesto estañoso (Sn²⁺), estánico (Sn⁴⁺) o sales complejas tipo estanita (M₂SnX₆) (Nordberg et al., 2001; Molina et al., 2010).</p> <p>En la naturaleza se presentan dos principales estados alotrópicos del estaño: estaño gris α (polvo no metálico, semiconductor eléctrico) y el estaño blanco β (metálico, conductor eléctrico) (John, 2011; NIOSH/IPCS, 2011; Alekseenko y Alekseenko, 2014; Tello de Meneses, 2014).</p>	<p>En la industria el Sn se emplea para la creación de aleaciones con elementos como el Cu, Fe, Cr y Pb, así también, para revestir latas de alimentos, bebidas y aerosoles, en la industria de galvanoplastia, cerámica y vidrio (SnO₂) es empleado básicamente para opacar de brillo, disminuir su fragilidad y como colorante rosa, amarillo y marrón.</p> <p>En la industria textil los óxidos hidratados (SnO₃H₂^{IV}) se emplean para la fabricación de telas incombustibles y para añadir peso a la seda, el cloruro estánico (SnCl₄^{IV}) como estabilizador de perfumes y colorante de jabón, el fluoruro estañoso (SnF₂) como aditivo en la pasta dental (Nordberg et al., 2001; Molina et al., 2010).</p> <p>Cuando el Sn se combina con carbono (dibutilestaño, tributilestaño y trifenilestaño) se utiliza para la fabricación de plásticos, envases para alimentos, cañerías plásticas, plaguicidas, pinturas y sustancias para repeler animales.</p> <p>A nivel mundial para el año 2017 se estima que la producción de Sn fue de aproximadamente 280,000 TM (USGS, 2017).</p>	<p>Los organismos se ven expuestos al Sn principalmente por medio de la ingesta de alimento contaminado, inhalación de partículas suspendidas, contacto dérmico y transporte por vía materna, siendo los compuestos orgánicos los principales agentes de intoxicación.</p> <p>Dentro de los efectos causados por intoxicación aguda se presenta la irritación de ojos y piel, dolores de cabeza y estómago, vómito y mareo, sudoración severa, falta de aliento y problemas renales. Dentro de la intoxicación crónica uno de los principales efectos que se perciben es la depresión, así también, alteraciones del sistema inmunológico, daños cromosómicos, anemia, daños del sistema nervioso central, daños conductuales (ira, trastornos del sueño, olvidos y dolores de cabeza), entre otros malestares (NIOSH/IPCS, 2011).</p> <p>El DHHS, la IARC y la EPA no han clasificado al Sn metálico ni a los compuestos inorgánicos de Sn en cuanto a carcinogenicidad, sin embargo, la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) ha establecido un límite de 0.1 miligramo por metro cúbico de aire (0.1 mg/m³) para compuestos orgánicos de Sn en el aire del trabajo y de 2.0 mg/m³ para compuestos inorgánicos de Sn, excepto los óxidos (ATSDR, 2005).</p>

Pasos para lectura de THGAA

Para determinación de la concentración total de metales en sedimentos por THGA AAS (Transversely heated graphite atomizer atomic absorption spectrometry)) se utilizó el Material de referencia Mat. 1646 -NIST (National institute of standards and technology) y el siguiente procedimiento para la lectura en el equipo Perkin Elmer Analyst 800.

Pasos para lectura de thgaa fueron:

1. Abrir gases.
2. Subir el interruptor de corriente (que se encuentra pegado en la pared).
3. Colocar lámpara correcta para el trabajo (según el metal que se va a leer).
4. Prender equipo Perkin Elmer (botón verde).
5. Activar extractor de gases (opcional).
6. Prender la computadora e iniciar programa (WinLab32 Analyst 800).
7. Verificar que aparezcan las tres palomitas de que se encuentra todo correctamente conectado.
8. Asegurarse de que el espejo del tubo de luz se encuentra arriba (es decir sin estorbar el haz de luz).

Nota:

En caso de que se hayan hecho más de 100 lecturas en días anteriores verificar el tubo de grafito y si es necesario cambiarlo. Efectuar limpieza de ventanas.

9. Escoger método verificando las condiciones recomendadas para cada elemento.
10. Hacer matriz de datos con el orden correcto en la bandeja automática. Salvar los datos y lecturas en “simple info”.
11. Prender lámpara.
 - Hacer clic en “set up” o “set midscale”.
 - Una vez que la lámpara está caliente y la energía esta correcta según el elemento, se verifica en la gráfica continua que se mantenga constante y en una línea recta con el menor ruido posible, de preferencia lo más cercano a cero, menor a 0.1.
12. Alinear el horno:

- Hacer clic en “Fournace control”.
 - Hacer clic en “Aling fournece”.
 - Hacer clic en “Next”.
 - Hacer clic en “Adjust ” (esperar a que el equipo automáticamente encuentre la alineación correcta).
 - Hacer clic en “Finish” (verificar que la línea se encuentre lo más posible a cero, sin ruido y constante a la gráfica continua).
13. Para alinear el inyector de muestra “Tip”:
- Alinear manualmente con las perillas el inyector de muestras automático (“Tip autosampler”).
 - Hacer clic en “Aling Tip wizard”.
 - Hacer clic en “Finish”.
 - Verificar que el inyector de muestras este correctamente en la posición.
 - Hacer clic en “Next” (se corrobora visualmente en el espejo donde quedó el inyector).
 - Hacer clic en “Finish” (¡Recordar que el espejo queda en la parte de arriba!).
 - Repetir las acciones hasta que quede correctamente, repetir de la misma manera el procedimiento para verificar la profundidad de la toma de muestra en la cubetita (“Set the depht autosampler”).
14. Para condicionar el tubo de grafito se coloca en “Condition tube”. (Se inicia el recirculado de manera automáticamente, ya que puede ser peligroso).
15. Preparar las muestras y colocar las cubetas de la siguiente manera:
- a) BCO (agua acidificada: HNO₃ 0.2
 - b) Modificador de matriz.
 - c) Estándar o Check.
 - d) Primera muestra.
 - e) Segunda muestra, etcétera
16. Analizando las muestras:
- En la ventana de Auto.
 - Hacer clic en “Analyze” (pestaña inferior)
 - Hacer clic en “Calibrate”
 - Abrir ventana de resultados (verificar que el estándar del metal en estudio de la señal correcta según especificaciones para cada metal).
 - Posteriormente hacer clic en “Analyze sample” (verificar que las lecturas estén dentro de la curva de calibración).

Tecnología de remediación de suelos contaminados

TECNOLOGÍA	COV	COV-H	COS	COS-H	BTEX	HAP	H/P	BPC	METALES	TOTAL
<i>Biológicas</i>										
Biorremediación	25	19	39	8	38	42	28	1	2 ^a	202
Fitorremediación	0	3	0	0	2	0	1	0	1	7
<i>Fisicoquímicas</i>										
TQ	2	3	0	4	1	1	3	3	8 ^b	25
RE	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Aireación	0	4	0	1	1	0	0	0	0	6
Inundación	5	8	5	4	6	3	1	0	4	36
EV	31	171	25	24	91	12	2	2	0	358
Lavado	0	0	1	1	0	1	1	1	3	8
S/E	11	15	13	35	7	11	12	30	155	289
ES	1	2	1	3	0	1	0	3	0	11
<i>Térmicas</i>										
DT	12	29	13	20	20	14	9	12	0	129
Incineración	23	48	37	63	29	22	32	38	2 ^c	294
Vitrificación	0	2	0	2	1	0	0	1	0	6
<i>Total de proyectos</i>	<i>110</i>	<i>305</i>	<i>134</i>	<i>165</i>	<i>196</i>	<i>107</i>	<i>89</i>	<i>91</i>	<i>175</i>	

TQ: tratamiento térmico; RE: remediación electrocinética; EV: extracción de vapores; S/E: solidificación /estabilización; ES: extracción por solventes; DT: desorción térmica.

COV: compuestos orgánicos volátiles; COV-H: COV halogenados; COS: compuestos orgánicos semi-volátiles; COS-H: COS halogenados; BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos; HAP: hidrocarburos aromáticos policíclicos; H/P: herbicidas y pesticidas orgánicos; BPC: bifenilos policlorados.

^aBiorremediación de cromo hexavalente: reducción del Cr (VI) a Cr (III)

^bReducción química de Cr (VI) a Cr (III)

^cIncineración de compuestos orgánicos (alta temperatura), con recuperación de metales de Pb o Hg.

Fuente: EPA 2001.

Tabla 31: Ejemplo de técnicas y tecnología para la remediación de suelos contaminados (Volke y Velasco, 2002).