



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN
FACULTAD DE INGENIERÍA.**

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA
DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE
PROTECCIÓN DE POZOS EN UN ACUÍFERO
KÁRSTICO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

M.I. ANNETTE YABEL ROJAS FABRO

EN OPCIÓN AL GRADO DE:

DOCTORA EN INGENIERÍA

OPCIÓN AMBIENTAL

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2015

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

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de los estudios del Doctorado en Ingeniería opción Ambiental.

Al Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Yucatán, por el financiamiento del proyecto **“Protección de zonas periféricas y áreas de influencia de los pozos de extracción para el abastecimiento actual de la zona metropolitana de Mérida”**, Clave: YUC-2009-CO7-131955.

A la junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY) por las facilidades otorgadas para la realización de este estudio en las instalaciones de la zona de captación de la Planta Potabilizadora Mérida I.

Los resultados parciales de esta tesis fueron difundidos por medio de:

- a) La presentación de la ponencia “Propuesta metodológica para la delimitación de perímetros de protección de pozos en un acuífero kárstico”, en el Curso “Agua Subterránea y Cambio Climático” realizado del 4 al 8 de Noviembre de 2013 en San Salvador, El Salvador, evento organizado por la Universidad de Calgary con el apoyo de la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI).
- b) La ponencia “Propuesta metodológica para la delimitación de perímetros de protección de pozos en un acuífero kárstico” en el “1er Congreso Nacional de la Asociación Mexicana Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental – AMICA” realizado del 12 al 14 noviembre de 2013 en Campeche, México.
- c) La presentación del cartel “Propuesta metodológica para la protección y gestión del acuífero kárstico de la ciudad de Mérida, Yucatán” en el “Concurso de carteles de la Facultad de Ingeniería UADY” evento organizado dentro de la Semana de Ingeniería de la FIUADY desarrollado del 29 de septiembre al 1 de octubre del 2014.

- d) Como parte del libro “10 Soluciones para el Manejo sustentable del agua, Península de Yucatán”, publicado en Julio del 2014. Resultado de un artículo enviado para participar en el “Segundo Concurso de Perspectivas Universitarias sobre el Agua Sustentable, organizado por Fundación ICA”, obteniendo el reconocimiento a Primera Mención honorífica con el trabajo titulado: “Propuesta metodológica para la gestión y protección del agua subterránea del acuífero kárstico de la ciudad de Mérida, Yucatán”.

- e) La presentación de la ponencia “Propuesta metodológica para la gestión y protección del agua subterránea del acuífero kárstico de la ciudad de Mérida, Yucatán” en el “XXXIV Congreso Interamericano AIDIS” realizado del 2 al 6 de noviembre del 2014 en Monterrey, México, y

- f) La ponencia “Comportamiento estacional de la variabilidad espacial del nivel de agua subterránea en un acuífero kárstico” en el “Congreso Internacional y XX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales” realizado del 3 al 5 de junio del 2015 en Puebla, México.

- g) El artículo de investigación publicado en octubre del 2015, en la revista Applied Geography “Spatial distribution of nitrate health risk associated with groundwater use as drinking water in Merida, Mexico”, en el volumen número 65, en las paginas 49-57.

RESUMEN

En la actualidad, las principales problemáticas ligadas al agua son la escasez, los usos y consumos, la contaminación y el abastecimiento en diferentes áreas geográficas. Las fuentes de agua enfrentan una progresiva disminución tanto en cantidad como en calidad.

El acuífero de la Península de Yucatán, cuya naturaleza kárstica lo hace vulnerable a la contaminación por los fenómenos de infiltración de contaminantes, es la única fuente de agua potable para el abastecimiento en la Ciudad de Mérida México.

El agua, para ser consumida por el hombre, requiere de tratamientos para eliminar partículas y organismos que pudieran afectar su salud, para posteriormente distribuirla con fines de abastecimiento público, para lo cual es necesario establecer planes de manejo del recurso hídrico que permitan la gestión del agua por los diferentes órdenes de gobierno.

Este trabajo elaboró una metodología para la delimitación de Perímetros de Protección de Pozos (PPP) para el abastecimiento público en un sistema kárstico. Para esto, se seleccionó el principal campo de pozos para el abastecimiento de la ciudad de Mérida, México, con la finalidad de desarrollar dicha metodología, ya que abastece al 65% de la población, aproximadamente. Este trabajo es base para la elaboración de un plan de manejo que permita mejorar la gestión del recurso hídrico en un área kárstica.

Esta investigación fue desarrollada en 5 fases: 1. La generación de información mediante los trabajos de campo para determinar los parámetros hidrogeológicos, hidrogeoquímicos y las variaciones piezométricas etapa en la que se incluyó la evaluación del riesgo a la salud por la presencia de nitratos en agua de consumo. 2. El análisis e implementación de los diferentes métodos para la delineación de Perímetros de Protección de Pozos (PPP) usando la información recopilada y generada. 3. La selección del PPP de un sistema de pozos en un acuífero kárstico, se realizó a través del análisis de los métodos que fueron utilizados para calcular los PPP para la delimitación, tomando en cuenta los datos necesarios, ventajas y

desventajas de la aplicación de cada método y los resultados. 4. La determinación del riesgo a la contaminación del agua que subyace el área de estudio, se evaluó la vulnerabilidad a través del método COP y las amenazas fueron evaluadas con respecto a la cantidad de nitrógeno aportado por las diferentes actividades humanas en la zona de estudio y, 5. La elaboración de un plan de manejo para la protección del recurso hídrico se efectuó por medio de la revisión de las medidas técnicas y legales existentes para el sitio de estudio, las cuales regularían el PPP calculado.

Los resultados señalan que la distribución espacial del índice del riesgo a la salud por nitratos confirma que las plantas de abastecimiento de agua para la ciudad de Mérida no representan mayor riesgo para salud pública, por la presencia de nitratos.

Con respecto a los PPP el método volumétrico es un método factible debido a que los datos necesarios para realizar el cálculo son fáciles de obtener y de simple aplicación, sin embargo la mejor metodología a utilizar es el método de flujo uniforme aplicado a través del software WhAEM2000, debido a la precisión de los datos con el que se alimenta el software.

El riesgo a la contaminación es moderado para la ZMM y municipios anexos. El municipio de Mérida es el único que se clasifica como riesgo alto.

La delimitación del PPP para el área de estudio, radio de 2821 metros en las condiciones menos favorables (Época de lluvias y $K_{Máx}$), se localiza dentro de la zona sujeta a conservación denominada Reserva Cuxtal.

ABSTRACT

At present the main problems are linked to water scarcity, the uses and consumptions, pollution and the supply in different geographical areas. Water sources face a progressive decrease in quantity and quality.

The karstic aquifer of the Yucatan Peninsula makes it vulnerable to contamination by the phenomena of infiltration of pollutants, the groundwater is the only source of drinking water to supply the city of Merida in Mexico.

The water to be consumed by humans, requires treatment to remove particles and organisms that could affect the human health and then needs to be distribute for public supply purposes. This is the reason for which it is necessary to establish a plan that allow the legal water management by different levels of government.

This work develops a methodology for the delineation of Wellhead Protection Areas (WHPAs) for water public supply in karst aquifer. The main water supply system of Merida, Mexico supplies the 65 % of total population and was selected in order to develop the best delineation methodology. This work is the basis to develop a management plan that will improve the management of water resources in karst area.

This research was developed in 5 phases: 1. Generation of information by field work to determine the hydrogeological parameters, hydrogeochemical and piezometric variations stage. In this stage the nitrate health risks assessment for water consumption was included. 2. The analysis and implementation of the different methods for the delineation of WHPAs using the collected and generated information. 3. The selection of the WHPAs in a karst aquifer was conducted through the analysis of the methods that were used to calculate WHPAs using the necessary data, the advantages and disadvantages of the application of each method and results. 4. The assessment of the groundwater pollution risk in the study area was obtained by the evaluation of the vulnerability using the COP method and the threats caused by nitrogen load pollution according human activities, 5. The management plan for water resources protection was conducted through the review of existing technical and legal norms which should regulate the WHPAs in study site.

The spatial distribution of the potential risk to human health estimated by using the Hazard Index (HI) confirms that Merida water supply system does not represent major risk to public health due to the nitrates presence.

Volumetric method used to WHPAs calculation is a feasible method because the necessary data for the calculation are easy to obtain and simple application, however the best method to use is the uniform flow method applied through WhAEM2000 software because the data precision supplied to the software.

The pollution risk is moderate for the Merida Metropolitan Zone (ZMM) and annexes municipalities. Merida municipality is the only one classified as high risk.

The delimitation of the WHPAs calculated with a radius of 2821 meters using unfavorable conditions (Rainy season and K_{Max}) is located inside the Cuxtal ecological reserve.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos.....	3

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Recurso hídrico.....	4
2.2 Hidrogeología de acuíferos kársticos.....	5
2.3 Sistemas de abastecimiento de agua.....	8
2.4 Química del agua.....	9
2.5 Vulnerabilidad y riesgo.....	11
2.6 Protección del recurso hídrico en un ambiente kárstico.....	16
2.7 Perímetros de protección de pozos (PPP).....	17
2.7.1. Delimitación de zonas de protección.....	20
2.7.2. Métodos para la delimitación de PPP.....	21
2.7.3. Consideraciones en la selección de la metodología.....	22
2.7.4. Aplicación de métodos para la delimitación de PPP.....	23
2.7.5. Aplicación de métodos para delimitación de PPP en manantiales kársticos.....	27
2.8 Gestión y manejo integral de un acuífero kárstico.....	30

CAPÍTULO III

SITIO DE ESTUDIO

3.1 Descripción del sitio de estudio.....	33
3.2 Características del sitio de estudio.....	33
3.3 Características de los pozos del área de estudio.....	34
3.4 Características de los pozos de observación.....	36

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Generación de información mediante los trabajos de campo para determinar los parámetros hidrogeológicos, hidrogeoquímicos y las variaciones piezométricas.....	39
4.1.1 Generación de la información hidrogeológica.....	39
4.1.2 Evaluación del riesgo a la salud por nitratos en aguas de consumo.....	42
4.2 Análisis e implementación de la información recopilada y generada para calcular los Perímetros de Protección de Pozos (PPP).....	44
4.2.1 Método de radio arbitrario (Zona I).....	44
4.2.2 Método de radio fijo calculado (Zona I y II).....	46
4.2.3 Uso del software WhAEM2000.....	48

4.3 Selección del PPP de un sistema de pozos en un acuífero kárstico.....	55
4.4 Determinación del riesgo a la contaminación del agua que subyace el área de estudio.....	56
4.4.1 Vulnerabilidad por el método COP para la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM) y municipios anexos.....	56
4.4.2 Amenazas con respecto a la carga de Nitrógeno para la ZMM y municipios anexos	57
4.4.3 Riesgo a la contaminación para la ZMM y municipios anexos.....	58
4.5 Elaboración de un plan de manejo para la protección del recurso hídrico en un acuífero kárstico.....	58

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Parámetros hidrogeológicos.....	60
5.2 Direcciones de flujo del agua subterránea.....	60
5.3 Evaluación del riesgo a la salud por nitratos en aguas de consumo.....	63
5.3.1 Concentraciones de nitratos en las fuentes de abastecimiento del municipio de Mérida.....	63
5.3.2 Caracterización del riesgo a la salud por nitratos para el agua de consumo en el municipio de Mérida.....	64

5.4 Perímetros de Protección.....	67
5.4.1 Radio arbitrario – Zona I.....	67
5.4.2 Radio fijo calculado – Zona I y II.....	67
5.4.3 Perímetros de protección de pozos obtenidos con el Software WhAEM2000.....	68
5.5 Selección de la metodología para la delimitación de PPP en un acuífero kárstico.....	81
5.6 Riesgo a la contaminación del agua subterránea.....	83
5.6.1 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de la ZMM y municipios anexos (Método COP).....	83
5.6.2 Mapa de amenazas de la ZMM y municipios anexos.....	85
5.6.3 Mapa de riesgo a la contaminación de la ZMM y municipios anexos.....	87
5.7 Plan de manejo para la protección del recurso hídrico en un acuífero kárstico.....	89
 CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES.....	91
 CAPÍTULO VII	
REFERENCIAS.....	93
APENDICES.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS	PÁGINA
Figura 2.1. Mapas de riesgo SINTACS (a) y EPIK (b).....	14
Figura 2.2. Índice de vulnerabilidad COP para el estado de Yucatán.....	16
Figura 3.1. Localización del sitio de estudio.....	34
Figura 4.1. Ubicación de los pozos de observación en el área de estudio.....	41
Figura 4.2. Ingreso de los datos necesarios para los cálculos en el software WhAEM2000 (corto plazo).....	51
Figura 4.3. Diagrama del flujo para los cálculos en el software WhAEM2000.....	52
Figura 4.4. Datos ingresados para calcular el gradiente, dirección de flujo y gradiente.....	53
Figura 4.5. Vistas del Software WhAEM para las propiedades del acuífero.....	54
Figura 5.1. Mapa topográfico del área de estudio.....	61
Figura 5.2. Mapa piezométrico (cotas en m.s.n.m) y dirección del flujo para la época de lluvias.....	62
Figura 5.3. Mapa piezométrico (cotas en m.s.n.m) y dirección del flujo para la época de estiaje.....	62
Figura 5.4. Concentración de nitratos (en mg/l) en el área de estudio (2012-2013). 63	
Figura 5.5 Concentración de nitratos (en mg/l) en el área de estudio (2012-2013)...65	
Figura 5.6 Concentración de nitratos (en mg/l) en el área de estudio (2012-2013)...66	
Figura 5.7 Delimitación del área de protección calculada con el Criterio de Distancia (Radio Arbitrario 30 metros-Zona I).....	69
Figura 5.8. Radio fijo calculado por el método volumétrico (10 días, Zona I).....	70
Figura 5.9. Radio fijo calculado por el método de recarga.....	71

Figura 5.10. Radio fijo calculado por el método volumétrico (5 años, Zona II).....	71
Figura 5.11. PPP Lluvias $K_{Máx}$ y T=10 días (Zona I).....	74
Figura 5.12. PPP Lluvias $K_{Máx}$ y T=5 años (Zona II).....	74
Figura 5.13. PPP Lluvias $K_{Mín}$ y T=10 días (Zona I).....	75
Figura 5.14. PPP Lluvias $K_{Mín}$ y T=5 años (Zona II).....	75
Figura 5.15. PPP Lluvias $K_{Promedio}$ y T=10 días (Zona I).....	76
Figura 5.16. PPP Lluvias $K_{Promedio}$ y T=5 años (Zona II).....	76
Figura 5.17. PPP Estiaje $K_{Máx}$ y T=10 días (Zona I).....	77
Figura 5.18. PPP Estiaje $K_{Máx}$ y T=5 años (Zona II).....	78
Figura 5.19. PPP Estiaje $K_{Mín}$ y T=10 días (Zona I).....	78
Figura 5.20. PPP Estiaje $K_{Mín}$ y T=5 años (Zona II).....	79
Figura 5.21. PPP Estiaje $K_{Promedio}$ y T=10 días (Zona I).....	79
Figura 5.22. PPP Estiaje $K_{Promedio}$ y T=5 años (Zona II).....	80
Figura 5.23. Mapa de vulnerabilidad método COP para la ZMM.....	84
Figura 5.24. Mapa de peligrosidad (Kg Nitrógeno/año) para la ZMM.....	86
Figura 5.25. Mapa de riesgo para la ZMM.....	88
Figura 5.26. PPP para $K_{Máx}$ y época de lluvias y Reserva ecológica de Cuxtal.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ejemplos de lugares donde se han utilizado diferentes métodos y criterios para la delimitación de PPP.....	21
Tabla 3.1. Coordenadas UTM de los pozos de extracción de la planta Mérida I.....	35
Tabla 3.2. Características de pozos de observación.....	36
Tabla 3.3. Perfil litológico de los pozos de extracción de la planta Mérida I.....	38
Tabla 4.1. Características a considerar para la delimitación de la zona I de PPP en diferentes países.....	45
Tabla 4.2. Datos para el cálculo de radio fijo calculado con $FS= 1.5$ para los pozos de observación ubicados en la Planta Mérida I.....	48
Tabla 5.1. Valores máximos, mínimos y promedios de los parámetros hidráulicos obtenidos en campo para pozos extracción y observación Mérida I.....	60
Tabla 5.2. Radios obtenidos (m) para tiempos 1, 5, 10 días (Zona I) y 5 años (Zona II).....	68
Tabla 5.3. Resultados del cálculo de la dirección de flujo y gradientes para la época de lluvias.....	72
Tabla 5.4. . Resultados del cálculo de la dirección de flujo y gradientes para la época de estiaje.....	73
Tabla 5.5. Radios obtenidos (m) con el método de flujo uniforme 10 días y 5 años.....	81
Tabla 5.6. Ventajas y desventajas de las metodologías utilizadas para delimitar PPP.....	82

Tabla 5.7. Principales aportaciones de nitrógeno según diferentes actividades en el área de estudio..... 85

Tabla 5.8. Matriz para la determinación del riesgo a la contaminación del agua subterránea..... 87

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se enfrentan tiempos difíciles en materia ambiental y gran parte de esta problemática, se encuentra interrelacionada al agua.

Es importante señalar que únicamente el 1% del agua existente en el planeta Tierra es dulce y se encuentra distribuida principalmente en ríos, lagos y acuíferos. El agua, para ser consumida por el hombre, requiere de tratamientos para eliminar partículas y organismos que pudieran afectar su salud, para posteriormente distribuirla con fines de abastecimiento público.

Dentro de las principales problemáticas ligadas al agua se pueden distinguir la escasez, los usos y consumos, la contaminación y el abastecimiento en diferentes áreas geográficas, por lo cual se hace necesario colocar como una prioridad a nivel mundial, el establecimiento de prácticas que permitan un manejo adecuado del vital líquido.

Es importante, no ignorar el hecho de que las principales fuentes de agua dulce que son utilizadas en la actualidad para abastecer a las ciudades, enfrentan una progresiva disminución tanto en cantidad como en calidad, para lo cual es necesario establecer planes de manejo del recurso hídrico que permitan la adecuada gestión del agua a diferentes órdenes de gobierno. La delimitación de los Perímetros de Protección de Pozos son metodologías que permiten la protección del recurso hídrico y deben de establecerse con la finalidad de coadyuvar en la gestión del recurso hídrico a través de su implementación, alcanzando así la protección de acuíferos.

En la ciudad de Mérida ubicada en la Península de Yucatán, de naturaleza kárstica, el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento. Se cuenta para el abastecimiento público, con sistemas en donde el agua se extrae de diferentes campos de pozos situados en la periferia y de algunos pozos auxiliares dentro de los límites de la Ciudad.

Las actividades humanas que se realizan alrededor de la ciudad de Mérida y de las zonas de captación, generan contaminación al no tener una regulación y vigilancia de la disposición de sus residuos líquidos y sólidos. Esta es la principal razón por la cual es necesario proteger el recurso hídrico subterráneo, ya que el abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras derivadas de la contaminación química, para lo cual se establecen límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radioactivas.

Una de las alternativas para disminuir la problemática relacionada con el agua es la protección del acuífero, con la finalidad de evitar o reducir los peligros del agua subterránea a la contaminación, entendiendo como peligro aquellas actividades que ocasionan la disminución de la cantidad y/o la calidad del agua. No se debe ser pasivo ante este problema, ya que existen metodologías y herramientas para obtener los perímetros de protección de las zonas de abastecimiento, que han sido aplicadas en diferentes países y que pudieran ser implementadas en nuestra región.

Es por esto, que el propósito de esta tesis denominada: "PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE POZOS EN UN ACUÍFERO KÁRSTICO" es delinear zonas de protección para el principal campo de pozos para el abastecimiento de la ciudad de Mérida, México, como base para la elaboración de un plan de manejo que permita mejorar la gestión del recurso hídrico en un área kárstica en donde la única fuente para el abastecimiento es el agua subterránea.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo General

Elaborar una propuesta metodológica para la delimitación de Perímetros de Protección de Pozos (PPP) para acuíferos kársticos, como base para mejorar la gestión del recurso hídrico.

Objetivos Específicos

Generar la información hidrogeológica en un acuífero kárstico, en el caso de Mérida (Yucatán México), para la definición de los Perímetros de Protección de Pozos (PPP).

Analizar los diferentes conocimientos generados en la obtención los perímetros de protección de pozos (PPP) en un acuífero kárstico.

Aplicar diversas metodologías para la delimitación de los PPP.

Establecer el riesgo a la contaminación del agua subterránea.

Elaborar un plan de manejo del recurso hídrico en los PPP.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Recurso hídrico

La evaluación de la cantidad de agua en el planeta Tierra es complicada debido a que es un recurso dinámico en el tiempo y espacio. Aproximadamente, 97.5% del total del agua es salina y 2.5% es dulce. Sin embargo, sólo 0.26% del agua dulce (y 0.01% del total del Planeta) se encuentra en lagos, ríos y otros almacenamientos (Shiklomanov 2002).

El ciclo hidrológico es un proceso a través del cual se puede analizar la dinámica del agua en sus diferentes manifestaciones en forma de precipitación, evaporación, infiltración y escurrimiento. La importancia de conocer el ciclo hidrológico consiste en saber de dónde viene y hacia dónde se va el recurso hídrico. Se tiene evidencia de que el consumo y aprovechamiento del agua ha sido ascendente desde los años cincuenta y la tendencia seguirá en la misma dirección, cuando menos, hasta el año 2025. En este sentido, los problemas del agua en México se tornarán más agudos en las próximas dos décadas (Ávila 2002).

En el año 2000, más del 90% de la población en México experimentaba problemas de contaminación del agua en sus respectivas regiones hidrológicas, habiendo generado este dato a partir de la obtención de un índice de calidad del agua en el país (CNA 2001); sin embargo, este índice no refleja el grado la contaminación del agua por residuos peligrosos (metales pesados y sustancias radioactivas, entre otros).

Las principales fuentes de contaminación y deterioro de la calidad del agua en México son las descargas industriales y urbanas, pero también son las descargas de la agricultura, por el uso de plaguicidas y fertilizantes químicos. Entre los principales factores de riesgo y pérdida de la seguridad hídrica para el país están: el cambio climático y las variaciones en el patrón de precipitación como consecuencia; la reducción de la disponibilidad del agua y la mayor presión hídrica; la escasez de

agua en ciudades medias y grandes; la contaminación y el deterioro de la calidad del agua y, los conflictos y disputas por el agua (Ávila 2002).

2.2. Hidrogeología de acuíferos kársticos

El término karst es sinónimo de aquellas formaciones geológicas constituidas por rocas sedimentarias consolidadas, cuyos poros y fisuras han sido ensanchados por la acción disolvente de las aguas subterráneas (Custodio y Llamas 1983).

Por otra parte, Deming (2002) define karst como un tipo de formación topográfica en regiones delimitadas por rocas consolidadas carbonatadas, mencionando que la topografía del karst está caracterizada por la presencia de sumideros, cavernas y otras características de disolución.

La hidrogeología permite conocer las características de un acuífero por lo que es indispensable conocer el comportamiento de los sistemas kársticos, debido a que el agua que se extrae de una zona en un acuífero kárstico es, la mayoría de las veces, de vital importancia para el abastecimiento de agua. En los ambientes kársticos se debe tener como prioridad la necesidad de proteger el vital líquido, siendo la implementación de un adecuado plan de manejo, lo que permite una mejor administración del recurso hídrico.

De manera general, a nivel mundial se han desarrollado investigaciones para conocer las características de los acuíferos y su protección, siendo de importancia para este trabajo de tesis el conocimiento de las actividades realizadas para los acuíferos kársticos en distintas zonas, similares a la Península de Yucatán.

Así, por ejemplo, para la determinación de los Perímetros de Protección en la Fuentona de Muriel (Soria), fue necesario conocer las características hidrogeológicas del acuífero; para esto, se desarrolló la investigación a través de la realización de cinco pruebas con trazadores que permitieron la delimitación de diferentes isócronas de protección. En esta investigación y a través de estas pruebas, se calculó el balance hidrológico, la recarga natural y los parámetros hidrogeológicos, siendo

estos resultados utilizados para establecer los Perímetros de Protección de Pozos (PPP) para la calidad del agua subterránea, siendo dividida el área de estudio en dos zonas, para su manejo adecuado (Pérez 2007).

La Península de Yucatán ha sido objeto de estudios a nivel internacional, nacional y local, dando como resultados trabajos que describen el comportamiento del acuífero en diferentes regiones.

Marín *et al.*, (2004) señaló que la Península de Yucatán, en términos de lo que se conoce de su geología, puede ser dividida en tres partes, el este de la Península, la zona central, y la zona noroeste. Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona central de la Península de Yucatán es muy importante ya que en esta zona se encuentra el parte-aguas regional que divide la Península en dos partes, la parte del noroeste y del noreste.

La zona central es la más compleja de la Península debido a su mayor elevación y relieve topográfico, se distingue por sus formas cársticas de grandes dimensiones, su mayor disponibilidad de suelos; vegetación más alta; densa capa de yeso y por la falla que la separa de la Planicie interior. En el noreste de la Península de Yucatán, Beddows (2003) describe el acuífero costero de Quintana Roo como un acuífero de porosidad triple y comenta que donde es necesario considerar el flujo del agua subterránea es a través de la matriz, fracturas, y sistema de cavernas interconectadas. El noroeste de la Península de Yucatán presenta un acuífero de un lente delgado de agua dulce que flota sobre agua salada. El espesor del lente en Mérida, Yucatán (en el observatorio meteorológico) es de 61 metros. De acuerdo a Steinich y Marín (1996), el espesor varía de 16 metros en la costa (Chuburná) a más de 80 metros en Sotuta. El acuífero es libre excepto por una banda paralela a la costa (Perry *et al.*, 1989; 1990). Por la naturaleza libre del acuífero, la zona de recarga es a lo largo de todo el acuífero. Esto hace que el acuífero sea sumamente vulnerable a la contaminación (Marín y Perry, 1994; Marín *et al.*, 2000).

En la investigación conocida como: Exploración, modelación y manejo de los ecosistemas dependientes del agua subterránea en acuíferos kársticos. – Caso de

estudio Sian Ka'an, Yucatán, México, se presentó la aplicación de un software en la zona del estado de Quintana Roo denominada "Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an".- Se inició con un trabajo de campo, en el cual se generaron datos para conocer la caracterización física del acuífero en el área de humedales, para obtener el modelo hidrológico conceptual a través de la alimentación de los datos al programa de modelación, obteniendo finalmente la modelación del ecosistema y su comportamiento como sistema dependiente de un ambiente kárstico. Los mapas de probabilidad del estado actual del agua subterránea y el tiempo de trayecto del agua en las zonas delimitadas, que fueron obtenidos en la modelación efectuada en Sian Ka'an, son útiles para la protección de la calidad del agua subterránea y la implementación de iniciativas de manejo de esta zona (Bibi 2010).

En el 2003 se realizó un estudio para conocer la dispersividad de solutos en el acuífero kárstico de Yucatán; para determinarla, se utilizó un sistema de columna en el laboratorio y pruebas de inyección de trazadores en el campo. En el laboratorio, se trabajaron con 17 muestras de roca, correspondientes a la zona no saturada. Con estas pruebas se obtuvo que el movimiento de flujo y el transporte de solutos se presentan principalmente en los conductos de disolución. Se estableció que las pruebas de trazado son difíciles de realizar y se sugiere utilizar el Método de Dilución y aplicar el Método Unidimensional, como una alternativa para determinar la dispersividad en el karst de Yucatán, México (Graniel *et al.* 2004).

La descripción del comportamiento del acuífero kárstico en la costa nororiental del estado de Yucatán, fue el resultado de un estudio hidrogeológico. Las actividades de campo que se efectuaron en el área incluyeron, actividades de nivelación de pozos, piezometría y análisis fisicoquímicos. Esta información dio como resultados principales: las curvas de isocargas hidráulicas, la determinación del flujo preferencial y el análisis del comportamiento espacial de los parámetros fisicoquímicos analizados a las muestras de agua. Los resultados mostraron que de acuerdo a la geología, se definieron dos zonas con diferentes características, una compuesta de roca caliza arenosa y la otra de calizas muy compactas; de igual manera, se confirmó la dirección de flujo en el Estado, de sureste a noroeste con descarga al mar, así

como el comportamiento de la interfase salina cuya profundidad es mayor a medida que aumenta la distancia a la costa (Carrillo 2006).

2.3. Sistemas de abastecimiento de agua

El conjunto de las diversas obras que tienen por objeto suministrar agua a una población en cantidad suficiente, calidad adecuada, presión necesaria y en forma continua constituye un sistema de abastecimiento (César 1994).

La importancia de las aguas subterráneas para el abastecimiento es un hecho reconocido, sin embargo, pocos países han puesto en marcha acciones sistemáticas para proteger los acuíferos tanto en cantidad como en calidad. La práctica normal es adoptar medidas una vez que han surgido los problemas por sobreexplotación o contaminación, medidas que con frecuencia se han mostrado insuficientes (López-Vera 2002).

El acceso al agua potable, depende de un sistema de abastecimiento que incluye una zona de captación y extracción, siendo necesario que la zona a la que se enviará el agua se encuentre urbanizada. La urbanización popular es un proceso social por medio del cual los pobres de las ciudades logran tener acceso al suelo, la vivienda y los servicios urbanos como el agua potable (Duhau 1998).

El agua para uso o consumo humano es aquella que no contiene contaminantes, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos al ser humano. Sin embargo, las aguas subterráneas utilizadas para abastecimiento pueden presentar problemas de contaminación lo cual tiene como consecuencia que el agua no cumpla con la calidad y los límites requeridos en la legislación, que para el caso de México es la NOM-127-SSA1 (1994).

2.4. Química del agua

La química del agua juega un papel importante en la delimitación y protección de los pozos de abastecimiento, siendo esta característica el indicador de los niveles de la calidad y contaminación presentes en un agua para consumo humano. En este rubro, es indispensable, conocer las técnicas, tecnologías y metodologías que permiten la protección de un acuífero kárstico para evitar la contaminación del agua para el abastecimiento.

En México, se han desarrollado investigaciones tendientes a la remediación de los efectos generados por la contaminación. Por ejemplo, en la ciudad de Salamanca, Guanajuato, se ha logrado conocer el comportamiento de la adsorción de plomo sobre el material acuífero bajo la influencia de diferentes facies hidroquímicas, las cuales se observan comúnmente en los sistemas de aguas subterráneas; utilizando con éxito el modelo de complejación en superficie de triple capa para ello (Mora 2002).

En el estado de Hidalgo, el agua que suministra los pozos es del tipo bicarbonatada cálcica y bicarbonatada mixta, encontrando como factor de riesgo las altas concentraciones de Arsénico (As). Se realizaron pruebas para disminuir los contenidos de As utilizando adsorbentes naturales, comerciales y resinas de intercambio iónico, finalmente se encontró que las resinas de intercambio aniónicas fuertes de tipo macroreticular, presentaron mayor capacidad de remoción para el As (Pérez 2004).

Por otra parte, existen varios estudios acerca de la presencia de nitratos en el agua, ya que este contaminante es uno de los parámetros importantes para la calidad del agua de consumo, ya que su efecto es potencialmente tóxico. La situación actual de las masas de agua de la Zona Centro de España es una muestra de cómo la carencia de criterios normalizados para la designación de Zonas Vulnerables a la contaminación por nitratos, deriva en una gestión desigual y sectorizada de los acuíferos comunes a las Comunidades de Madrid y de Castilla-La Mancha (López 1996). Los resultados de investigaciones sugieren que la declaración y el

seguimiento de las zonas vulnerables deben plantearse desde un punto de vista multidisciplinar y dinámico, considerando las variaciones espacio-temporales del nitrógeno en las masas de agua, e integrando la información sobre la calidad química del agua, el medio físico y los usos del territorio (Martínez 2009).

La contaminación por nitratos ha sido de especial interés en diferentes partes del mundo. En el Reino Unido (Nottinghamshire) se ha intentado mitigar la contaminación por nitratos a través del cambio en el uso de suelo de agricultura a forestal como una medida para enfrentar el problema de la alta contaminación por nitratos en el agua subterránea. Una vez efectuado el cambio del uso de suelo, la modelación matemática evaluó la efectividad de la medida en la zona, demostrando que la medida fue efectiva disminuyendo la presencia de nitratos en el agua subterránea. Se enfatiza en la modelación como una herramienta que podría ser usada en un sistema de toma de decisiones para resolver los conflictos en cuanto al manejo del agua (Zhang y Hiscock 2011).

En Austria, se utilizaron datos de 1200 municipios para determinar los factores e indicadores de la contaminación por nitratos. El análisis estadístico de los datos dio como resultado la definición de los factores de influencia para la contaminación por nitratos y la predicción del balance del nitrógeno. Se concluyó que las características ambientales como la temperatura y la precipitación son co-factores importantes; así, altas temperaturas y una gran cantidad de precipitación pluvial, dan como resultado una menor concentración de nitratos en el agua subterránea. Los resultados del análisis indicaron de igual manera que el balance de nitrógeno es un indicador aceptable para predecir la contaminación de nitratos en el agua subterránea (Wick *et al.* 2012).

Es importante conocer la calidad del agua que es extraída para abastecimiento para determinar el tipo de tratamiento que deberá de ser aplicado, en su caso, para ofrecerla con una calidad apta para el consumo humano. Con la finalidad de evaluar la calidad química y bacteriológica del agua subterránea en un área al sur de la ciudad de Mérida, en la que se encuentra el principal campo de pozos para el abastecimiento de la ciudad de Mérida (el sistema Mérida I), se realizó un estudio

durante el periodo de 1998 al 2000, en el que se determinaron los parámetros de campo y los iones mayoritarios. Los resultados mostraron que la calidad química del agua fue buena, excepto para los nitratos en los pozos someros en los que se excedió el valor establecido en la Norma Oficial Mexicana (10 mg/l como N-NO₃⁻); respecto a la calidad bacteriológica, en el nivel freático se obtuvo contaminación fecal y algunos de los pozos profundos ubicados en los alrededores del campo de pozos de la zona de estudio también presentaron este tipo de contaminación (Pacheco *et al.* 2004).

2.5. Vulnerabilidad y riesgo

El agua subterránea es vulnerable a la contaminación por diferentes contaminantes como nitratos, metales pesados, plaguicidas y fertilizantes; siendo las principales fuentes de contaminación en México, las descargas industriales, urbanas y las descargas de la agricultura, por el uso de plaguicidas y fertilizantes químicos.

La vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, es definida como la tendencia o probabilidad de que los contaminantes alcancen una posición específica en el agua subterránea después de haberse introducido en algún punto sobre el acuífero (NRC 1993).

La vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación es una propiedad intrínseca del medio que determina la sensibilidad a ser afectados negativamente por un contaminante externo (Foster 1987).

Foster & Hirata (1991) definen la vulnerabilidad intrínseca, como la sensibilidad del acuífero para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta.

Algunos de los modelos que se usan para evaluar la vulnerabilidad en diferentes tipos de acuíferos y de los más usados son el DRASTIC, SINTACS, GOD, EPIK, Ekv, $\Delta hT'$, AVI y el BGR., que deben sus nombres a sus correspondientes acrónimos.

Por otra parte, una amenaza se define como una fuente potencial de contaminación resultado de las emanaciones de sustancias dañinas a través de la producción, transporte, almacenamiento y disposición, como consecuencia de las actividades humanas (Zwahlen 2003).

Algunos investigadores han establecido métodos para evaluar las cargas contaminantes al subsuelo y proponer clasificaciones para definir la mayor probabilidad de generación de cargas contaminantes hacia el acuífero (Foster e Hirata 1988; Zaporozec 2001, Johansson e Hirata 2001, Foster *et al.* 2001). En algunos trabajos se hace esta clasificación de forma integral, considerando el mapeo de vulnerabilidad, programas de monitoreo e incluso, estudios de detalle.

Foster en 1988, define el riesgo como el peligro de deterioro en la calidad de un acuífero por la existencia real o potencial de sustancias contaminantes en su entorno. La interacción entre la carga contaminante (amenaza) y la vulnerabilidad del acuífero determina el riesgo de que la contaminación penetre al acuífero. El riesgo a la contaminación es igualmente definido como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el agua de consumo humano.

El riesgo definido por Zwahlen en el 2003, se determina con el efecto combinado de la evaluación de la vulnerabilidad y las amenazas, y se establecen las consecuencias probables de un evento de contaminación potencial.

Para el estado de Yucatán, se han desarrollado algunos trabajos tendientes a determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación mediante la aplicación de diferentes metodologías, entre las que se pueden citar los siguientes:

En el 2006, se determinó la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea para el Estado de Yucatán a través de una modificación del método DRASTIC, obteniendo vulnerabilidades moderadas (2.96%), altas (58%) y extremas (38.9%), lo que indica, que el territorio es altamente susceptible a la contaminación del agua subterránea. De igual manera, del mapa de riesgo se obtuvieron cuatro zonas: baja (17.2%),

moderada (38.4%), alta (19.5%) y extrema (24.7%), siendo el uso del suelo el factor con el mayor peso en la determinación del riesgo (Gijón 2006).

Pérez *et al.* (2008), evaluaron la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en el estado de Yucatán mediante la aplicación del método DRASTIC, los valores obtenidos indicaron que la zona se encuentra en la clasificación de vulnerabilidad de moderada a extrema, lo que permitió observar que la mayor vulnerabilidad (extrema) a la contaminación del agua subterránea se presentó en los extremos Este y Oeste de la zona costera, correspondiente al 5% de la extensión de la zona de estudio y la menor vulnerabilidad (moderada) se presentó en la zona de cerros, cubriendo el 0.2 %; el 94.8% restante, se encontró en las clases alta y muy alta, por lo que casi en su totalidad, el estado de Yucatán presenta la característica de altamente vulnerable.

Mediante una revisión bibliográfica se establecieron los valores de los parámetros del método EPIK, sin embargo, para una determinación más precisa de la vulnerabilidad se midieron en campo algunos valores para la infiltración. La aplicación del método EPIK permitió evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea mediante la adaptación de los parámetros involucrados de acuerdo a las características kársticas del estado de Yucatán. La evaluación demostró que el acuífero de Yucatán es muy vulnerable a la contaminación (Bolio *et al.* 2011).

La Zona Metropolitana de Mérida (ZMM), ubicada en el estado de Yucatán, se caracteriza por ser una región kárstica, con ausencia de corrientes superficiales y con la presencia de cavernas y cenotes. Para la evaluación de la vulnerabilidad se utilizaron dos métodos SINTACS y EPIK. A través del SINTACS, se tomó en cuenta el crecimiento demográfico en la ZMM que ha originado que la extracción del recurso hídrico se haya incrementado. Asimismo, se consideró en la evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, la existencia de la carga contaminante y la vulnerabilidad que posee el acuífero a la contaminación. El método EPIK, mostró que el acuífero es muy vulnerable a la contaminación correspondiéndole dos categorías de vulnerabilidad: alta y muy alta. El índice de vulnerabilidad SINTACS,

dio lugar a la identificación de tres categorías de vulnerabilidad: alta, muy alta y extremadamente alta. Siendo el Riesgo a la contaminación del agua subterránea clasificado en los niveles de: bajo, moderado y alto (Figura 2.1) (Herrera 2012).

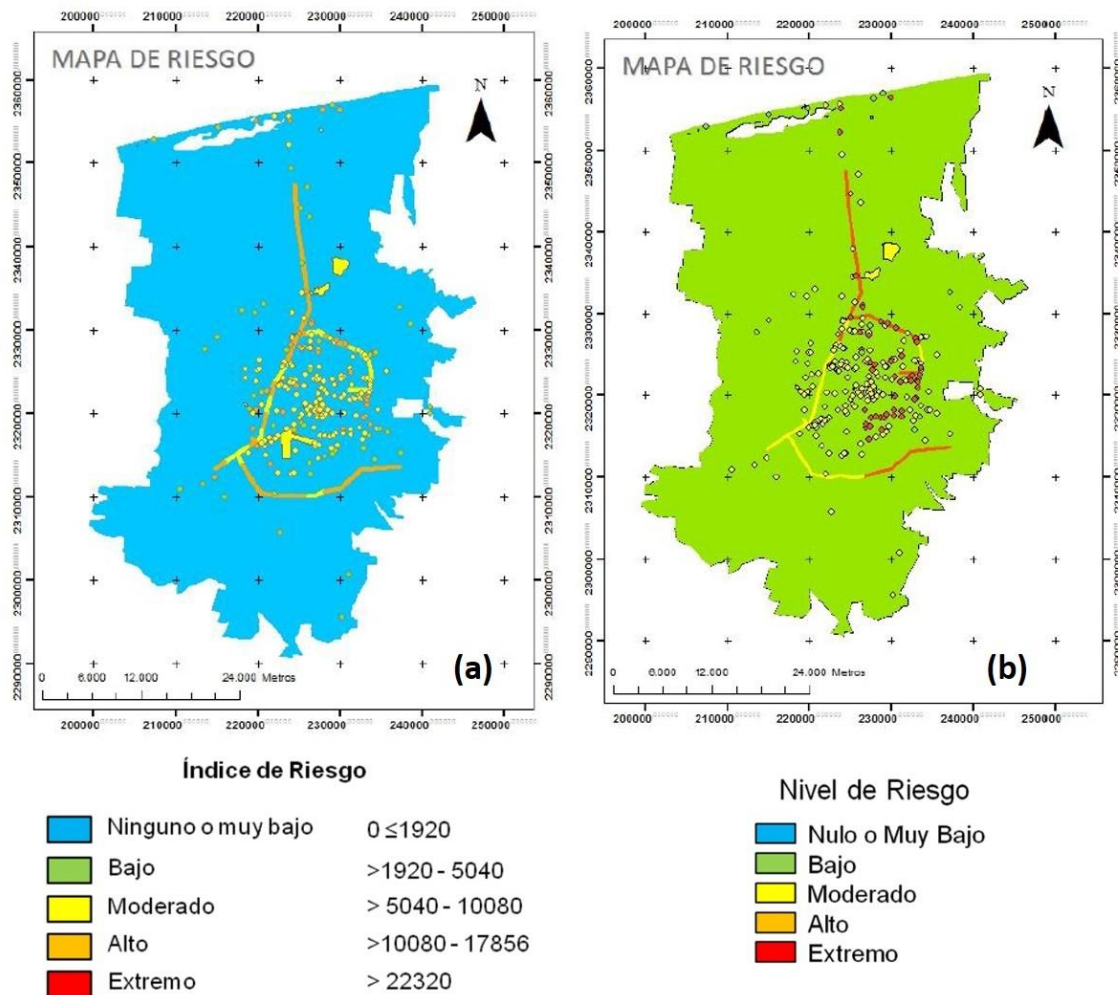


Figura 2.1. Mapas de Riesgo SINTACS (a) y EPIK (b). Fuente: Herrera (2012)

Aguilar *et al.* (2013), analizaron diferentes enfoques, teóricos y metodológicos utilizados para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo a la contaminación de acuíferos kársticos. Analizaron enfoques hidrogeológicos europeos, evaluaciones geológicas, el hidropedológico y el geográfico, señalando que los modelos que han sido usados para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación en acuíferos kársticos son: EPIK, COPK, PI, Método simplificado o dual, el enfoque esloveno, KARSTIC Y KAVI.

La evaluación de la vulnerabilidad para el estado de Yucatán a través del modelo IVAKY (Aguilar *et al.* 2014), demostró que la costa noreste del Estado presenta una vulnerabilidad alta ocupando el 33% de la extensión territorial y con presencia de suelos arenosos (solonchak y arenosol). Definiendo que la presencia de esta alta vulnerabilidad se debe al factor relieve, debido a que las altas depresiones y la falta de cobertura del relieve disminuyen la función protectora y por consecuencia eleva la vulnerabilidad.

De los modelos que recientemente han sido aplicados para el estado de Yucatán, se encuentra el modelo COP (Sosa 2014). Los resultados mostraron que el índice de vulnerabilidad presentó dos clasificaciones, una de baja vulnerabilidad ubicada en la zona costera y centro del Estado; y en el resto de la superficie estatal, una vulnerabilidad moderada. El factor C (Concentración del flujo) mostró dos clasificaciones: moderada en la costa y las regiones poniente, centro y noreste; mientras que en el resto de la superficie estatal, una alta vulnerabilidad. El Factor O (protección del agua subterránea, estratos suprayacentes) presentó en la totalidad de la superficie estatal una vulnerabilidad alta. Con respecto al Factor P (Precipitación) se presentaron dos clasificaciones: muy alta y alta vulnerabilidad, la primera en la región noreste y la segunda, en el resto del Estado (Figura 2.2). Las zonas más vulnerables son aquellas con una clasificación muy alta debido al arrastre de los contaminantes como resultado de las altas precipitaciones de la zona. El desarrollo del karst disminuye la capacidad de protección del acuífero propiciando que las vulnerabilidades sean altas principalmente donde el karst es más fracturado, causando que el flujo del contaminante entre contacto con el agua subterránea más rápido.

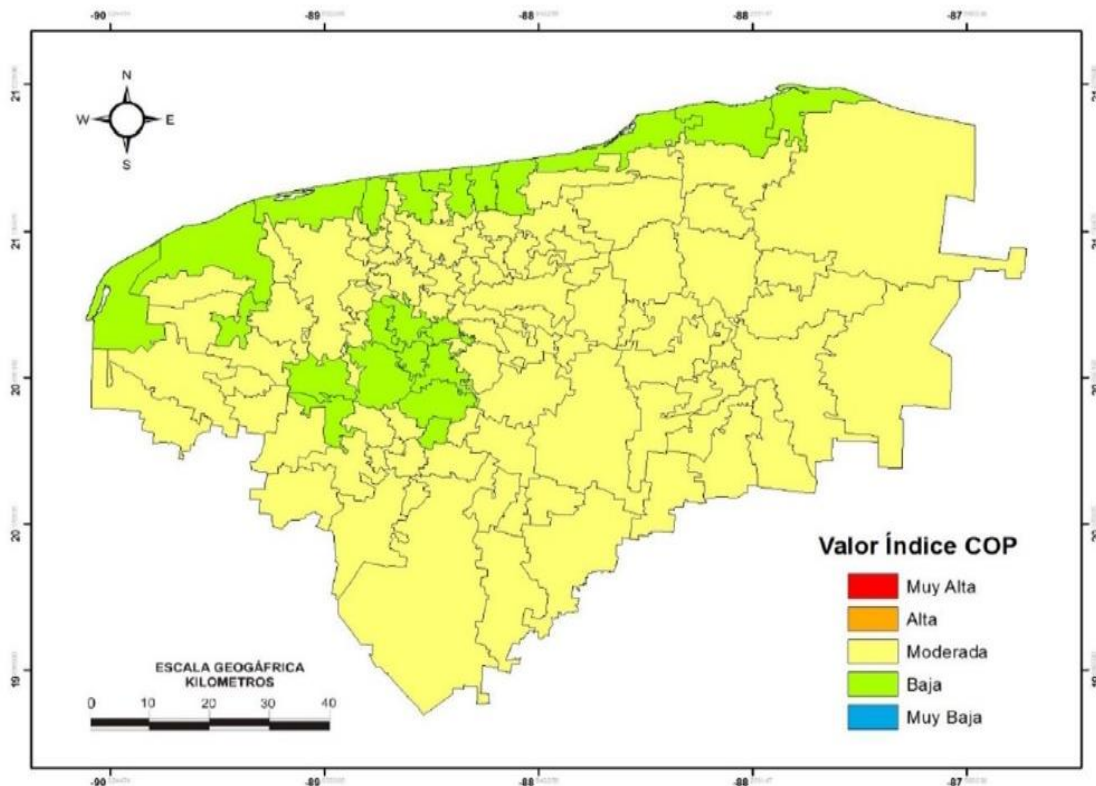


Figura 2.2. Índice de vulnerabilidad COP para el estado de Yucatán.

Fuente: Sosa (2014)

2.6. Protección del recurso hídrico en un ambiente kárstico

La toma de decisión sobre la necesidad de proteger un acuífero o actuar sobre él, depende de cómo sea percibido el problema mediáticamente por la opinión pública, por los intereses económicos puestos en juego y por la influencia de los grupos de presión (López-Vera 2002).

Los sistemas de agua subterránea en calizas, dolomitas y otras rocas solubles, pueden comportarse como flujo en fracturas o pueden estar influenciadas por otro tipo de flujo. En general, las rocas solubles con elevada porosidad primaria desarrollan un sistema de flujo difuso con mínimas características de karsticidad; mientras que las rocas con porosidad primaria muy baja, desarrollan un medio de tipo kárstico. El principal aspecto de un medio kárstico es que está constituido por

rocas calcáreas con flujo libre, en donde la mayor parte del agua subterránea se desplaza a lo largo de canales de disolución bien desarrollados. En la mayoría de los casos, el flujo está controlado por la orientación de los planos de estratificación y fracturas que afectan la roca, que son las estructuras que determinan la ubicación de los conductos de disolución. Debido al tamaño que logran alcanzar los conductos de disolución (mayores de un centímetro), el flujo se comporta prácticamente como en una tubería, alcanzando velocidades mucho mayores a las que normalmente se registran en el agua subterránea, situación que origina la presencia de flujo turbulento. Las características anteriores ocasionan problemas en el cálculo de zonas de protección para los medios kársticos (CNA 2007).

Asimismo, el medio kárstico es el más vulnerable a la contaminación debido a la estructura particular del drenaje. La rapidez del flujo en el interior del sistema favorece la transmisión de los contaminantes y es escasa la capacidad de autodepuración, debido al limitado intercambio iónico en comparación con los medios porosos (Fagundo y González 2002).

2.7. Perímetros de Protección de Pozos (PPP)

El agua que es extraída para el abastecimiento es obtenida de un pozo, el cual se define como un foso o un conducto, que es usualmente construido con el propósito de extraer fluidos subterráneos (Deming 2002). En México, se considera que los pozos son una obra de ingeniería, en la que se utilizan maquinarias y herramientas mecánicas para su construcción, con la finalidad de extraer agua del subsuelo (NOM-003-CNA 1996).

Los pozos de extracción cuentan con una zona de captura también conocida como zona de contribución o de llamada, que consiste en el área dentro de la cual toda la recarga del acuífero, sin importar cuál sea su origen (precipitación, flujo lateral horizontal, flujo vertical), circulará y finalmente será extraída en dicho aprovechamiento. La constante extracción (no controlada) del agua de un pozo

puede presentar un abatimiento, que es una cantidad que representa la diferencia entre la profundidad al nivel estático y la profundidad al nivel dinámico, registrado cuando se bombea un pozo (CNA 2007). El abatimiento decrece paulatinamente con la distancia radial, hasta que llega a un punto en que no se reconoce afectación en el nivel freático (o piezométrico) del acuífero, por efecto del bombeo.

Al ser extraída el agua para su aprovechamiento, se genera un área de influencia que está definida como la región incluida dentro del cono de abatimiento de un pozo de extracción, por lo cual es necesario llevar un manejo adecuado y conocer las características del pozo para establecer el periodo de bombeo y evitar el abatimiento del nivel piezométrico (CNA 2007).

El agua subterránea se encuentra impactada por la construcción y operación inadecuada de los pozos de extracción, dando como resultado que la operación y la forma ineficiente en la que se está extrayendo el agua produzca impactos ambientales severos a ecosistemas y a la salud humana (Domínguez y Carrillo-Rivera 2007).

Dentro de las actividades de los programas de protección de pozos de aguas subterráneas, algunos autores plantean que inicialmente se deben identificar cuáles son las actividades humanas que requieren atención, debido a que representan zonas de mayor peligro de contaminación de los acuíferos. Foster (1987) y Foster e Hirata (1988), proponen un sistema sencillo para la priorización de actividades, donde el riesgo es definido como la interacción entre la intensidad de la carga contaminante antrópica y la vulnerabilidad del acuífero.

La protección de las captaciones de abastecimiento urbano se realiza principalmente mediante el establecimiento de perímetros de protección. La determinación de zonas de protección se refiere a todo el proceso de especificación de una región aledaña al aprovechamiento, con la finalidad de limitar al máximo, un posible evento que conduzca a la contaminación de los recursos hidráulicos subterráneos. Incluye varios pasos, que van desde la búsqueda, recopilación de información y selección del

método más apropiado, hasta la creación de mapas en donde se delimite la ubicación y amplitud de cada una de las zonas de protección calculadas (CNA 2007).

La implementación del Programa de Protección de Pozos involucra 5 pasos principales (CNA 2007):

1. Conformar un equipo de trabajo en la comunidad para implementar e iniciar el programa de protección de pozos.
2. Delimitar las zonas de protección de cada uno de los pozos de abastecimiento de agua potable que existan en la comunidad.
3. Identificar y localizar las fuentes potenciales de contaminación.
4. Manejar las zonas de protección delimitadas. Las opciones de manejo incluyen desde los programas de educación ambiental de la población hasta la implementación de reglamentos para la prevención de la contaminación.
5. Planeación para el futuro. Aquí se incluye el diseño de un plan de contingencia para asegurar abastecimientos alternativos a la población, en el desafortunado caso de que ocurra un evento de contaminación del agua subterránea.

De acuerdo a la implementación de otros programas para la protección de pozos analizados, la metodología de la Comisión Nacional del Agua (CNA) presenta diferencias en el orden cronológico de la realización de las actividades, por lo cual es necesaria la adecuación de la metodología de la CNA, para la obtención de mejores resultados.

En Inglaterra y País de Gales, los principios y la aplicación de las zonas de protección adoptaron una zonificación tripartita, en donde el área de protección se subdivide en tres zonas concéntricas que se determinan con base en el criterio de tiempo de tránsito dentro del área de influencia y por la zona de contribución del pozo (CNA 2007):

Zona I (Zona de protección interior)

Zona II (Zona de protección exterior)

Zona III (Cuenca de abastecimiento de la fuente)

La **Zona I** se define por la distancia para un tiempo de tránsito de 50 días, pero tiene un mínimo de 50 metros de radio. Se localiza inmediatamente adyacente al pozo. La selección del tiempo tránsito de 50 días se realizó con base en un criterio de decaimiento biológico. Incluye las instalaciones propias del pozo. La **Zona II** se define como la isócrona de 400 días de tiempo tránsito y se estableció con base al tiempo mínimo requerido para la dilución y atenuación de contaminantes que se degradan lentamente y la **Zona III**, se define como el área que se requiere para sostener la explotación de agua subterránea a largo plazo. Sin embargo, se pueden realizar algunas adecuaciones a las zonas dependiendo del tipo de acuífero (confinado, libre, kárstico).

2.7.1. Delimitación de zonas de protección

La delimitación de zonas de protección de pozos es una actividad que trata, precisamente, de restringir al máximo la posibilidad de que la fuente de agua (subterránea, en este caso) sea contaminada por efecto de las labores humanas. Además de ser un recurso natural indispensable para los seres humanos, el agua subterránea también forma parte vital de algunos ecosistemas (CNA 2007).

El perímetro de protección delimita un área en el entorno de la captación de agua en la cual, de forma graduada, se restringen o prohíben las actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas, o que afecten al caudal realmente aprovechable para el abastecimiento a la población. Al establecer un perímetro de protección es necesario encontrar un equilibrio entre una protección adecuada y suficiente del recurso y el respeto, en la medida de lo posible, de la actividad socioeconómica de la región circundante. Existen numerosas formas y métodos para aplicar perímetros de protección de pozos alrededor de captaciones para el abastecimiento de agua potable, los que dependen de la calidad y la cantidad

de la información existente y su aplicación se ve restringida por los derechos de propiedad en las zonas afectadas (Espinoza *et al.* 2004).

2.7.2. Métodos para la delimitación de PPP

Diferentes métodos han sido utilizados para la delimitación de Perímetros de Protección de Pozos (PPP). En la Tabla 2.1, se muestran los métodos, criterios utilizados y las localidades en las que se han aplicado.

Tabla 2.1. Ejemplos de lugares donde se han utilizado diferentes métodos y criterios para la delimitación de PPP.

MÉTODO	CRITERIO UTILIZADO	LOCALIDAD
Radio arbitrario fijo	Distancia	Nebraska Florida Edgartown, MA Duxbury, MA
Radio calculado	Distancia Tiempo de viaje	Florida
Forma simplificada variable	Tiempo de viaje Abatimiento	Porción sur de Inglaterra
Modelo analítico	Abatimiento Características físicas	Cape Cod, MA Duxbury, MA Edgartown, MA Alemania Occidental Holanda Polk Co., FL Hernando Co., FL
Sistemas de flujo/Geología	Características físicas	Vermont Connecticut Duxbury, MA
Modelo Numérico/Transporte	Tiempo de viaje Abatimiento	Dade Co., FL Broward Co., FL Palm Beach, FL

FUENTE: (CNA 2007); Adaptado de USEPA (1987) y Miller (1996).

Considerando un estricto orden de incremento en la complejidad de su aplicación y por lo tanto, el aumento en los costos asociados a los métodos establecidos como útiles por la United States Environmental Protection Agency (USEPA) para la

delimitación de zonas de protección de pozos, se da la siguiente relación (CNA 2007):

1. Radio arbitrario
2. Radio Calculado
3. Formas simplificadas de tipo estándar
4. Métodos Analíticos
5. Cartografía Hidrogeológica
6. Modelos numéricos
7. Mapeo Hidrogeológico

Los softwares basados en modelos analíticos y semianalíticos que ha desarrollado la EPA, son (Espinoza *et al.* 2004):

1. WHPA (Well Head Protection Area), versión 2.2.
2. WhAEM (Wellhead Analytic Element Model)
3. Modelos Numéricos

2.7.3. Consideraciones en la selección de la metodología

La definición de la metodología más apropiada para la delimitación de PPP en una zona determinada depende de varios factores, entre los que se pueden mencionar:

1. La disponibilidad de información hidrogeológica para los aprovechamientos existentes y para el medio hidrogeológico de referencia.
2. La complejidad del medio hidrogeológico, particularmente en relación con la cantidad de datos disponibles.
3. La existencia de modelos de flujo subterráneo realizados con una finalidad diferente a la delimitación de zonas de protección.

4. El tiempo y recursos, disponibles y necesarios, para lograr un resultado aceptable.

Dentro de la delimitación de perímetros de protección, se ha documentado la importancia de regular las diferentes zonas del perímetro de protección, siendo de vital importancia que ésta tenga una relación estrecha con la planeación urbana de la zona en cuestión y sus alrededores (Martínez 2002).

2.7.4. Aplicación de métodos para la delimitación de PPP

El principal objetivo de delimitar los PPP, es y será la implementación de un programa que establecerá límites, regulará y legislará los usos y formas de utilización del agua subterránea que se extrae, para la satisfacción de las necesidades de dotación de agua.

La investigación denominada “Hidrogeología de los acuíferos kársticos de Pegalajar y Mojón Blanco (JAÉN)”, analizó la climatología, hidrogeología, parámetros hidráulicos, piezometría, características físico-químicas, e isótopos ambientales y radioactivos presentes en el agua subterránea. En este documento se obtuvieron conclusiones puntuales de la información obtenida para el acuífero. El análisis de los isótopos ambientales permitió la identificación de las diferentes familias de agua para el acuífero, se concluyó que existe una zona principal de infiltración en la Sierra de Mojón situada a cotas 1200 y 1300 msnm. De igual manera, se obtuvieron el coeficiente de infiltración de un 40%, la supuesta nula escorrentía y el desglose de las salidas del año medio para las diferentes fuentes de abastecimiento a través de su bombeo. Para este proyecto fue importante contar con información espacial y temporal, así como tomar en cuenta la necesidad de la información histórica, para que el análisis conjunto de esta información contribuyera a la delimitación de los perímetros de protección de pozos (González 2007).

En la investigación realizada por Martínez (2002), se propuso una metodología para la delimitación de perímetros de protección, dando como resultado la división en tres zonas del área de captación del abastecimiento urbano de Villacastín, España. La

división en estas tres zonas para los perímetros de protección, fue el resultado de estructurar el conocimiento acerca de las características hidrogeológicas del acuífero, la infraestructura del abastecimiento, las necesidades de agua, los focos potenciales de contaminación en el municipio y vulnerabilidad de las diversas zonas aplicando diferentes métodos para delimitar los perímetros de protección.

En Beijing, China, se aplicaron 5 métodos diferentes para delinear el campo de pozos de Pinggu, localizado en un acuífero de no confinado a semi-confinado. Basándose en la literatura y en la revisión de estudios previos, se seleccionaron 5 métodos para la delineación de perímetros de protección. Los resultados fueron comparados con un modelo estocástico numérico basado en el muestreo hipercúbico ortogonal latino. Los resultados demostraron que los modelos analíticos por sí mismos, no garantizan una delineación real de los perímetros de protección, particularmente en un acuífero complejo. El método de radio calculado modificado y un método híbrido fueron más aceptables para los pozos individuales que para los campos de pozos. Los métodos semi-analíticos y los modelos numéricos determinísticos mostraron una mejor delineación de perímetros de protección de pozos debido a que incluyen en su implementación diferentes parámetros del acuífero. La aplicación en Beijing concluyó que es necesario adoptar más de una propuesta para delimitar perímetros de protección de pozos, en especial para acuíferos complejos (acuíferos kársticos), siendo necesario implementar diferentes grados de protección (Dong *et al.* 2013).

Por otro lado, la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG), surgió del descubrimiento de una eficiente y efectiva metodología del manejo y manipulación de datos, dando como resultado la integración y el análisis de mapas temáticos e imágenes de datos que son de gran ayuda, por ejemplo para la delineación de las zonas potenciales de agua subterránea y las zonas con calidad adecuada para las actividades humanas (Srinivasa y Jugran 2003).

En Urnia, Irán, se delinearón las zonas de protección alrededor de tres pozos de abastecimiento a través del software WhAEM-2000, basado en elementos analíticos. El método fue usado para el tiempo de tránsito de dos años de trayecto y la

delineación de perímetros de protección se realizó para los pozos perforados en la cuenca del río Shahr-Chai situado en Urmia. Los resultados mostraron que las formas que define la delineación de perímetros de protección para pozos en un acuífero libre son más largas y estrechas que las de un acuífero confinado (Banv y Deriszadeh 2005).

Otro método igualmente fiable, es la estimación de los tiempos de tránsito basada en datos hidroquímicos e isotópicos para definir direcciones y flujo del agua subterránea (López-Vera 1980; López-Vera y Mahmoud 1995); si bien, en ocasiones la interpretación de resultados resulta ambigua y requiere análisis especiales, lo que incrementa su costo.

En el acuífero del Valle de Toluca, se estableció un método integral que permitió obtener las zonas más vulnerables en el acuífero y dentro de estas áreas, los pozos que requerían protección más urgente. El desarrollo de esta investigación se definió en tres etapas: la primera fue la elaboración de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación; la segunda, la aplicación de criterios para determinar los pozos que requerían más atención debido a su localización en las zonas más vulnerables y finalmente, la tercera etapa consistió en emplear y aplicar diferentes métodos para definir las áreas de protección. Concluyendo que el mejor método a utilizar en el acuífero fue el método analítico modificado (Expósito *et al.* 2010).

Como se pone de manifiesto en el anterior párrafo, diferentes investigaciones muestran las actividades realizadas para la delimitación de zonas de protección, por lo cual es importante mencionar los estudios realizados tanto en el ámbito internacional como nacional, además los realizados en el estado de Yucatán.

En el estudio "Diagnóstico preliminar para la delimitación de una zona de protección hidrogeológica al sur de la ciudad de Mérida, Yucatán", se tienen los antecedentes de los datos recolectados en campo en 1998. En este estudio se realizó un censo de pozos, el análisis de calidad de agua subterránea y la medición de niveles freáticos para establecer un diagnóstico preliminar de la zona sur de la ciudad de Mérida, lo cual es un antecedente que deberá de ser actualizado para realizar la comparación

entre el comportamiento del área de unos años atrás a la actualidad (Escalante 2000).

La delimitación de zonas de reserva hidrogeológica para el campo de pozos de extracción de la planta Mérida I, fueron las resultantes de utilizar gradientes hidráulicos de 0.00015 y de 0.00003 km/km, con los que se obtuvieron distancias de 4374.99 y de 806.70 metros, respectivamente. El tiempo considerando para las estimaciones fue de un año y las distancias representan aproximadamente los lugares desde donde los pozos estarían extrayendo el agua (Pacheco *et al.* 2004).

En 1996, Miller comparó la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea y su protección, entre los acuíferos de Florida y Yucatán. La zona de estudio para el estado de Yucatán fue el campo de pozos de la Planta Mérida I y en Florida, el condado de Dade, los cuales reunían características hidrogeológicas muy similares. Se aplicó el modelo semi-analítico de computadora denominado Wellhead Protection Area desarrollado en 1993 y la principal conclusión, fue la de dar atención a las condiciones de calidad del agua en las zonas estudiadas.

Dentro de las herramientas que se pueden utilizar para determinar los perímetros de protección para pozos se han usado las imágenes satelitales. Éstas, proveen información con la que se puede identificar la geología y, las condiciones geomorfológicas e hidromorfogeológicas, información que permite conocer directa o indirectamente la ocurrencia del agua subterránea en el acuífero (Srinivasa y Jugran 2003).

La determinación de zonas de protección de pozos para el abastecimiento de agua potable se refiere a un proceso integral que inicia desde la recopilación de información, hasta la generación de mapas con las zonas de protección y el informe correspondiente. No debe confundirse el proceso de delimitación de zonas de protección de pozos con los procesos de protección para el acuífero y sus recursos hidráulicos subterráneos. El primero (protección de los pozos), se relaciona con aspectos de salud pública y con los pozos de abastecimiento únicamente; mientras que el segundo (protección del acuífero), tiene mayores implicaciones, ya que

considera la preservación del recurso en la totalidad de la cuenca de agua subterránea (CNA 2007).

Por último, cabe resaltar que con el paso del tiempo es necesario generar y/o actualizar información respecto a la geohidrología de la zona, trayendo como consecuencia la necesidad de efectuar una revisión de los perímetros de protección definidos con anterioridad con base en los conocimientos del medio físico y la metodología existente en el momento en el que haya sido elaborado, debiéndose contemplar periódicamente si se considera necesario efectuar la revisión y eventual modificación de los PPP.

2.7.5. Aplicación de métodos para delimitación de PPP en manantiales kársticos

Existen una serie de métodos para delimitar las zonas de protección, que están disponibles en todos los países desarrollados, sin embargo no son totalmente aplicables para manantiales kársticos, a pesar de lo sencillo y aplicable que ha sido en diferentes contextos hidrogeológicos.

Así, para los manantiales kársticos en Italia, se utilizó una metodología basada en el análisis de curvas de recesión probada a través de la selección de casos. Esta metodología definió cuatro escenarios de vulnerabilidad con una evaluación de las dimensiones de las áreas de protección, incluyendo aquellas situaciones donde no se dispone de datos de campo. Utilizando datos de caudales de descarga, se propuso una aproximación estadística que brindó una solución analítica para determinar los valores de los parámetros fundamentales de la curva de recesión del manantial. Se definió una nueva propuesta y se aplicó a varios manantiales kársticos de Italia, presentándose el estudio de caso de un manantial ubicado en la región Pedemontana de los Alpes marítimos. Este procedimiento puede utilizarse para marcar los límites de zonas de protección de aguas subterráneas utilizadas para provisión de agua potable, conforme lo requerido por la legislación local y la europea. Los métodos de se basaron en la delimitación de la Zona de Protección Inmediata

(IMPZ, por sus siglas en inglés) y Zona de Protección Interior (OPZ, por sus siglas en inglés) mediante la realización de un estudio hidrogeológico completo, para posteriormente comparar los resultados con los obtenidos mediante la aplicación del método del Tiempo Promedio de la Descarga Máxima (MDHT, por sus siglas en inglés) reportado por Civita (1995, 2008).

Considerando que es necesario proteger los manantiales, una de las investigaciones desarrolladas en manantiales kársticos consistió en el desarrollo de un modelo tridimensional de elemento finito por parte de la Universidad Tecnológica de Hefei (China). Con este programa, se simuló el cambio de nivel de agua subterránea en el sistema de acuífero kárstico fracturado del campo de manantiales Jinan. También se exploraron varios planes de protección de manantiales y, se compararon y analizaron sus efectos en el nivel freático. Se encontró que la tasa de explotación de agua subterránea en el sistema kárstico fracturado del área era inadecuada para la protección de los manantiales. Los resultados de simulación sugirieron la necesidad de disminuir el bombeo de agua subterránea de 6.9×10^5 a 2.7×10^5 m³/d para proteger los manantiales. Se menciona que los requerimientos adicionales de recursos hídricos en el área pueden ser cubiertos con el uso de agua superficial y agua residual reciclada (Qian *et al.* 2006).

Otro caso de estudio, fue el desarrollado en el manantial de Sycamore (EEUU). En esta investigación, se llevaron a cabo varias pruebas que consistieron en la aplicación de trazadores en toda el área de estudio llevándose a cabo 14 pruebas con trazadores durante tres temporadas. Los resultados obtenidos de las pruebas con trazadores, controles estructurales y topográficos, así como las características de los manantiales y el flujo base estandarizado, se utilizaron para establecer los límites de los acuíferos y de las condiciones de frontera, para posteriormente desarrollar un modelo conceptual del flujo de agua subterránea. La conclusión principal indicó que el flujo del agua subterránea está controlado directa o indirectamente por la estratigrafía local, la estructura geológica y los cambios en los niveles a través del tiempo geológico, dando lugar a dos acuíferos que abarcan el 80% del área de estudio. Se comenta que los resultados de esta investigación, serán

utilizados para desarrollar un programa efectivo de monitoreo de aguas subterráneas y orientar las futuras estrategias de gestión de las aguas subterráneas (Connair y Murray 2002).

La vulnerabilidad ha sido uno de los enfoques más utilizados para delimitar las zonas de protección de las aguas subterráneas en torno a manantiales en medios fracturados, siendo una herramienta importante para implementar las normas de protección del agua. Pochon *et al.* (2008), realizaron una investigación en la cual se utilizaba la vulnerabilidad como método para establecer la delimitación de áreas de protección en manantiales. Este enfoque tiene la ventaja de evaluar globalmente la vulnerabilidad de manantiales en una etapa temprana de la investigación, lo que permite la selección de un método simplificado (método de radio calculado) para los casos no complicados (baja vulnerabilidad de manantiales). Para el caso de manantiales localizados en zonas de alta vulnerabilidad, es necesario generar información que brinde la caracterización de las propiedades del acuífero especialmente en términos de heterogeneidad, por lo que, para estos casos complicados se requiere de una investigación más detallada, incluyendo experimentos con trazadores y una evaluación de la heterogeneidad del acuífero. De acuerdo con los autores, los datos adicionales obtenidos se podrían utilizar para determinar, de acuerdo a las características del acuífero, el método de isócronas para acuíferos homogéneos y si la heterogeneidad es alta, solo se podría aplicar la cartografía de vulnerabilidad para el agua subterránea basada en la evaluación de las discontinuidades, cubierta protectora y los parámetros de escorrentía. Como parte importante de las conclusiones obtenidas en Suiza, (Pochon *et al.* 2008) establecieron que el concepto de vulnerabilidad obtenido en la investigación, puede ser adaptada para la delimitación de zonas de protección alrededor de los pozos y para otros tipos de acuíferos. Se cree que la aplicación de este enfoque puede contribuir a la preservación de la calidad del agua potable de manantiales en muchas regiones.

De igual manera, en la Sierra de Líbar, perteneciente al sistema de hidrogeología kárstica en Andalucía, España, la acción europea COST 620 propuso un enfoque

global para la protección de las aguas subterráneas en medios kársticos que comprende métodos de cartografía de la vulnerabilidad intrínseca y específica, así como la validación de los mapas de vulnerabilidad, mapas de amenazas y riesgo. Un inconveniente importante de cartografía de la vulnerabilidad es la dificultad para validar dicha vulnerabilidad. Los mapas de vulnerabilidad para la Sierra de Líbar se validaron tanto de forma global (análisis hidrograma, trazadores naturales e isótopos), como para puntos seleccionados (trazadores artificiales). Esta validación, aunque incompleta, confirmó cómo a nivel global existe una alta vulnerabilidad del sistema acuífero kárstico y una extrema vulnerabilidad en sus zonas de captación. Los resultados de la prueba de trazadores junto con los mapas de vulnerabilidad, amenazas y riesgo pueden servir como base científica para la planificación del uso sostenible de la tierra y la gestión de las aguas subterráneas en la Sierra de Líbar. Es importante señalar que los resultados obtenidos, el mapa de vulnerabilidad intrínseca junto con los resultados de las pruebas de trazadores, podrían ser utilizados como una base para delimitar zonas de protección para las fuentes kársticas (Andreo *et al.* 2006).

2.8. Gestión y manejo integral de un acuífero kárstico

Existen distintas escalas de trabajo (global o local) para gestionar la calidad del agua subterránea. El nivel global se refiere a políticas de protección en el ámbito regional o de un acuífero, lo que implica una escala de trabajo más amplia. En el caso de la gestión a nivel local, se hace referencia a la protección de uno o más pozos, lo que necesariamente requiere una escala de trabajo más detallada (Espinoza *et al.* 2004)

Se ha logrado tener una visión sobre la gestión del agua subterránea a través de modelos de programación matemática, habiéndose aplicado el lenguaje de GAMS (General Algebraic Modelling System) al caso estudio del acuífero Mancha Occidental (España), que ha permitido comparar y cuantificar las potenciales ganancias que se derivarían de la implementación de las distintas políticas de

gestión para recuperar este acuífero a un nivel sostenible para el mantenimiento de los humedales (Iglesias 2001).

Cuando se trabaja para la gestión y el manejo del acuífero, es importante la clasificación de las actividades contaminantes por tipo de ocupación del área, es decir si son difusas o puntuales, lo cual permite visualizarlas más fácilmente en un programa de gestión. Las fuentes difusas normalmente provocan plumas de contaminación con concentraciones más bajas que las fuentes puntuales, aunque ocupan una gran área dificultando la determinación de su extensión y su monitoreo. Las fuentes puntuales producen plumas más intensas y en puntos específicos, facilitando su identificación. Sin embargo, cuando estas actividades son pequeñas y están dispersas dentro del área urbana, acaban siendo de difícil localización, exigiendo un inventario de campo para su identificación (Hirata 2002).

También se deben analizar las actividades desde un punto de vista histórico, según la ocupación del terreno. Así, se clasificarían las actividades en a) fuentes de contaminación heredadas, cuando al principio del estudio ya se conocen los casos y actividades que provocaron contaminación al acuífero; b) fuentes existentes, cuando el estudio tiene que identificar y clasificar actividades potencialmente contaminantes ya instaladas; c) futuras fuentes, cuando no existe todavía una ocupación del terreno y se necesita planear su uso; y d) fuentes abandonadas, cuando la actividad potencialmente contaminante ya no existe, pero todavía hay peligro de generación de cargas contaminantes (Hirata y Rebouças 1999).

En los temas de gestión, también hay que considerar la ruptura del ciclo del agua, la alteración del equilibrio de la naturaleza, el calentamiento global y la escasez del agua, entre otros; todos ellos son problemas que surgen de la explotación de las aguas subterráneas. Los problemas ocasionados por la sobreexplotación del agua han sido reconocidos en la literatura desde finales de los años 50 (Iglesias 2001).

Como se ha mencionado, el problema de la sobreexplotación no es un problema que acaba de surgir por lo cual es importante brindar la importancia adecuada al problema del agua, principalmente a la gestión y manejo integral. Como ejemplo, la

gestión del agua subterránea en la cuenca del Río Guadiana, España, se pudo concluir que antes de establecer una tasa de extracción sostenible para el futuro, será preciso abordar la recuperación de las reservas, poniendo en práctica un plan más restrictivo que permita alcanzar el régimen natural (López 1996).

La administración española ha reconocido la necesidad de aplicar políticas de recuperación en algunos acuíferos donde los problemas de salinización, los problemas ambientales y el excesivo incremento en los costos de extracción se han hecho evidentes (Iglesias 2001).

CAPÍTULO III

SITIO DE ESTUDIO

3.1. Descripción del sitio de estudio

El sitio de estudio se localiza entre las carreteras Mérida – Timucuy y Mérida – Tzucalá, a diez kilómetros del Anillo Periférico, al sur de la Ciudad de Mérida, México, comprendiendo el principal campo de pozos de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Mérida (MÉRIDA I) y los alrededores a este campo de pozos en una distancia de aproximadamente 10 km (Figura 3.1). Esta área tiene una altitud promedio de 9 metros sobre el nivel del mar y una extensión de 370 km², aproximadamente. Los límites son: al norte con la Ciudad de Mérida; al sur, con los municipios de Tecoh y Timucuy; al este, con el municipio de Kanasín y al oeste, con el municipio de Umán (Cabrera *et al.* 2002).

3.2. Características del sitio de estudio

El área de estudio se ubica en la región hidrogeológica denominada Semicírculo de Cenotes. Esta región registra el mayor volumen de extracción en el estado de Yucatán, pues de ella se abastecen las ciudades de Mérida, Progreso y otras localidades. Su geología comprende rocas calizas con alta permeabilidad debido a su karsticidad. Presenta una dirección preferencial del flujo de agua subterránea hacia el norte, noreste y noroeste, siempre regido por fracturas, canales de disolución y la pendiente topográfica. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano, el rango de temperatura es de 24 a 28°C y la precipitación de 500 a 1100 milímetros al año (INEGI 2002).

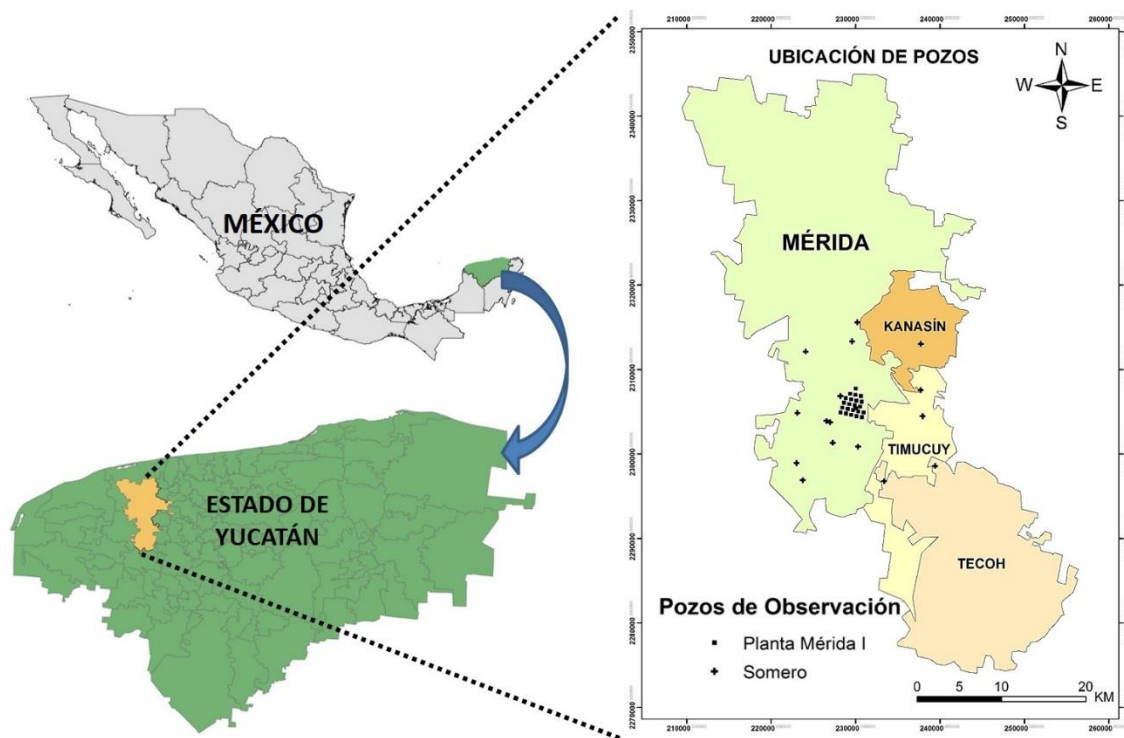


Figura 3.1. Localización del sitio de estudio

3.3. Características de los pozos del área de estudio

La Planta de Abastecimiento Mérida I, es el principal campo de pozos para el suministro de agua potable a la ciudad de Mérida ya que abastece al 65% de la población, aproximadamente. Se encuentra ubicada al sureste de la ciudad, dentro de la Reserva Ecológica de Cuxtal, y abastece la zona centro y sur de la ciudad de Mérida. Tiene una superficie de 25 hectáreas y cuenta con 24 pozos de extracción cuyas ubicaciones geográficas se muestran en la Tabla 3.1.

Los pozos de extracción cuentan con bombas tipo turbina vertical, cuyo motor tiene una potencia de 25 HP. Tienen un diámetro de 16", una profundidad de 40 m y no cuentan con protección sanitaria, por lo que el suministro del agua al pozo es en la longitud total de la parte saturada. Los pozos de extracción tienen un gasto de extracción de 1200 l/s y operan 24 horas al día los 365 días del año para abastecer al 65% de población total de la ciudad de Mérida.

Tabla 3.1. Coordenadas UTM de los pozos de extracción de la planta Mérida I.

Pozo	X	Y
1	230036	2307736
2	229380	2307116
3	230017	2306983
4	230654	2306849
5	228847	2306597
6	229482	2306453
7	230115	2306311
8	230745	2306170
9	228645	2306036
10	229275	2305891
11	229910	2305748
12	230542	2305605
13	228439	2305474
14	229072	2305329
15	229706	2305185
16	230338	2305042
17	230973	2304900
18	228233	2304914
19	228867	2304768
20	229500	2304623
21	230133	2304479
22	230765	2304336
2^a	229625	230612
11^a	230053	2305388

3.4. Características de los pozos de observación

Se cuenta con cinco pozos de observación que fueron perforados dentro de la Planta Mérida I en el año 2012, con la finalidad de conocer los parámetros hidrogeológicos y la litología específica del área.

Los pozos de observación ubicados en la Planta Mérida I (Tabla 3.2.) se encuentran a 5 m de los pozos de extracción (2A, 3, 7, 21 y 22), tienen un diámetro 6" y una profundidad de 40 m. Adicionalmente, fueron elegidos 16 pozos someros (Figura 2.1.) con base en su accesibilidad y procurando una distribución uniforme en el área de estudio, los cuáles están situados en las localidades ubicadas en los alrededores de la zona de captación (Tabla 2.2). El propósito principal de la selección de pozos someros es la realización de las lecturas de los niveles estáticos para determinar los potenciales hidráulicos en el área.


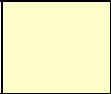



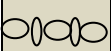

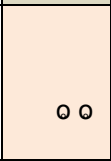

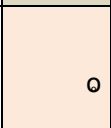

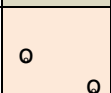

La litología en el sitio de estudio muestra rocas carbonatadas y cuyo perfil litológico se describe en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2. Características de los pozos de observación (Planta Mérida I y sus alrededores)

Pozo	Ubicación	COTA DEL POZOS (msnm)	X	Y	Profundidad del pozo (m)	Profundidad a nivel freático(m)
PO-2A	Mérida I	10.484	229625	230612	39.47	8.51
PO-3	Mérida I	11.144	230017	2306983	39.56	9.19
PO-7	Mérida I	11.313	230115	2306311	39.70	9.41
PO-21	Mérida I	11.810	230133	2304479	39.70	10.31
PO-22	Mérida I	10.390	230765	2304336	39.69	8.77
1	C. 74	10.800	230214	2315590	10.26	9.69
2	Tahdzibichén	11.425	229594	2313338	10.54	9.91
3	Molas	10.039	226549	2303900	9.37	8.78
4	Molas	10.000	226988	2303755	9.18	8.82

Pozo	Ubicación	COTA DEL POZOS (msnm)	X	Y	Profundidad del pozo (m)	Profundidad a nivel freático(m)
5	Dzoyaxché	14.100	230308	2300865	12.73	12.17
6	Yaxnic	13.150	227313	2301314	11.81	11.04
7	Dzununcán	10.565	224084	2312125	9.10	8.87
8	San José Tzal	9.832	223116	2304869	8.83	8.00
9	Petac	12.155	223011	2298929	10.61	10.14
10	Tzacalá	12.200	223747	2296883	10.55	9.77
12	San Ignacio Tesip	10.926	228225	2306836	9.56	9.13
14	Itzincab	15.050	233403	2296754	13.71	13.13
15	Timucuy	13.680	237956	2304471	12.35	11.73
16	Oxtanpacab	13.780	239427	2298568	15.20	12.91
17	Subinkankab	12.409	237716	2307549	11.06	10.55
18	San Antonio Tehuitz	11.500	237740	2313036	10.77	9.96

Tabla 3.3. Perfil litológico de los pozos de extracción de la planta Mérida I (Palacios 2013).

Profundidad (m)	Espesor (m)	Perfil	Descripción Litológica
0.00 – 0.60	0.60		Material de relleno
0.60 – 4.00	3.40		Roca caliza dura, crema claro con tonalidades ocre, fosilífera, fracturada al inicio del estrato
4.00 – 8.00	4.00	 	Areniscas calcáreas, de color crema, intercalaciones de material de menor y mayor dureza, presencias de lentes delgadas de arcillas, poco fosilífera.
8.00 – 15.00	7.00	  	Areniscas calcáreas color crema, aumenta el contenido de fósiles hace la base del estrato.
15.00 – 20.00	5.00		Roca caliza media, matriz arenosa, al final del estrato se presenta material arcilloso. La presencia de conchas disminuye gradualmente hacia la base del estrato.
20.00 – 25.00	5.00		Areniscas calcáreas color crema, aumenta el contenido de fósiles hace la base del estrato. Se presenta material arcilloso con posiblemente alojado en oquedades
25.00 – 28.00	3.00		Roca caliza media, matriz arenosa, al final del estrato se presenta material arcilloso.
28.00 – 34.00	6.00		Areniscas calcáreas color crema, aumenta el contenido de fósiles hace la base del estrato
34.00 – 42.00	8.00 (Sin conocer el límite)	 	Roca caliza media, color crema, con intercalaciones de arcilla café rojizo, y clastos oxidados

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1. Generación de información mediante los trabajos de campo para determinar los parámetros hidrogeológicos, hidrogeoquímicos y las variaciones piezométricas

4.1.1. Generación de la información hidrogeológica

Es importante la generación de la información con respecto a los parámetros hidrogeológicos, las características hidrogeoquímicas y las direcciones del flujo preferencial del sitio de estudio, ya que permite la obtención de información lo más asertiva posible y brinda resultados acordes y específicos a la zona de estudio. Esta información permitió que al aplicar diferentes metodologías para la delimitación de PPP, se puedan utilizar parámetros más cercanos a la realidad del acuífero y de esta manera establecer programas específicos para mejorar el manejo y la gestión del recurso hídrico de la zona de estudio.

Perforación de pozos de observación

Para la generación de la información conducente al conocimiento de las propiedades hidrogeológicas del acuífero, se perforaron cinco pozos de observación (40 metros) en la Planta de Abastecimiento Mérida I (Tabla 3.2 y Figura 4.1.).

Selección de pozos para medición del nivel del agua

En esta etapa, para el estudio de la variación de los niveles freáticos, se utilizaron cinco pozos de observación (J2A, J3, J7, J21, J22) ubicados dentro de Planta Mérida I y los pozos someros distribuidos en las localidades ubicadas en los alrededores de la zona de captación (Tabla 3.2 y Figura 4.1.).

Como parte del trabajo de campo, se realizó un levantamiento topográfico con un error menor a 3 mm. De Octubre del 2012 a Mayo del 2014, se midieron las profundidades al nivel freático de los pozos de observación de la Planta Mérida I y en los pozos someros que se encuentran en las poblaciones aledañas a la Mérida I.

Las mediciones de niveles freáticos en régimen estático se realizaron con un piezómetro marca Solinst Modelo 101 a intervalos de tiempo de 15 días, aproximadamente. Se determinaron las variaciones del nivel freático en épocas de estiaje y de lluvias.

Los datos de precipitación reportados en la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán se utilizaron para definir las épocas de lluvias y estiaje, identificándose los meses con precipitación mensual menor a 60 mm como correspondientes a la época de estiaje y mayor a este valor, como época de lluvias, de acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen (Gobierno de Navarra 2012). De acuerdo a este criterio, el periodo comprendido entre los meses de Noviembre a Abril se estableció como época de estiaje y del mes de Mayo a Octubre como época de lluvias.

Los valores de los potenciales hidráulicos se calcularon a través de la diferencia entre la cota del nivel topográfico y la lectura del nivel freático en régimen estático para los dos periodos de tiempo mencionados.

Determinados los potenciales hidráulicos, se obtuvieron los promedios para cada pozo de monitoreo y se procedió a elaborar una base de datos (Excel) que fue utilizada en el software SURFER (2002) para generar los gráficos de la dirección

preferencial del flujo subterráneo, por medio del análisis de los datos espaciales de los potenciales hidráulicos tanto para la época de lluvias como para la de estiaje.

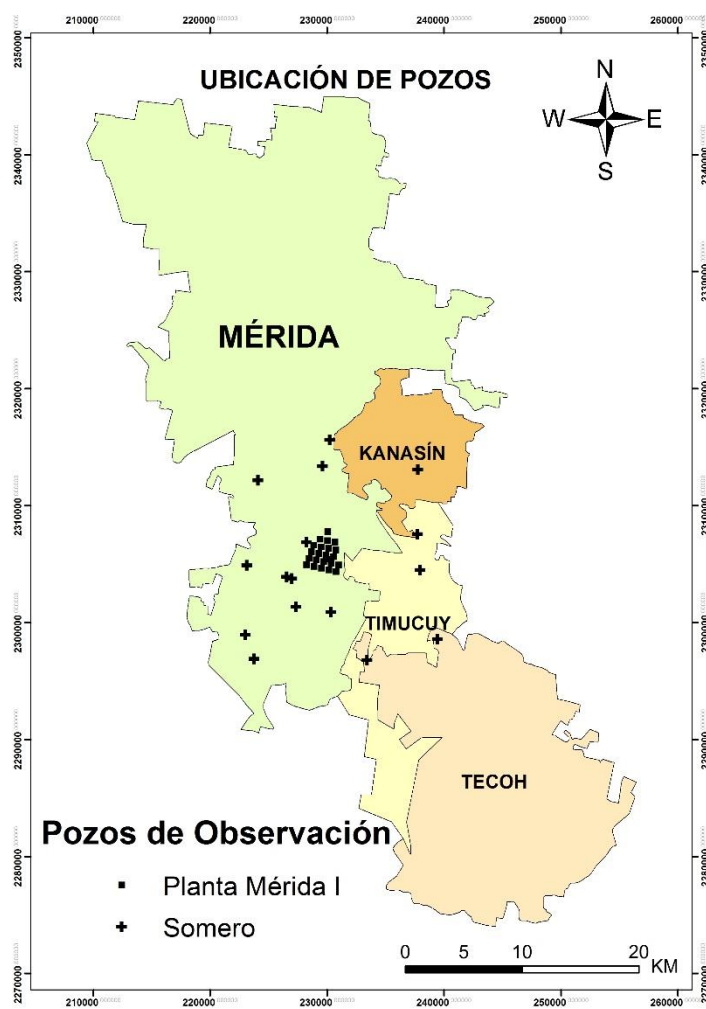


Figura 4.1. Ubicación de los pozos de observación en el área de estudio

Pozos para muestreo de agua

Los muestreos para determinar las características físico-químicas del agua subterránea se llevaron a cabo en los 24 pozos de abastecimiento de la planta Mérida I. Se determinaron parámetros de campo: temperatura, pH y conductividad eléctrica, para conocer las características al momento del muestreo; así como los elementos mayores.

Los análisis químicos (elementos mayores) que se realizaron a las muestras de agua colectadas fueron: alcalinidad, dureza total, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, nitratos, sodio y potasio.

Todos los análisis químicos se realizaron siguiendo las técnicas del Standard Methods (APHA, AWWA, WEF 1992). Cabe mencionar que los nitratos fueron utilizados como el principal parámetro químico con relación a los PPP debido a sus impactos potenciales en la salud humana y es un indicador de contaminación antrópica.

4.1.2. Evaluación del riesgo a la salud por nitratos en aguas de consumo

La evaluación de riesgo a la salud, consistió en determinar el riesgo que enfrenta la población por estar expuesta al contenido de nitratos en las aguas subterráneas utilizadas para abastecimiento público. La caracterización del riesgo consiste en determinar el Cociente de Peligrosidad (CP), que es un indicador del riesgo existente por el consumo de una sustancia en particular. Entre más alto sea este factor, mayor será el riesgo individual de desarrollar un efecto adverso. La Agencia de Protección al Ambiente (USEPA, por sus siglas en inglés) denomina Cociente de Peligrosidad a esta relación (Díaz 1999). El CP se determina teniendo en cuenta la dosis ingerida (D_i) y la dosis de referencia (DdR) (Ecuación 1); esta última, se define como la concentración de una sustancia por debajo de la cual no existen efectos toxicológicos sobre el individuo en un determinado periodo.

$$CP \text{ (Cociente de peligrosidad)} = \frac{\text{Dosis ingerida}(mg / kg \bullet d)}{\text{Dosis de referencia}(mg / kg \bullet d)} \quad \text{Ecuación 1}$$

La dosis ingerida de una sustancia se calcula a través de la Ecuación 2 (USEPA, 2001):

$$D_i = \frac{C \cdot I \cdot FE \cdot DE}{PC \cdot TP} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde:

C: Concentración de la sustancia peligrosa en agua (en mg/l)

I: Tasa de ingesta diaria de la sustancia (en l/día)

FE: Frecuencia de la exposición (en días/año)

DE: Duración de la exposición (en años)

PC: Peso corporal de la persona expuesta (en kg)

TP: Tiempo promedio (DE * 365 días/año).

Para la aplicación de la Ecuación 2, se utilizó como duración de exposición (DE) el tiempo de apertura del sistema de abastecimiento y una frecuencia de exposición de 365 días, por lo que al dividirlo entre el tiempo promedio, el cociente resultaba con un valor unitario lo cual permitió aplicar la Ecuación 3 que simplifica la Ecuación 2:

$$D_i = \frac{C \cdot I}{PC} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para el cálculo de los CP, se consideraron para los escenarios correspondientes a adultos y a lactantes, los valores de ingesta diaria de agua (I) de 2 y 0.64 l, y pesos corporales (PC) de 70 y 4 kg, respectivamente; y la dosis de referencia (DdR) fue de 1.6 mg/l N-NO₃⁻, equivalente a 7.088 mg/l NO₃⁻. Si el valor de este cociente es igual o excede la unidad, existe un nivel de riesgo por efecto tóxico no carcinogénico que debe de ser atendido de manera prioritaria (USEPA 2013).

4.2. Análisis e implementación de la información recopilada y generada para calcular los Perímetros de Protección de Pozos (PPP)

Se realizó un análisis de un conjunto de métodos empleados para la delimitación de perímetros de protección y se implementaron los métodos más apropiados de acuerdo a las características del área de estudio, a los requisitos, limitaciones y datos necesarios.

Los métodos seleccionados fueron:

4.2.1. Método de radio arbitrario (Zona I)

Es un método fácil de aplicar y generalmente de bajo costo. El radio arbitrario, consistió en determinar una distancia alrededor del pozo, la cual se utilizará para definir la zona de prevención de accidentes alrededor del pozo en todo tipo de acuíferos y condiciones de flujo (CNA 2007). Este método consiste en determinar distancias de acuerdo a las regulaciones del lugar en que se desea aplicar el método.

En esta etapa se realizó una revisión bibliográfica a nivel internacional, nacional y local, para conocer las leyes y normas técnicas, que establezcan la distancia a respetar para las características de los acuíferos presentes en los diferentes países. Esto con la finalidad de asegurar la existencia de alguna norma que defina la distancia arbitraria de protección que debe respetarse para la protección inmediata de los pozos en las zonas de captación. Al respecto, se muestran en la Tabla 3.1., los valores considerados para el radio arbitrario (Zona I) en diferentes países, no encontrándose alguna norma para dicha distancia en la legislación nacional y local. Es importante regular y delimitar los perímetros de protección con la finalidad de proteger las fuentes de captación de agua, estableciendo zonas a corto y largo plazo. En la Tabla 3.1., se corrobora la falta de normas técnicas que regulen los acuíferos kársticos en México, siendo lo más cercano para la regulación de las zonas de captación de agua, lo establecido por el Banco Mundial para Latinoamérica, que

establece una distancia de 20 metros para proteger la Zona I, la cual no es específica para acuíferos kársticos. Esta situación, remarca la importancia de establecer una metodología que permita obtener los perímetros de protección para el caso específico de un acuífero con las características de la Península de Yucatán.

Tabla 4.1. Características a considerar para la delimitación de la zona I de PPP en diferentes países (Martínez y García, 2003).

País	Tipo de acuífero	Distancia	Observaciones
		Zona I	
Alemania	Porosidad Intragranular	20 m	Estándar W 101
	Medio Kárstico	> 30 m	
Francia		10 – 20 m	No está regulado
Reino Unido		50 m	t= tiempo de tránsito (días)
		t= 50 d	
Irlanda		300 m	
Bélgica	R. Flamenca	20 m	Ley federal relativa a protección de aguas, 1971
	R. Valona	t= 1 d Zona de toma de agua	
	R. de Bruselas	10 – 30 m	
Holanda	Porosidad Intragranular	10 – 150 m	Área de captación (extracción)
	Medio Kárstico	t= 50 – 60 d t= 50 – 60 d	Ley de protección del suelo, 1996.
			Ley de gestión medioambiental, 1993
Italia		10 m	Distancia mínima
Portugal	Carbonatado	60 m	Decreto-Ley No. 382/99

País	Tipo de acuífero	Distancia	Observaciones
		Zona I	
Dinamarca		r =10 m (alrededor del pozo)	Ley consolidada de abastecimiento de agua, 1999.
		r = 300 m (protección higiénica)	Ley consolidada de protección medioambiental, 1997.
Suiza		400 m ²	Máximo 20*20 m Ley de protección de las aguas, 1991.
Estados Unidos		30 m	
Canadá		> 30 m	Q < 75 m ³ /d
		Valla de 1.8 m	Q > 75 m ³ /d
Australia		r = 500 m	r = radio
Banco Mundial	Latinoamérica	20 m	

4.2.2. Método de radio fijo calculado (Zona I y II)

Este método se encuentra listado dentro del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la CNA (2007) y está enfocado a la Delimitación de zonas de Protección de pozos para agua en México. Éste es utilizado para determinar áreas circulares definidas por el tiempo que demorará en llegar al pozo en cuestión el agua subterránea con base en el tiempo de tránsito al pozo. La expresión que determina el radio fijo calculado es:

$$r = FS * \sqrt{\frac{Q*t}{n*H*\pi}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

r : Radio fijo calculado (m)

FS : Factor de Seguridad (1.3 cuando se conocen bien todos los parámetros, 1.5 cuando hay incerteza en algún parámetro)

Q : Tasa de bombeo ($\text{m}^3/\text{año}$)

t : Tiempo de tránsito elegido

n : Porosidad del acuífero

H : Longitud de las cribas

π : 3.141593

Los datos necesarios para resolver la expresión en el presente sitio de estudio, fueron obtenidos durante las pruebas de bombeo para los diferentes pozos de observación (Ayora 2012). Cabe mencionar que para los cálculos se utilizaron los gastos correspondientes a la máxima frecuencia de bombeo.

La porosidad (n), con un valor del 35%, se consideró para la zona de estudio con base en los resultados de: a) un estudio realizado por la British Geological Survey, mediante diversos sondeos en la ciudad de Mérida y en el cual se determinó que la porosidad tiene valores de 0.4 al 55.0 % (Brewerton 1993) y b) González (2005), quién propuso una porosidad del 35% como resultado de pruebas realizadas en el laboratorio.

El tiempo de tránsito elegido fue de 1, 5, 10 días y 5 años, con la finalidad de conocer los radios para diferentes tiempos (inmediatos y a largo plazo). De acuerdo a la fórmula presentada, se obtuvieron los radios fijos calculados para los pozos de observación.

En la Tabla 4.2., se observa dentro de los datos de partida, que el Gasto (Q) fue utilizado en $\text{m}^3/\text{año}$ y el Factor de Seguridad (FS) considerado fue de 1.5. A pesar de que los datos obtenidos son confiables, se utilizó el FS debido al grado de incertidumbre que generan las características kársticas del acuífero en el que se realizó el estudio. La longitud de cribas (H), expresada en metros corresponde a un valor de 31 metros, de acuerdo al diseño constructivo de los pozos de observación de la Mérida I (Comunicación personal).

Tabla 4.2. Datos para el cálculo de radio fijo calculado con FS= 1.5 para los pozos de observación ubicados en la Planta Mérida I.

PÁRAMETROS	POZOS DE EXTRACCIÓN		POZOS DE OBSERVACIÓN				
	1	18	2A	3	7	21	22
Q= M ³ / AÑO	1734480	1702944	2049840	1955232	2081376	2081376	1923696
FS= 1.3-1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
N= %	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
H=M	31	31	31	31	31	31	31
$\pi = 3.1416$	3.1416	3.1416	3.1416	3.1416	3.1416	3.1416	3.1416

4.2.3. Uso del software WhAEM2000

El software WhAEM2000 se adquirió de manera gratuita de la página de internet de la United State Geological Survey (USGS) y se utilizó como una herramienta para establecer los perímetros de protección y delimitar las zonas de protección.

Delimitación del área de protección: Zona I

Radio Arbitrario Criterio Distancia

Para la aplicación de este método se procedió a la ubicación, por medio de coordenadas UTM de los pozos de extracción 1 y 18 (ubicados en los límites de la Mérida I), así como de los 5 pozos de observación. Se capturó el radio seleccionado, de acuerdo al resultado obtenido del análisis de la revisión bibliográfica con base en las características del área. Con los pozos ubicados y el radio asignado para cada uno, se formó una red para definir el área de delimitación; finalmente se dibujó a través del WhAEM2000 el área de protección que incluyera los radios de todos los pozos de la Mérida I.

Delimitación del área de protección: Zona II

Se aplicaron dos opciones:

Radio Fijo Calculado con punto central de bombeo (Método de Recarga)

La Ecuación 5, es la que se aplica para calcular el radio a través del método de recarga (WhAEM2000):

$$R = \sqrt{\frac{Q}{(\pi)(N)}} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde:

Q= Gasto (m³/día)

N= Recarga (m/día)

$\pi = 3.1416$

Habiendo recopilado la información necesaria que fue generada en trabajo de campo, se estableció Q= 103,680 m³/d (Q=1200 lps) para los 24 pozos de la Planta Mérida I y la recarga N=0.00027 m/d (Pacheco *et al.* 2004), con los cuales se calculó el radio fijo por el método de recarga para un tiempo infinito.

$$R = \sqrt{\frac{103680 \text{ m}^3/\text{d}}{(\pi)(0.00027 \text{ m}/\text{d})}}$$

Para este método fue necesario establecer un punto central de bombeo, el cual representó el campo de pozos (24 pozos). Una vez ubicadas las coordenadas UTM del punto central bombeo, se capturó el radio calculado por el método de recarga, el cual es representado en el software por un círculo alrededor del pozo. Se procedió a dibujar la delimitación del área de protección a través del software WhAEM2000.

**Radio Fijo Calculado con punto central de bombeo (Método Volumétrico):
Zonas I y II**

La Ecuación 6, se utilizó para calcular el radio a través del método volumétrico de acuerdo al WhAEM2000:

$$R = \sqrt{\frac{(Q)(t)}{(n)(\pi)(II)}} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde:

Q= Gasto (m³/día)

t: tiempo (día)

n= Porosidad (adimensional)

$\pi = 3.1416$

II= Espesor de agua dulce del área de estudio

Para la aplicación de esta fórmula se consideraron los siguientes valores, Q= 103,680 m³/d (con base en Q=1200 lps, para cada uno de los 24 pozos de la Planta Mérida I), t = 10 días (Zona I), porosidad n= 35% y espesor de agua dulce II= 55 m (Palacios 2013), con lo cual se calculó el radio fijo por el método volumétrico de la Zona I, para un tiempo inmediato.

$$R = \sqrt{\frac{(103680m^3/d)(10 d)}{(0.35)(\pi)(55m)}}$$

Con esta misma fórmula se procedió a calcular la Zona II, para el campo de pozos de la Mérida I. La Zona II, fue calculada modificando la variable tiempo en la fórmula, utilizando los mismos datos del apartado anterior y utilizando t = 1825 días (5 años),

con lo cual se calculó el radio fijo por el método volumétrico de la Zona II, para un tiempo a largo plazo.

$$R = \sqrt{\frac{(103680m^3/d)(1825 d)}{(0.35)(\pi)(55m)}}$$

De manera similar al radio fijo calculado por el método de recarga, para el método volumétrico fue necesario establecer un punto central de bombeo representado por un pozo. Para este pozo central se capturó el radio calculado por el método volumétrico para los tiempos de 10 y 1825 días, quedando representados gráficamente en el software las Zonas I y II. Se delineó el área de protección a través del WhAEM2000.

En este procedimiento, se procedió a ingresar los datos necesarios para que el programa calculara a través del método del WHPA los radios de protección para cada uno de los métodos analíticos que incluye el WhAEM2000. Para este método, nuevamente se consideró un pozo de bombeo central, al cual se le ingresaron los datos de: porosidad, espesor del acuífero y el tiempo de viaje que fue de 10 días (Figura 4.2.) para un corto plazo y 1825 días (5 años) para un largo plazo.

The image shows two screenshots of the WhAEM2000 software interface. The left screenshot displays the 'Calculated WHPA' dialog box with the following input fields: 'Selected Well' set to 'PC', 'Time of Travel' set to '10 days', 'Aquifer Porosity' set to '0.35', 'Aquifer Thickness' set to '55 m', and 'Ambient Flow' set to '0 m^2/day'. Below these fields are 'Continue' and 'Cancel' buttons. The right screenshot shows the same dialog box with the calculated results: 'T = 0 (T < 0.1)' and 'WHPA Radius = 151.14 m'. It also includes 'Draw' and 'Back' buttons, along with 'Continue' and 'Cancel' buttons. Both screenshots include an 'Explanation' section at the bottom stating: 'This can only be done for one well at a time. Based on the data, a dimensionless travel time parameter T is calculated, used to decide on a centric circle, excentric circle, or pathlines for well in ambient flow.'

Figura 4.2. Ingreso de los datos necesarios para los cálculos en el software WhAEM2000 (corto plazo).

Delimitación de PPP con Flujo uniforme para un Campo de pozos Método Analítico – Zona I y II

El flujo del agua se ve influenciado por diversos factores como puede ser la recarga, la precipitación y el comportamiento según el tipo de acuífero. Para la aplicación del WhAEM2000, se establece que la zona de captura para un pozo con flujo uniforme no es circular, ni centrado al pozo, pero puede ser una forma ovalada en dirección del flujo uniforme.

Con base en lo anterior, para calcular el área de protección se siguió el esquema de la Figura 4.3., variando el tiempo de residencia de la partícula entre 10 días y 1825 días (5 años), de acuerdo a los cálculos presentados con anterioridad. Este proceso permite hacer un comparativo de los radios y las áreas delimitadas obtenidas con los diferentes métodos.

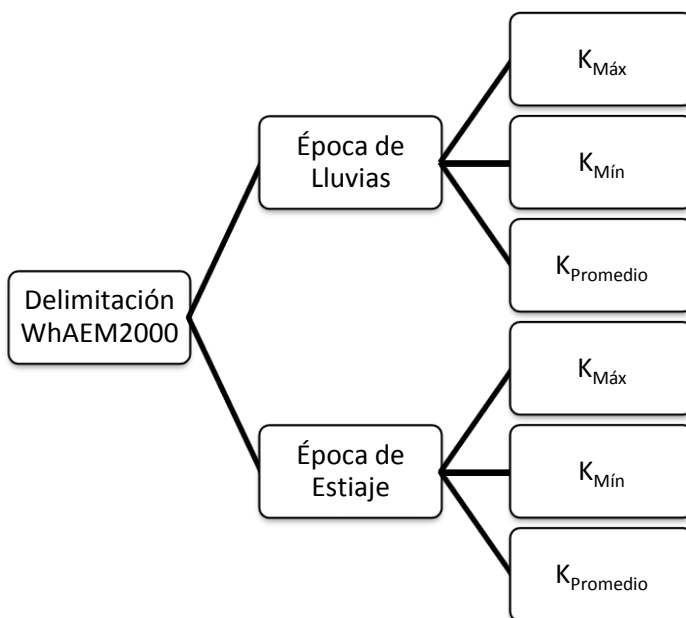


Figura 4.3. Diagrama del flujo para los cálculos en el software WhAEM2000

El software WhAEM2000 utiliza un método analítico para el cálculo de los PPP, y determina la zona de captura de acuerdo a los tiempos de tránsito en sistemas

acuíferos libres o confinados, para lo cual es necesario conocer las características hidrogeológicas del área de estudio.

El procedimiento seguido para la aplicación del software fue el siguiente:

1. Se utilizó una hoja de cálculo disponible en página web de la EPA, creada por el Dr. Jim Weaver (Figura 4.4.), para calcular el gradiente, obtener la dirección de flujo y magnitud del área de estudio, para lo cual se completó la hoja de cálculo con las cargas hidráulicas de los pozos de observación obtenidas mediante el trabajo de campo, en épocas de lluvias y estiaje.

Inputs			
Example Data Set 1	Example Data Set 2	Calculate	Clear
Save Data	Recall Data	Go Back	
Site Name	MERIDA1 ESTIAJE		
Date	6/10/2015	Current Date	
Calculation basis	Head ▼		
Coordinates	m ▼		
I.D.	x-coordinate	y-coordinate	head
1) J2A	229628.49	2306718.93	57.02
2) J3	230022.21	2306986.38	57.01
3) J7	230119.47	2306313.54	56.96
4) J21	230127.35	2304481.77	56.57
5) J22	230763.28	2304332.22	56.69
6)			
7)			
8)			
9)			
10)			

Figura 4.4. Datos ingresados para calcular el gradiente, dirección de flujo y la distancia. Fuente: WhAEM 2000

2. Una vez obtenida la dirección y magnitud se estableció un punto central para el campo de pozos, se anexó un nuevo elemento llamado “flujo uniforme”, al cual se le capturó la elevación, el gradiente y el ángulo (procedimiento realizado para época de lluvias y estiaje con la herramienta antes mencionada).

3. Se ingresaron las propiedades del acuífero estableciendo que la elevación base fue de cero (nivel del mar) y el espesor del acuífero de 55 m (Palacios 2013). Para la conductividad hidráulica, se utilizaron los valores de $K_{Máx}= 1199$ m/d, $K_{Mín}= 287$ m/d y $K_{Promedio}= 651.80$ m/d (Larena 2013) y la porosidad utilizada fue del 35% (González 2005). El tiempo de tránsito de la partícula fue 10 días y 5 años (1825 días), tanto para la época de lluvias como para la de estiaje.

Finalmente, el número de iteraciones realizadas para la resolución del modelo analítico fue 20 (Figura 4.5.). Se capturaron los datos para los 5 pozos de observación, utilizados por el software como pozos de prueba. Estos pozos se ubicaron por medio de coordenadas UTM y se alimentó el software con la carga hidráulica obtenida sumándole el espesor del agua dulce. Con base en las cargas hidráulicas de los pozos que fueron usados como puntos de pruebas para el cálculo, se determinaron las isopiezas de 56 a 58 metros sobre el nivel del mar.

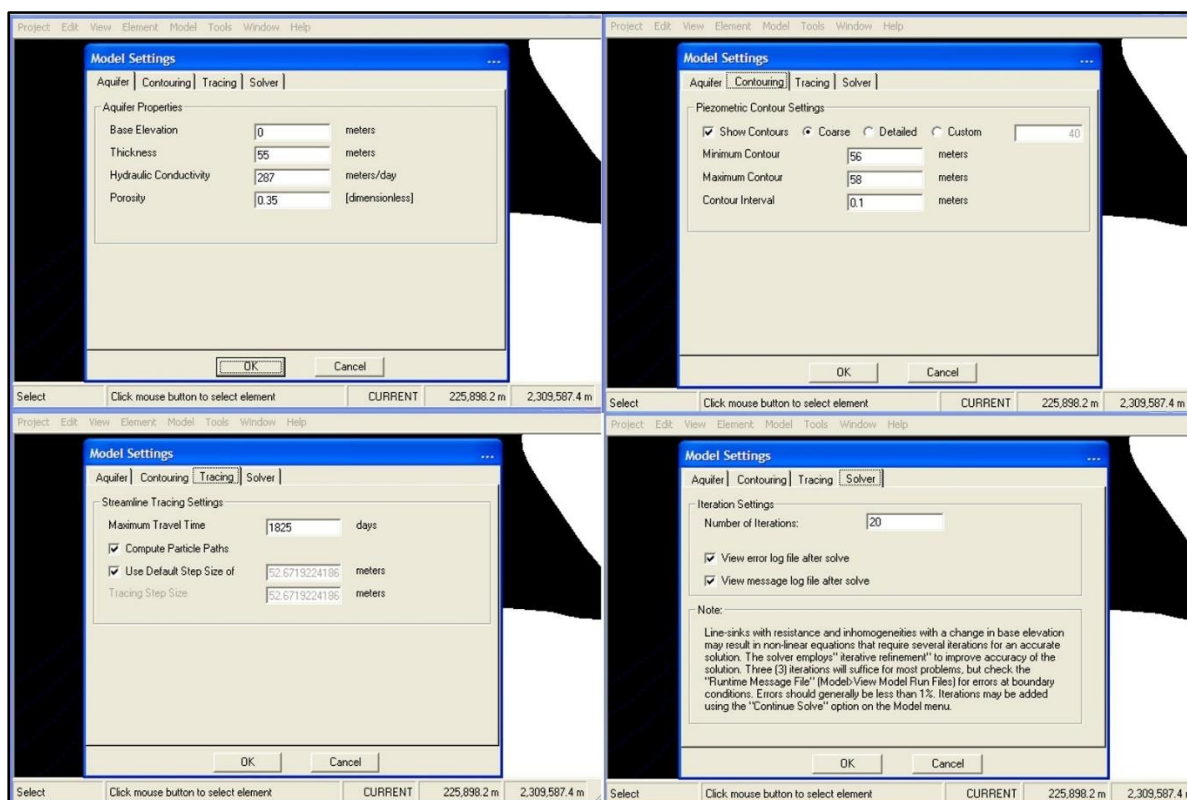


Figura 4.5. Vistas del Software WhAEM para las propiedades del acuífero
Fuente: WhAEM (2000).

4. Con estos datos introducidos al software WhAEM se resuelve analíticamente el problema y se obtienen las diferentes zonas de protección, con las diferentes consideraciones para la conductividad hidráulica, épocas de lluvias y estiaje, así como los tiempos de tránsito de la partícula de 10 días y 1825 días (5 años).

5. Delimitadas las diferentes zonas de protección por el método analítico como se señala en el párrafo anterior, se identificaron las distancias extremas en dirección al eje X y Y a través de las coordenadas UTM. De las distancias obtenidas en ambas direcciones (X y Y) se seleccionó la de mayor valor, la cual se definió como el diámetro de la zona de protección siendo necesario dividirlo entre dos para obtener el radio de la zona de protección y de esta manera, realizar las comparaciones de los resultados de este método con los otros métodos implementados.

4.3. Selección del PPP de un sistema de pozos en un acuífero kárstico.

En esta etapa se presentó la cartografía generada para la delimitación de los perímetros de protección para la zona de estudio, los cuales mostraron las áreas a proteger de acuerdo al método implementado.

Se efectuó el análisis de los métodos empleados para la delimitación de perímetros de protección de la zona de estudio, realizándose un cuadro descriptivo en el que se incluyó el método, las ventajas y desventajas de los métodos implementados con los datos de campo.

De igual manera, se analizaron las distancias obtenidas a través de la implementación de los diferentes métodos, buscando similitudes entre las distancias obtenidas para delimitar la zona de protección. De acuerdo con el análisis de los radios obtenidos y tomando en cuenta que los métodos se calcularon con diferentes variables, se seleccionó el método que fue calculado con las condiciones más desfavorables ($K_{Máx}$ y época de lluvias). Finalmente, se proponen dos métodos con base en la similitud de los radios obtenidos. Estos dos métodos utilizaron diferentes

datos para obtener el radio de protección, diferenciándose principalmente en la cantidad de información necesaria para realizar el cálculo. Por lo que es posible realizar una recomendación basada en el costo y tiempo para la delimitación de PPP en zonas kársticas.

4.4. Determinación del riesgo a la contaminación del agua que subyace el área de estudio

Para la determinación del riesgo a la contaminación del agua que subyace a la zona de estudio, se seleccionaron los municipios de Conkal, Kanasín, Mérida, Progreso, Ucú y Umán, que conforman la Zona Metropolitana de la ciudad de Mérida (ZMM) () y se anexaron los municipios de Timucuy y Tecoh, debido a que en estos municipios se ubicaron algunos de los pozos que fueron muestreados.

4.4.1. Vulnerabilidad por el método COP para la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM) y municipios anexos

El método COP para la obtención de la vulnerabilidad intrínseca en medios kársticos fue desarrollado por el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, dentro de la Acción Europea (European Communities 2004), COST 620. El método se basa en la obtención del índice COP (por sus siglas en inglés) en función producto de tres factores (Vías *et al.* 2006); el factor C, se refiere a la concentración del flujo, O es la protección del agua subterránea (estratos suprayacentes) y el factor P, es la precipitación.

De los datos los índices de la vulnerabilidad COP obtenidos por Sosa en el 2014, se seleccionaron los correspondientes a los municipios que integran la ZMM y los municipios anexos mencionados, para generar una base de datos georreferenciada, que posteriormente fue utilizada en la elaboración del mapa de vulnerabilidad COP para los municipios, a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

4.4.2. Amenazas con respecto a la carga de Nitrógeno para la ZMM y municipios anexos

En el acuífero kárstico del estado de Yucatán se han identificado altas concentraciones de contaminación por nitrógeno en forma de nitratos, como se concluyó a través de la revisión de investigaciones anteriores que reportaban la presencia de contaminación por este ion en diferentes zonas del estado de Yucatán (Pacheco y Cabrera 1997 y Graniel *et al.* 1999). En el marco de la presente investigación, se obtuvo el mapa de distribución espacial de las concentraciones de nitratos para los muestreos de nitratos de los años 2012 y 2013, el cual mostró la presencia de altas concentraciones de este ion en la parte central de la ciudad de Mérida considerando que la presencia de nitratos en las fuentes de abastecimiento representa un riesgo a la salud humana (Rojas *et al.* 2015).

Con base en lo anterior, se evidencia la importancia de conocer la cantidad de nitrógeno aportada por las diferentes actividades humanas en la zona de estudio, con la finalidad de obtener la peligrosidad o amenaza de contaminación del agua subterránea ocasionada por la carga de nitrógeno.

La obtención del mapa de amenazas se efectuó realizando la recopilación de la cantidad de nitrógeno utilizada o producida a través de las diferentes actividades antropogénicas para los municipios seleccionados (Eúan 2012). Se obtuvieron las cantidades de nitrógeno utilizadas para la agricultura y las generadas a través de la producción de aves y cerdos, fosas sépticas y residuos sólidos. Estas cantidades de nitrógeno fueron capturadas en una base de datos de Excel para obtener la carga total de nitrógeno para cada municipio en función de las diferentes actividades. Esta cantidad se anexó a una base de datos con la que se generó, en un SIG; el mapa de peligrosidad debido a la carga de nitrógeno para el sitio de estudio.

4.4.3. Riesgo a la contaminación para la ZMM y municipios anexos

Los mapas de vulnerabilidad y amenazas con respecto al nitrógeno, se conjuntaron por medio de un SIG, para la obtención del mapa de riesgo a la contaminación. Elaborado el mapa se interpretaron los resultados.

4.5. Elaboración de un plan de manejo para la protección del recurso hídrico en un acuífero kárstico.

La elaboración de un plan de manejo para la protección del recurso hídrico, se basa en medidas técnicas y legales. Como primer paso, se revisó la ordenación de uso de suelo en la zona de estudio y sus alrededores, lo cual permitió identificar de manera general las actividades que se realizan.

Posteriormente, con el resultado de la delimitación de perímetros de protección de pozos para el área de estudio (acuífero kárstico), se estableció un radio de protección y se generó la cartografía que plasmó la delimitación del área a proteger. Con la finalidad de realizar un estudio integral para la propuesta de un PPP para la Mérida I, se generó un mapa de riesgo para establecer la caracterización del riesgo a la contaminación del agua subterránea en el área de estudio mostrando el resultado mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica.

Con la información generada, se elaboró una propuesta de Plan de manejo, que refleja los resultados obtenidos para el Perímetro de Protección de Pozos y el Riesgo a la Contaminación para el área seleccionada. Se propondrá su implementación a través de la promulgación de un decreto gubernamental para la ejecución de un Plan de manejo sostenible del recurso hídrico en el área en donde se ubica la Mérida I, principal campo de pozos para el abastecimiento de los habitantes de la ciudad de Mérida. El Plan de manejo que se proponga deberá de contener, de manera enunciativa más no limitativa, los programas de procedimientos, de monitoreo y control, de educación ambiental y de investigación. Con la operación adecuada de estos programas, se mejorará el manejo y la gestión del recurso hídrico en el caso

específico de la planta Mérida I y sus alrededores, que permitirá la conservación y protección del recurso para el abastecimiento en la ciudad de Mérida. El desarrollo y ejecución de los programas establecidos en un plan de manejo permitirán monitorear los resultados a mediano y largo plazo; asimismo, dicho plan deberá evaluarse periódicamente para realizar los ajustes necesarios y podrá replicarse con ciertas adecuaciones a otras áreas de captación del estado de Yucatán.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Parámetros hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos se obtuvieron a través del desarrollo del proyecto denominado “Protección de zonas periféricas y áreas de influencia de los pozos de extracción para el abastecimiento actual de la Zona Metropolitana de Mérida ZMM” a través del proyecto FOMIX-CO07-2009-131955 (Tabla 5.1) y cuyos resultados se presentaron en varios trabajos (Pacheco *et al.* 2004, Larena 2013 & Palacios 2013).

Tabla 5.1. Valores máximos, mínimos y promedios de los parámetros hidráulicos obtenidos en campo para pozos extracción y observación Mérida I.

PARÁMETROS HIDRÁULICOS	K	T	RECARGA	ESPESOR
	(Conductividad hidráulica) (m/d)	(Transmisividad) (m/d)	(m ² /d)	DEL ACUÍFERO (m)
	Larena (2013)		Pacheco <i>et al.</i> (2004)	Palacios (2013)
Valor Máximo	1199	37211	-	-
Valor Mínimo	287	8855	-	-
Promedio	651.8	20152.8	0.00027	55

5.2 Direcciones de flujo del agua subterránea

El levantamiento topográfico realizado en el área de estudio mostró que no se observan grandes elevaciones del terreno. La máxima elevación en el área de estudio es de 14.100 msnm y la mínima es de 9.200 msnm (Figura 5.1).

El análisis de los datos de niveles freáticos medidos de Octubre del 2012 a Mayo del 2014 para los pozos de observación de la Planta Mérida I y los pozos someros que

se encuentran en las poblaciones aledañas a la Planta Mérida I, mostraron un comportamiento similar para las dos temporadas evaluadas (lluvias y estiaje), presentando un flujo preferencial de SW-NE (Figuras 5.2. y 5.3.). Dentro de la zona de captación de la Mérida I, se observó que las curvas presentaron un comportamiento concéntrico el cual se atribuye al alto nivel de extracción de los pozos de la Planta Mérida I.

Esta dirección preferencial mostró similitud con el obtenido para la época de estiaje del periodo de 1998-2000 en esta área y un sentido inverso con respecto a la obtenida para la época de lluvias 1998-2000 en el área estudiada (Pacheco *et al.* 2004) y a la dirección de flujo regional de la Península de Yucatán (SE-NW en el estado de Yucatán) (Perry 2002; Carrillo 2006). Este comportamiento inverso observado se atribuye al análisis local para la dirección de flujo de la zona de estudio y a la cantidad de precipitación pluvial acaecida durante el periodo de estudio, que permiten obtener direcciones de flujo específicas para la zona estudiada.

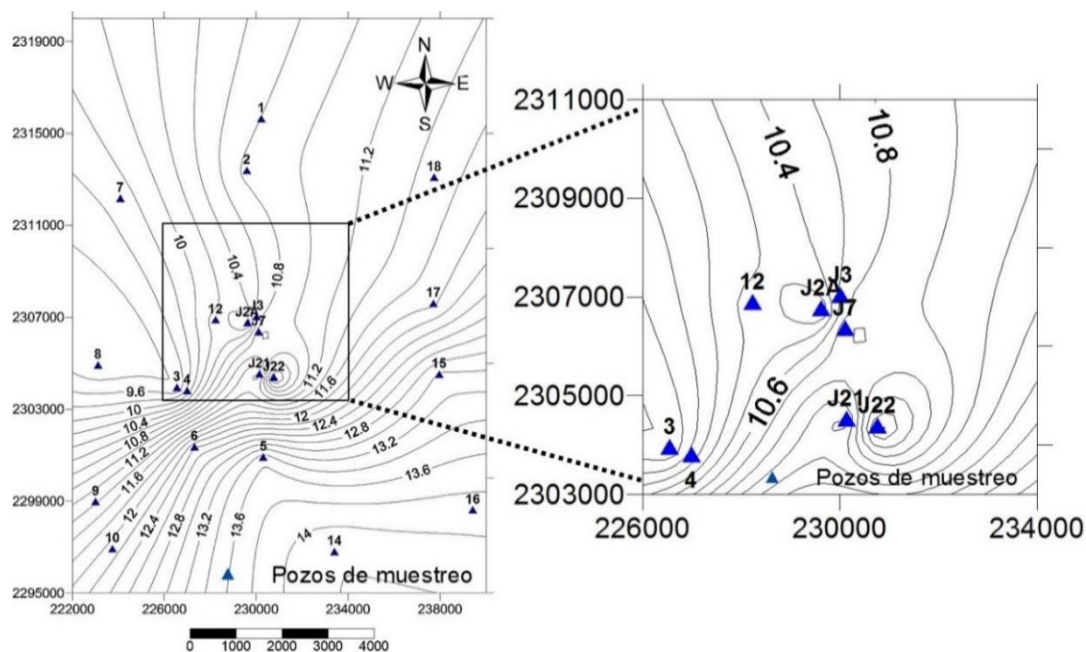


Figura 5.1. Mapa topográfico del área de estudio

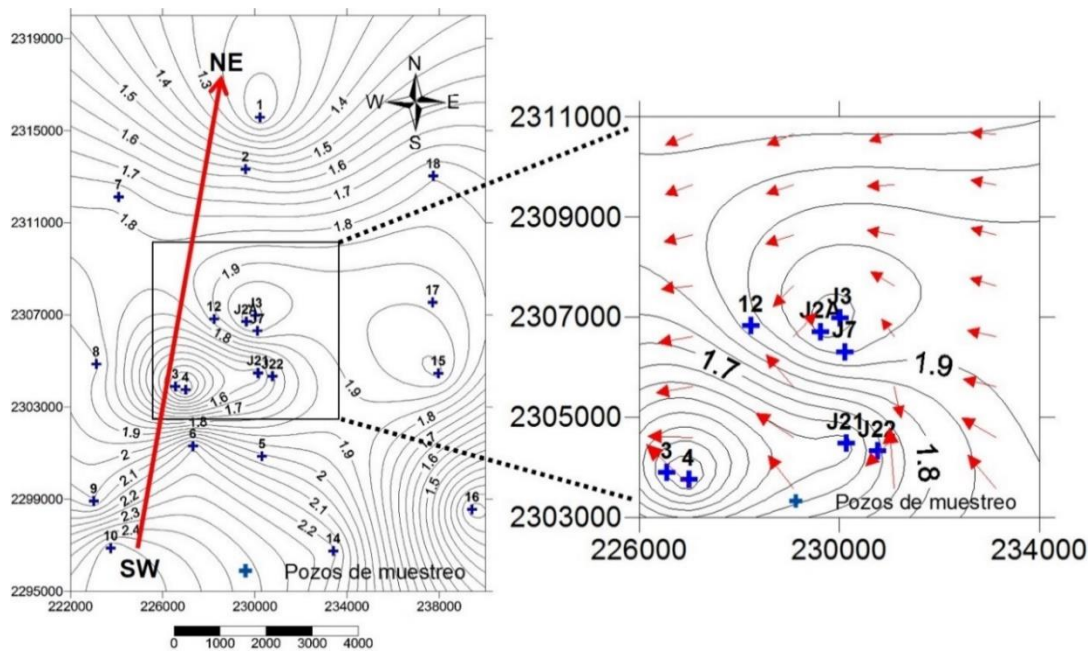


Figura 5.2. Mapa piezométrico (cotas en m.s.n.m) y dirección del flujo para la época de lluvias, 2012-2014.

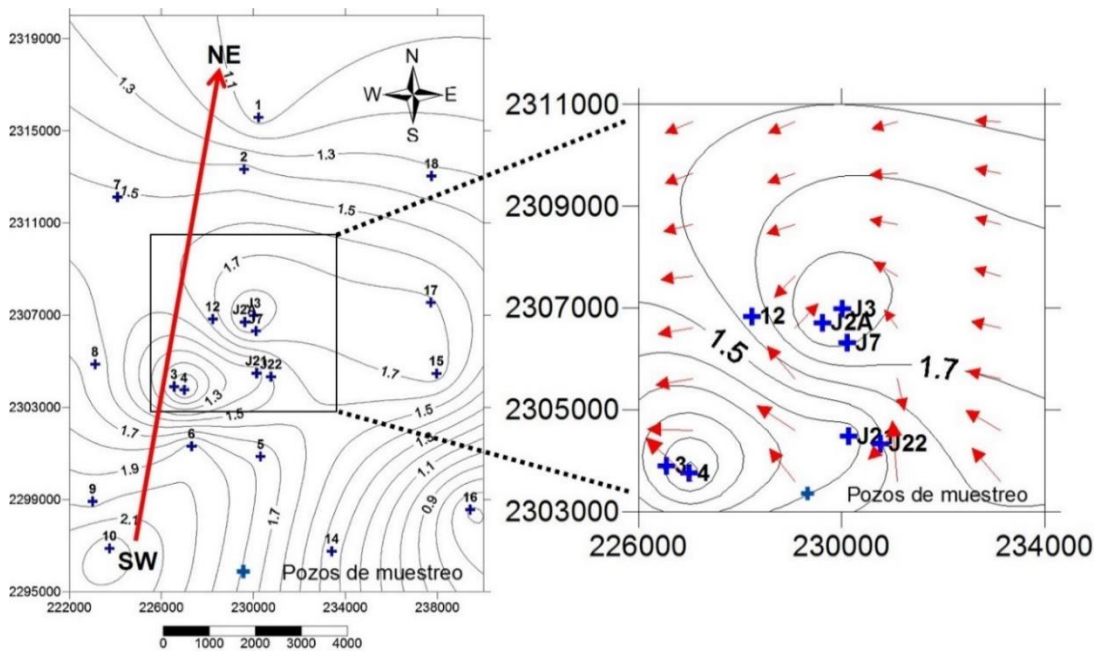


Figura 5.3. Mapa piezométrico (cotas en m.s.n.m) y dirección del flujo para la época de estiaje, 2012-2014.

5.3. Evaluación del riesgo a la salud por nitratos en aguas de consumo

5.3.1. Concentraciones de nitratos en las fuentes de abastecimiento del municipio de Mérida

Los nitratos fueron utilizados como el principal parámetro químico indicador de contaminación antrópica, debido a sus impactos potenciales en la salud humana. Resultado de la evaluación del riesgo a la salud se realizó el mapa de distribución espacial para los nitratos en el municipio de Mérida.

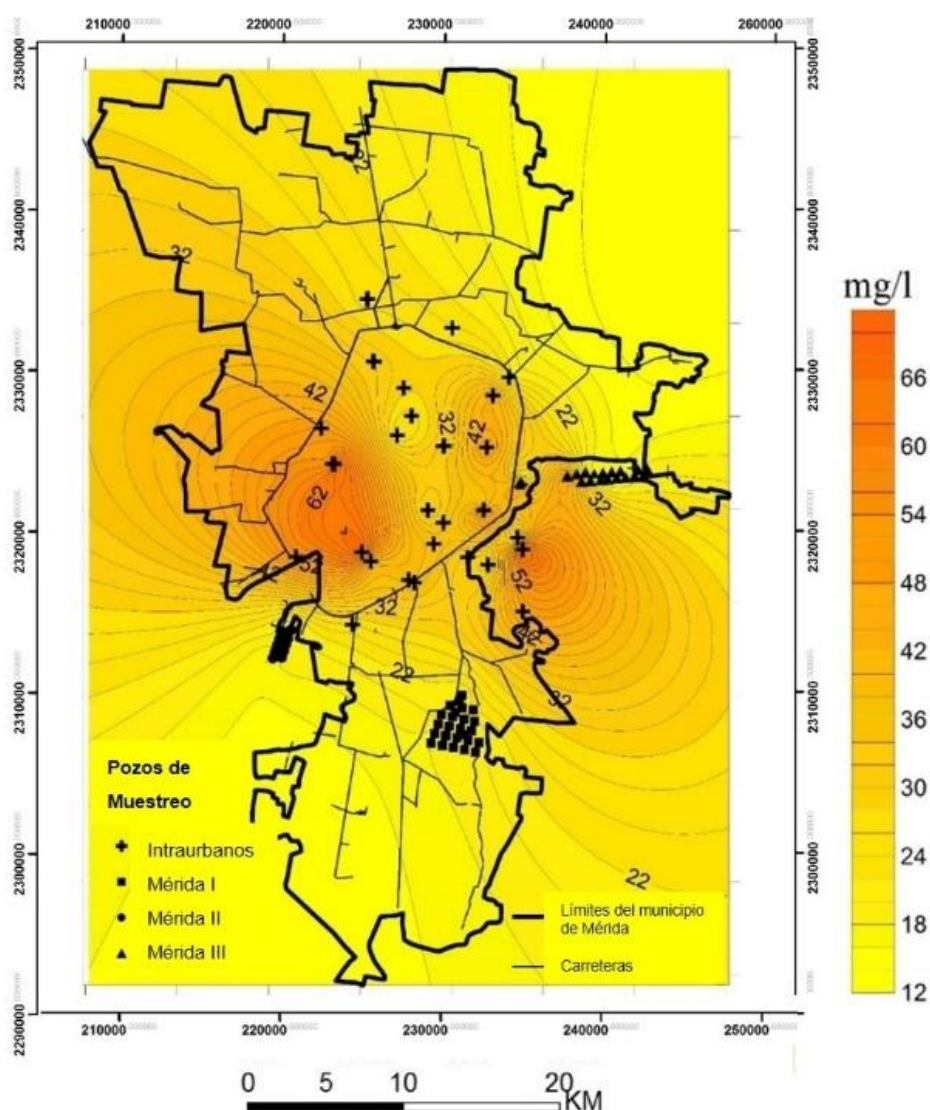


Figura 5.4. Concentración de nitratos (en mg/l) en el área de estudio (2012-2013)

Con respecto a los sistemas de abastecimiento de agua, se observa que algunos de los pozos intraurbanos y el Sistema Mérida II (Figura 5.4) presentaron las concentraciones más elevadas de nitratos, posiblemente como consecuencia de las actividades que se desarrollan en los municipios de Mérida, Umán y Kanasín, que potencialmente aportan nitratos al agua subterránea.

El aporte de nitrógeno debido a las actividades desarrolladas en estos municipios fue reportado por Euán en el 2012. Las zonas localizadas al norte y al sureste del municipio de Mérida mostraron concentraciones más bajas de nitratos lo que se atribuye a que el aporte de nitrógeno reportado como resultado de las actividades (Euán 2012) que se desarrollan en éstos municipios no se considera de impacto debido a que son municipios con poblaciones de pocos habitantes y sus actividades económicas son menores comparadas con los municipios de Mérida, Umán y Kanasín.

5.3.2. Caracterización del riesgo a la salud por nitratos para el agua de consumo en el municipio de Mérida

Los valores del CP calculados para adultos fueron menores que la unidad (Figura 5.5.) por lo que se considera que no existe algún efecto adverso a la salud humana a causa de la contaminación de nitratos, es decir, se encuentra por debajo del límite de seguridad (Bozek et al. 2013; Jamaludin 2013). Sin embargo, se observa que el CP para los lactantes fue superior a la unidad, principalmente en el agua abastecida por el sistema intraurbano (Figura 5.6.).

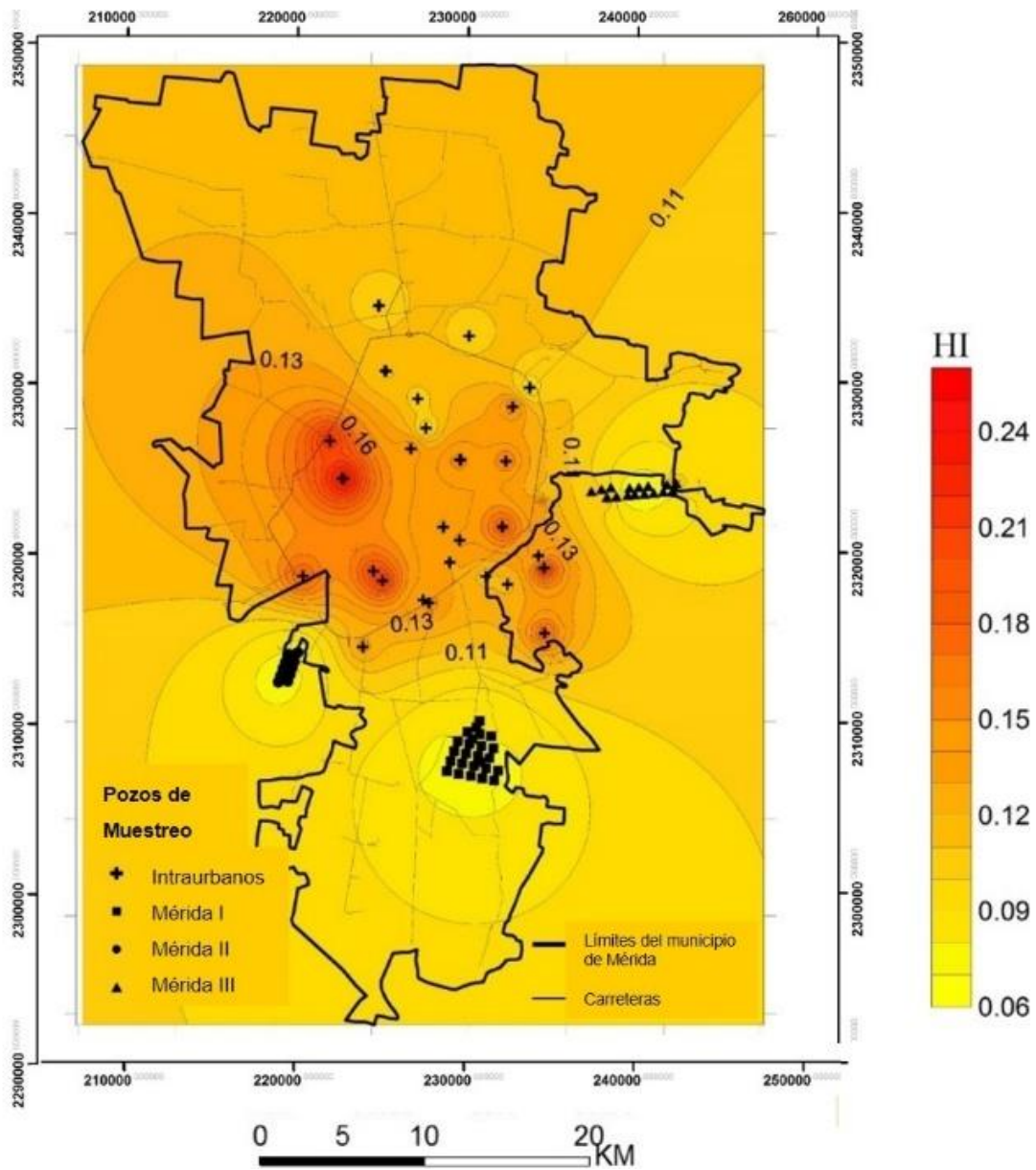


Figura 5.5. Concentración de nitratos (en mg/l) en el área de estudio (2012-2013)

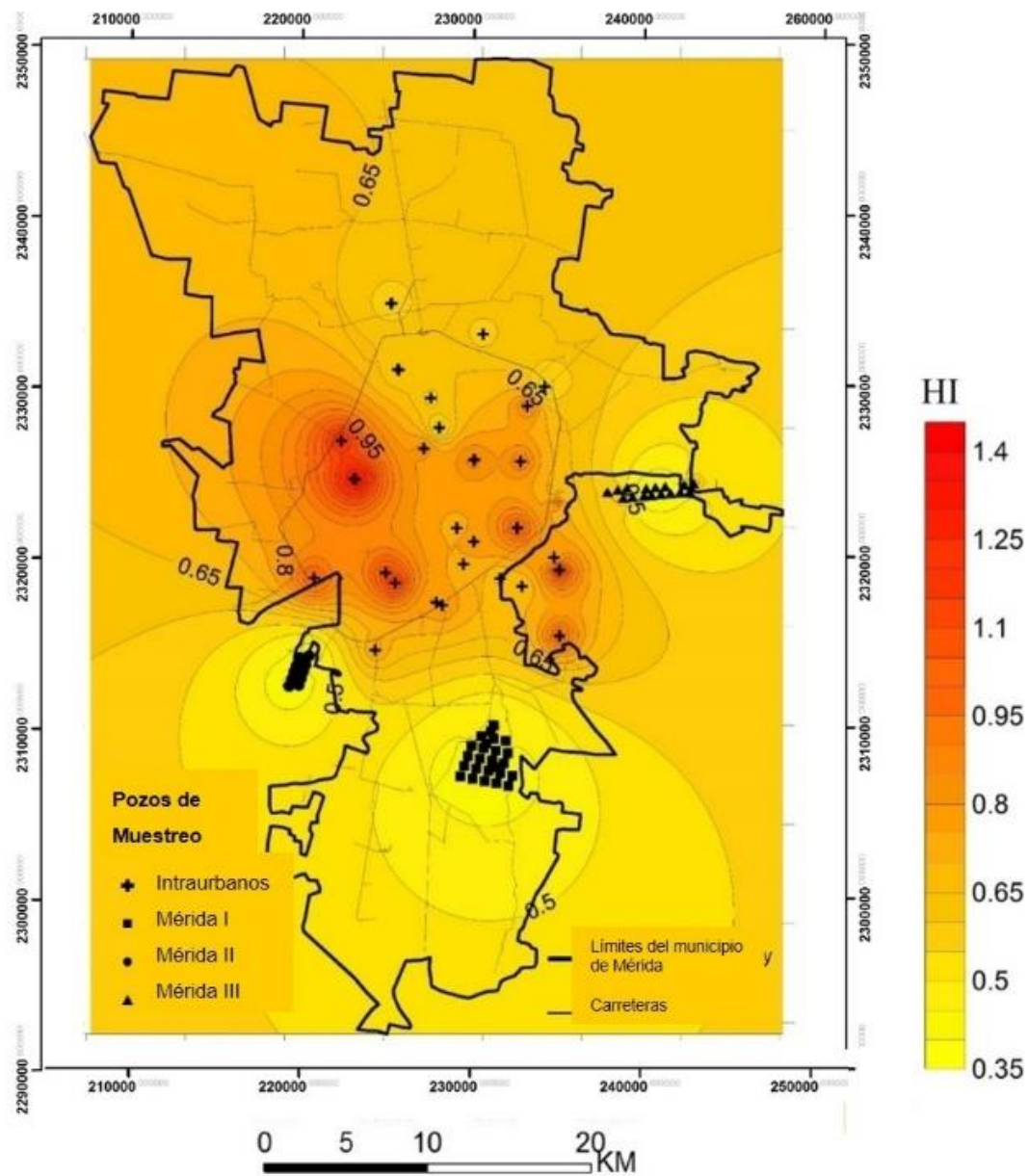


Figura 5.6. Concentración de nitratos (en mg/l) en el área de estudio (2012-2013)

5.4 Perímetros de protección

5.4.1. Radio arbitrario – Zona I

Del análisis bibliográfico realizado con respecto al método de radio arbitrario, a nivel internacional se han encontrado leyes y normas técnicas que establecen la distancia que deberá de respetarse para las características de los acuíferos presentes en sus territorios. Sin embargo, en México y en especial para Yucatán, no se ha establecido la distancia arbitraria de protección que deberá de respetarse para la protección de los pozos en las zonas de captación inmediatas. Se identificaron tres países que cuentan con acuíferos kársticos y/o carbonatados similares a las características del acuífero en la zona de captación Mérida I. Estos países fueron, Alemania que establece una distancia mayor a 30 metros para la Zona I o Zona inmediata, Holanda que para esta misma Zona se enfoca al tiempo de tránsito de 50 a 60 días, y Portugal que establece una distancia de 60 metros (Martínez y García, 2003). Por otra parte, el Banco Mundial publicó en el año 2002 la “Guía para la Protección de la Calidad del Agua Subterránea”, que está dirigido a países de América Latina y el Caribe, en donde se propone una distancia de 20 metros (Foster *et al.* 2001).

Con base en esta información y tomando en cuenta las características kársticas del acuífero se propone que para el caso de la zona de captación de la planta Mérida I, la distancia a establecer para el radio arbitrario deberá ser de 30 metros, como mínimo para la Zona I.

5.4.2. Radio fijo calculado – Zona I y II

En la Tabla 4.1, se presentan los resultados obtenidos para los radios fijos calculados (Ecuación 4 y Tabla 5.2) en los pozos de extracción 1 y 18 (representaban los límites de la Planta Mérida I) y en los pozos de observación 2A, 3, 7, 21 y 22 de la Planta Mérida I. En esta tabla, se reportan los radios obtenidos en condiciones dinámicas para los tiempos inmediatos: 1, 5, 10 días y el periodo, a largo plazo, correspondiente a 5 años.

Tabla 5.2. Radios obtenidos (m) para tiempos 1, 5, 10 días (Zona I) y 5 años (Zona II).

UNIDADES	DISTANCIAS	POZOS DE EXTRACCIÓN		POZOS DE OBSERVACIÓN				
		1	18	2A	3	7	21	22
M	d_1día	18	18	19	19	19	19	19
M	d_5días	40	39	43	42	43	43	42
M	d_10días	56	55	61	59	61	61	59
M	d_5años	757	750	823	803	829	829	797

Comparando los resultados obtenidos para los radios fijos calculados a partir del tiempo de 5 días y el radio arbitrario, se corrobora que la distancia mínima establecida en el radio arbitrario (30 metros) fue superada, por lo cual es necesario establecer que el radio arbitrario nunca deberá de ser menor a 30 metros.

5.4.3. Perímetros de protección de pozos obtenidos con el Software WhAEM2000

a) Delimitación del área de protección Zona I

a.1. Radio arbitrario por el criterio Distancia

El área delimitada es el resultado de establecer la distancia de 30 metros alrededor de dos de los pozos de extracción y los cinco pozos de observación de la zona de abastecimiento. El área en cuestión queda dentro de los límites de la Planta Mérida 1, presentando un área circular con un radio de 2000 metros, tomando como base un punto central de bombeo (Figura 5.7).

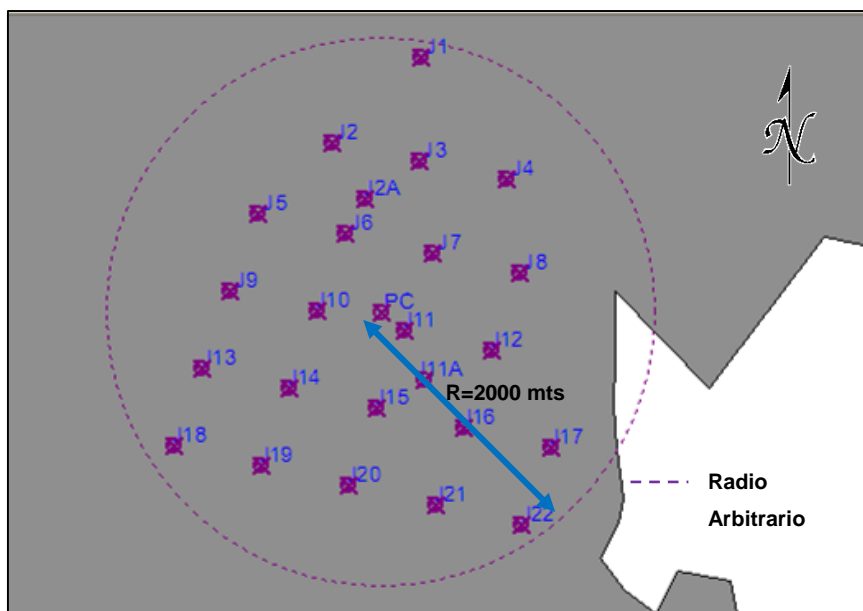


Figura 5.7. Delimitación del área de protección calculada con el Criterio de Distancia (Radio Arbitrario 30 metros-Zona I).

a.2. Método de volumétrico con punto central de bombeo, $t = 10$ días.

El radio fijo calculado por el método volumétrico (Ecuación 6) fue de 130.93 metros para un periodo de residencia de la partícula de 10 días, que se estableció como la delimitación para la Zona I (Figura 5.8.), siendo este valor cercano al obtenido del cálculo del radio de 151.14 metros mediante el software WhAEM2000.

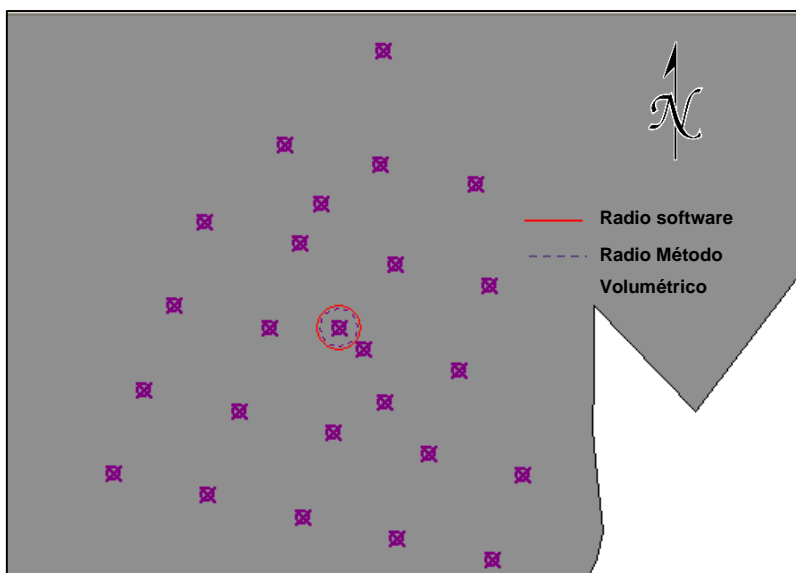


Figura 5.8. Radio fijo calculado por el método volumétrico (10 días, Zona I).

b) Delimitación del área de protección (Zona II).

b.1. Método de Recarga - Radio Fijo Calculado con punto central de bombeo.

En la Figura 5.9., se observa el radio fijo calculado (Ecuación 5) con una distancia de 11055.81 metros, el cual fue establecido de acuerdo a la recarga de la zona de estudio (Pacheco *et al.* 2004) y la fórmula establecida en el Manual del WhAEM (Ecuación 2). El valor obtenido es consecuencia de que para acuíferos libres y kársticos la recarga se da en la superficie total (Marín *et al.* 2004).

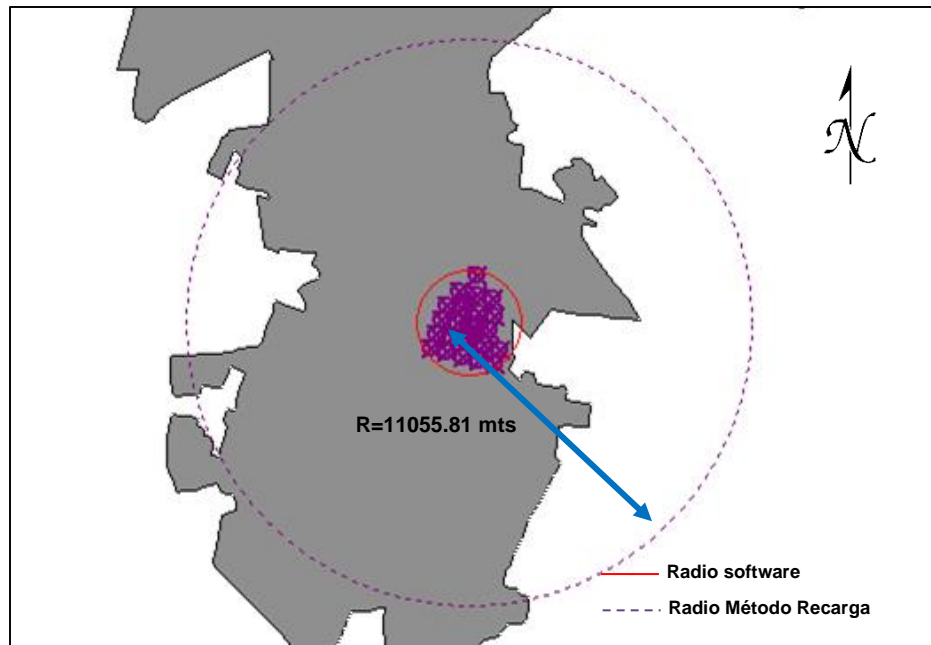


Figura 5.9. Radio fijo calculado por el método de recarga.

b.2. Método de volumétrico con punto central de bombeo, $t = 1825$ días.

De acuerdo a la fórmula para el cálculo del método volumétrico (Ecuación 6), se procedió a obtener el radio para la zona II, el cual fue de 1768.84 metros para un tiempo de 5 años (Figura 5.10.).

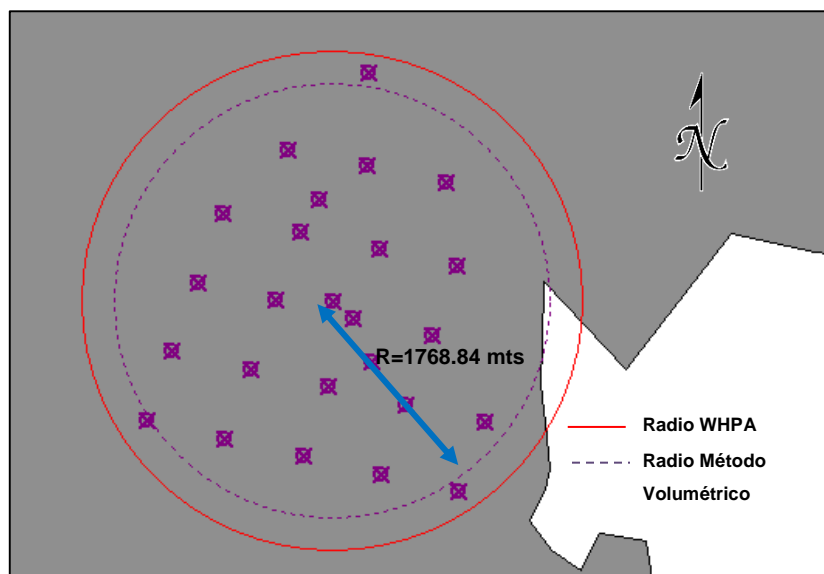


Figura 5.10. Radio fijo calculado por el método volumétrico (5 años, Zona II).

Así mismo, se obtuvo el resultado de 2041.77 para el radio calculado a través del WhAEM2000 por el método analítico, considerando el bombeo total del campo de pozos a través de un pozo central y los datos ingresados al software para el cálculo.

b.3. Método analítico - Flujo uniforme

Para la utilización del software WhAEM2000 es necesario conocer las características del acuífero y de los parámetros hidrogeológicos del área de estudio. Para lo cual fue necesario la utilización de hojas de cálculo que procesaron datos necesarios para ingresar al WhAEM2000.

Resultado del ingreso de las cargas hidráulicas para la época de lluvias y de estiaje a la hoja de cálculo disponible en página web de la EPA, creada por el Dr. Jim Weaver se obtuvo el gradiente, la dirección de flujo y la magnitud del área de estudio para la época de lluvias y estiaje (Tabla 5.3. y 5.4.).

Tabla 5.3. Resultados del cálculo de la dirección de flujo y gradientes para la época de lluvias.

Número de puntos usados en el cálculo	5
Diferencias máximas entre cargas evaluadas	0.5900
Magnitud del gradiente	0.000233
Dirección del flujo en grados desde el norte (Eje Y-Positivo)	204.50
Coeficiente de determinación (R^2)	0.906

Tabla 5.4. Resultados del cálculo de la dirección de flujo y gradientes para la época de estiaje.

Número de puntos usados en el cálculo	5
Diferencias máximas entre cargas evaluadas	0.4500
Magnitud del gradiente	0.000216
Dirección del flujo en grados desde el norte (Eje Y-Positivo)	211.80
Coeficiente de determinación (R^2)	0.951

a) Época de llluvias

Debido a la naturaleza kárstica del área de estudio, se espera que el escenario más desfavorable para la delimitación de perímetros de protección sea el resultado de utilizar la $K_{Máx}$ para la época de llluvias. La delimitación obtenida para los perímetros de protección de la Zona I para un tiempo de 10 días, muestra que el área a proteger tendría un diámetro aproximado de 3500 metros que corresponde a un radio de 1750 metros, para el periodo a corto plazo (Figura 5.11). De manera similar, se obtuvo que para la Zona II con un periodo de tiempo de 5 años, es necesario proteger un diámetro de 5642 metros que equivale a un radio de 2821 metros (Figura 5.12.).

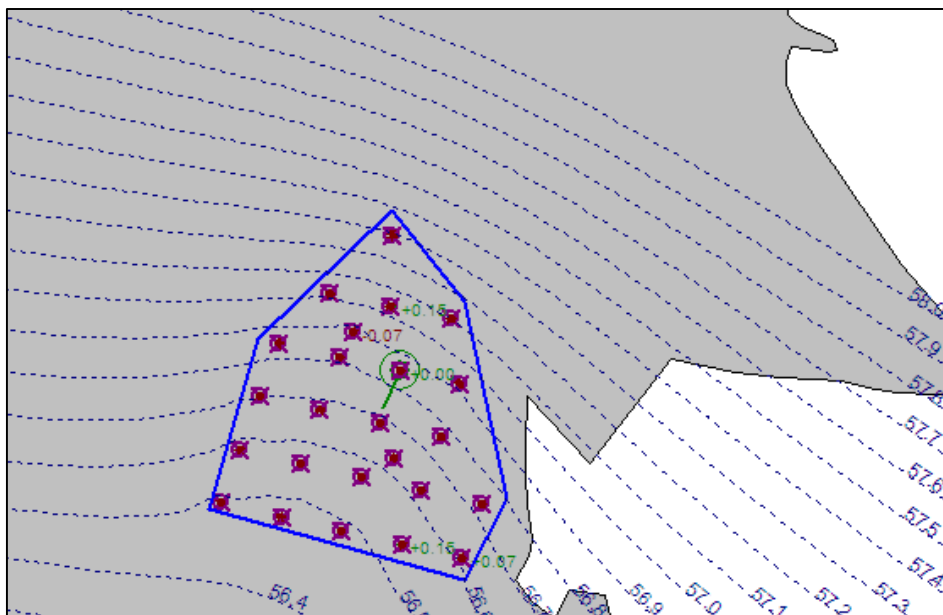


Figura 5.11. PPP Lluvias $K_{Máx}$ y $T=10$ días (Zona I).

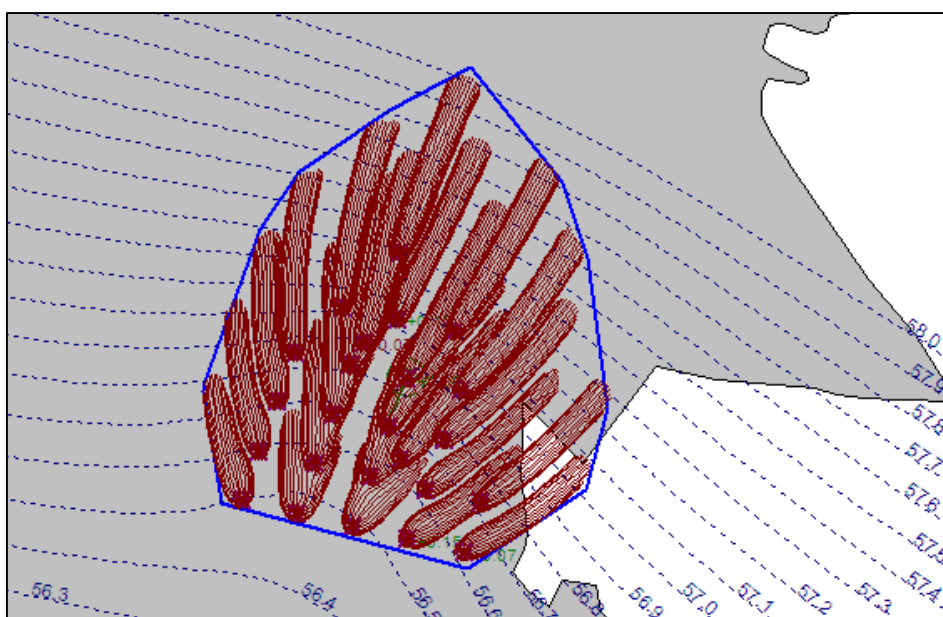


Figura 5.12. PPP Lluvias $K_{Máx}$ y $T=5$ años (Zona II).

En la Figura 5.13., se presenta la delimitación obtenida para el valor de $K_{Mín}$ para la época de lluvias. Se observa, de manera similar que en la Figura 5.8., que la zona delineada es circundante a la Planta Mérida I, con un radio de 1637 metros para la

protección de la Zona I (10 días) y para la Zona II, para un periodo de 5 años, se obtuvo un radio de 2526 metros (Figura 5.14.).

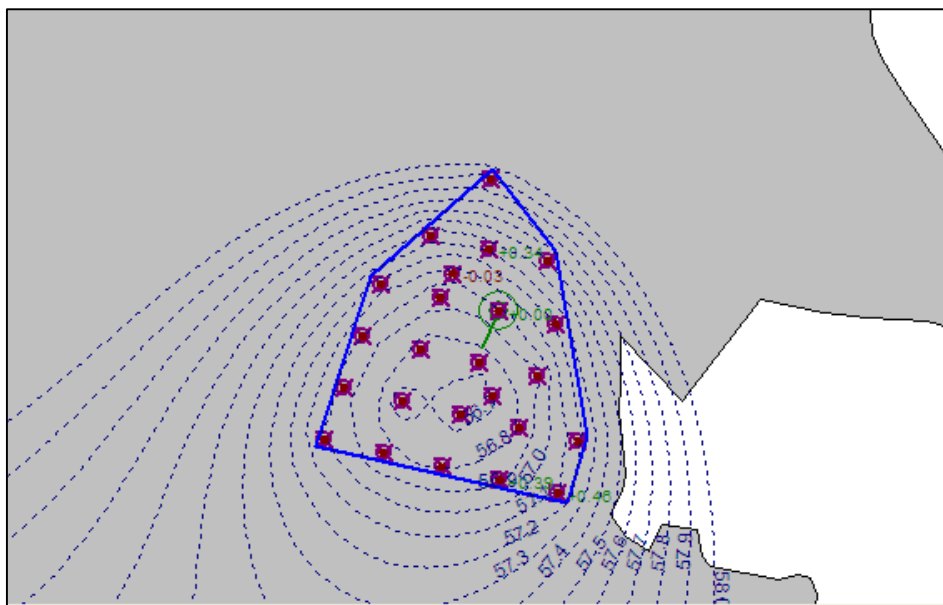


Figura 5.13. PPP Lluvias K_{Min} y $T=10$ días (Zona I).

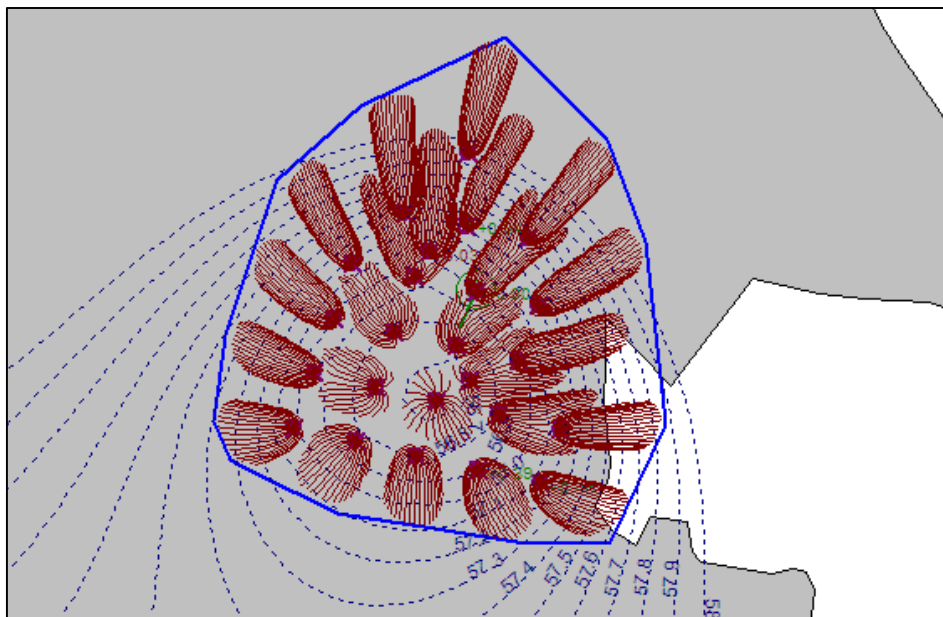


Figura 5.14. PPP Lluvias K_{Min} y $T=5$ años (Zona II)

La delimitación obtenida para un tiempo de 10 días y el valor de K_{Promedio} para la época de lluvias (Figura 5.15.), mostró que la zona delineada es circundante a la

Planta Mérida I, siendo este resultado similar a las Figuras 5.11. y 5.13, con un radio de 1647 metros para la protección de la Zona I (10 días) y para la Zona II, para un periodo de 5 años, se obtuvo un radio de 2558 metros (Figura 5.16.).

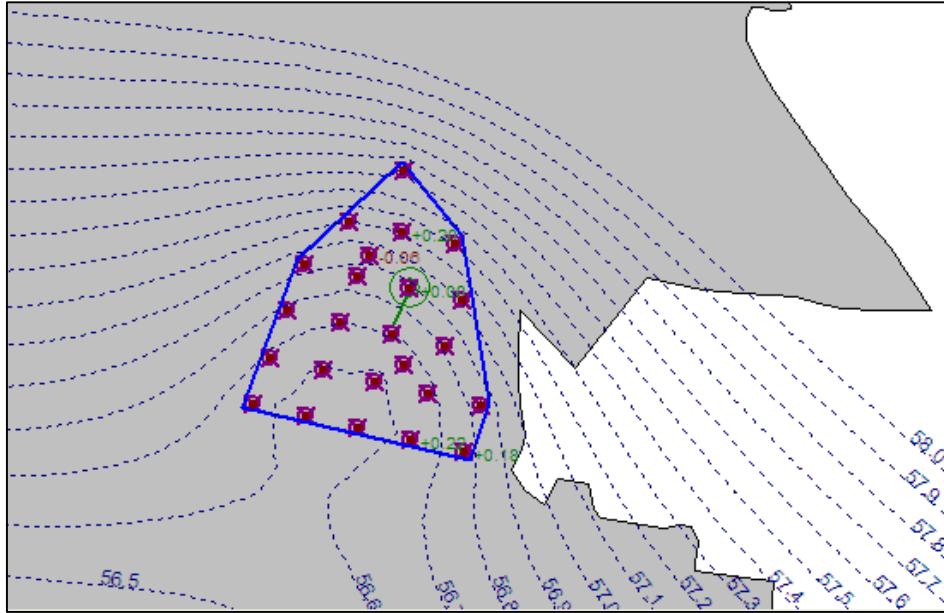


Figura 5.15. PPP Lluvias K_{Promedio} y $T=10$ días (Zona I).

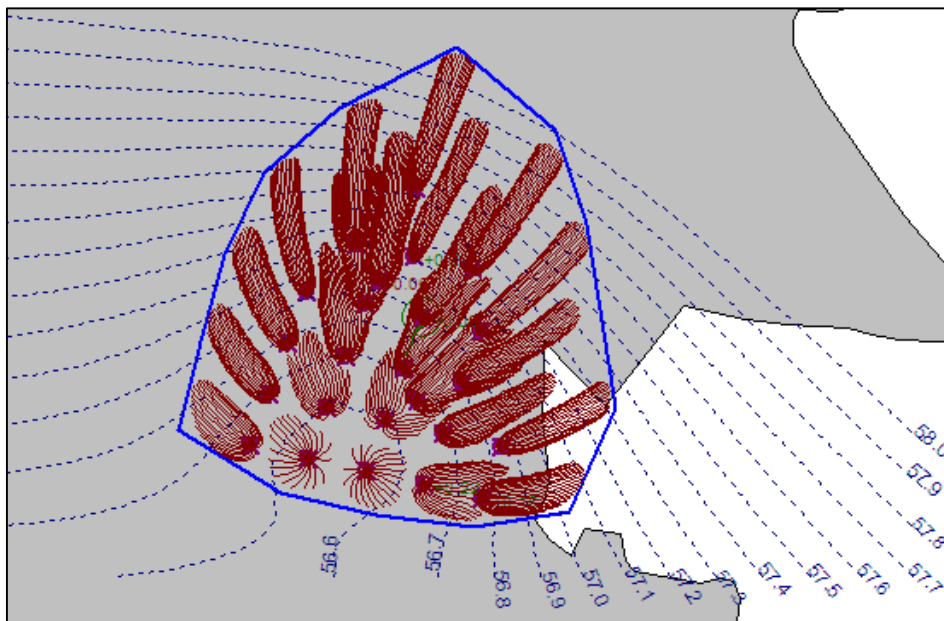


Figura 5.16. PPP Lluvias K_{Promedio} y $T=5$ años (Zona II).

a) Época de estiaje

Los resultados de la delimitación de perímetros de protección para la época de estiaje, utilizando las conductividades hidráulicas y el periodo de tiempo como se señaló en el apartado anterior dieron áreas de protección con radios menores a los obtenidos para la época de lluvias. Utilizando $K_{Máx}$ para un tiempo de 10 días, la delimitación obtenida para los perímetros de protección de la Zona I resulta un radio de 1647 metros (Figura 5.17) y para la Zona II con un periodo de tiempo de 5 años, el radio fue de 2561 metros (Figura 5.18.)

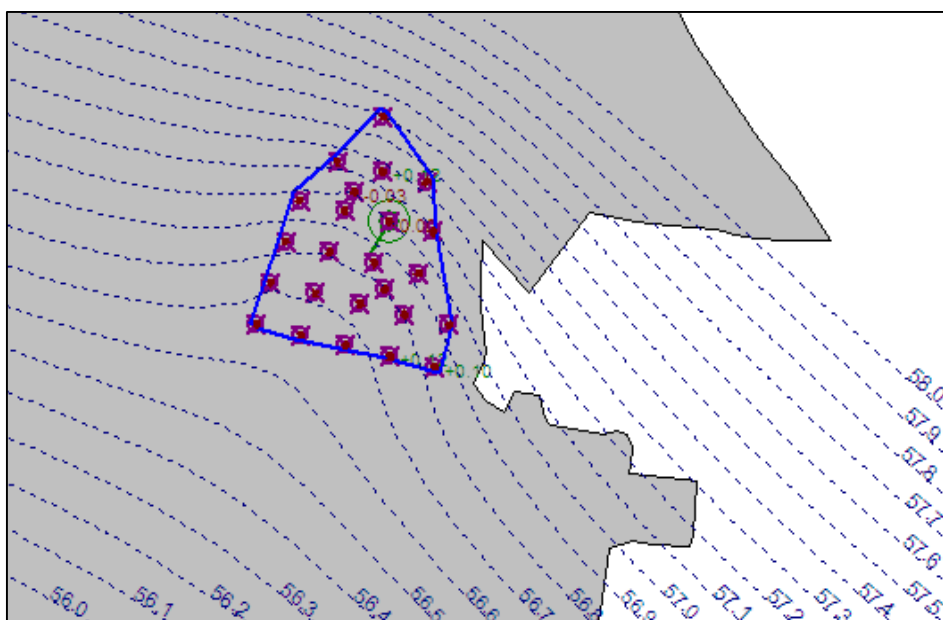


Figura 5.17. PPP Estiaje $K_{Máx}$ y $T=10$ días (Zona I).

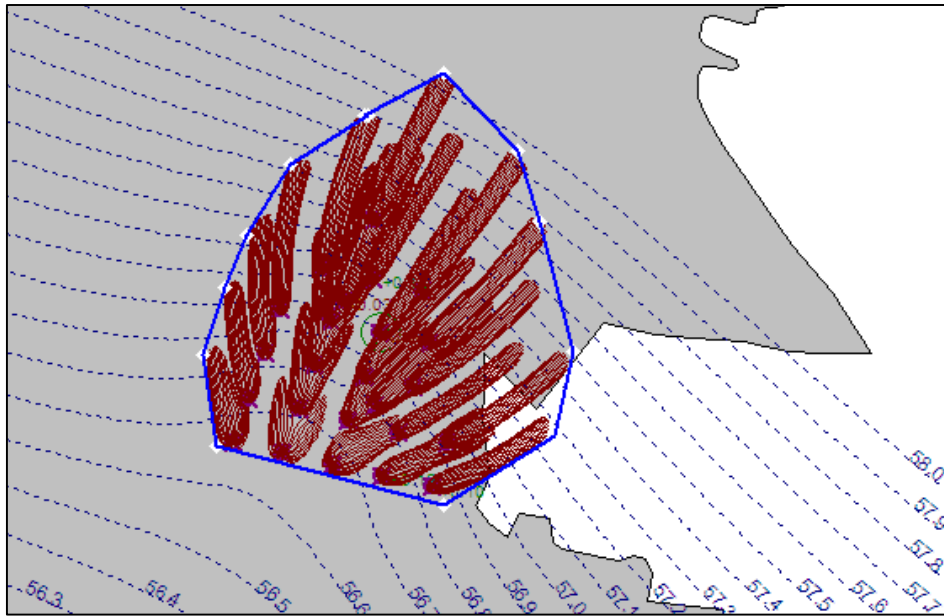


Figura 5.18. PPP Estiaje $K_{M\acute{a}x}$ y $T=5$ años (Zona II).

Los resultados utilizando $K_{M\acute{i}n}$ para un tiempo de 10 días, dieron como resultado un radio de 1607 metros (Figura 5.19) y para la un periodo a largo plazo el radio calculado para la delimitación de la Zona II, fue de 2484 metros (Figura 5.20.)

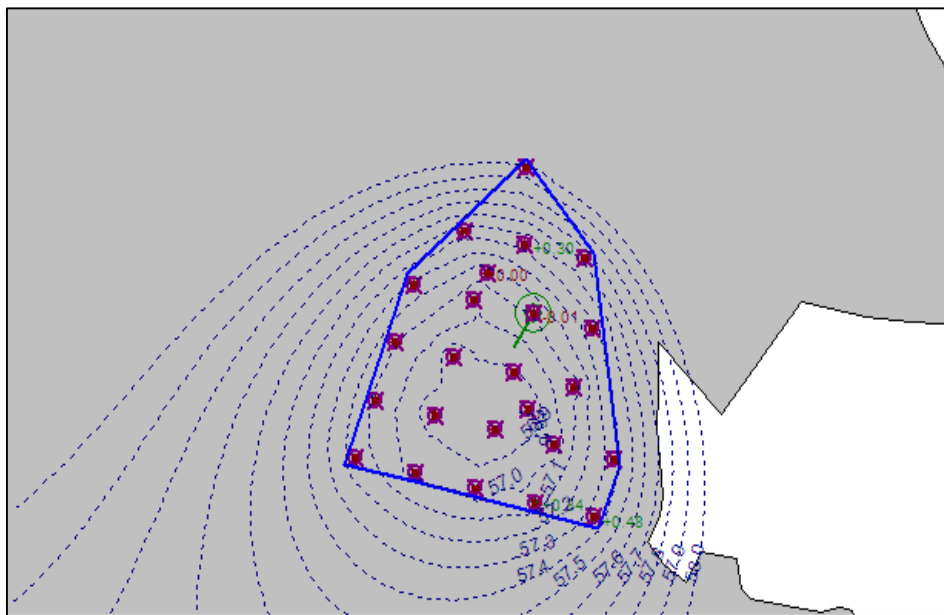


Figura 5.19. PPP Estiaje $K_{M\acute{i}n}$ y $T=10$ días (Zona I).

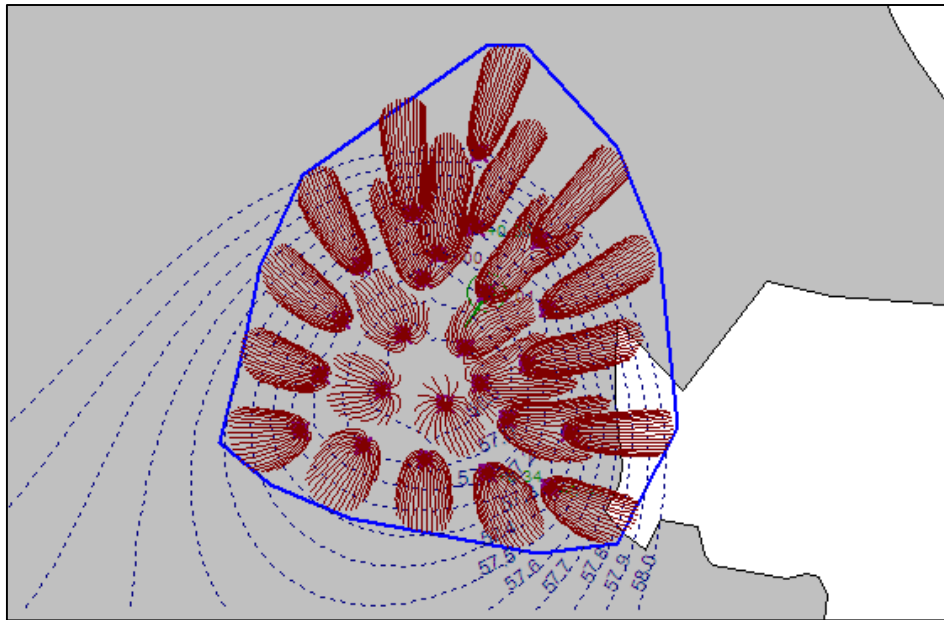


Figura 5.20. PPP Estiaje K_{Min} y $T=5$ años (Zona II).

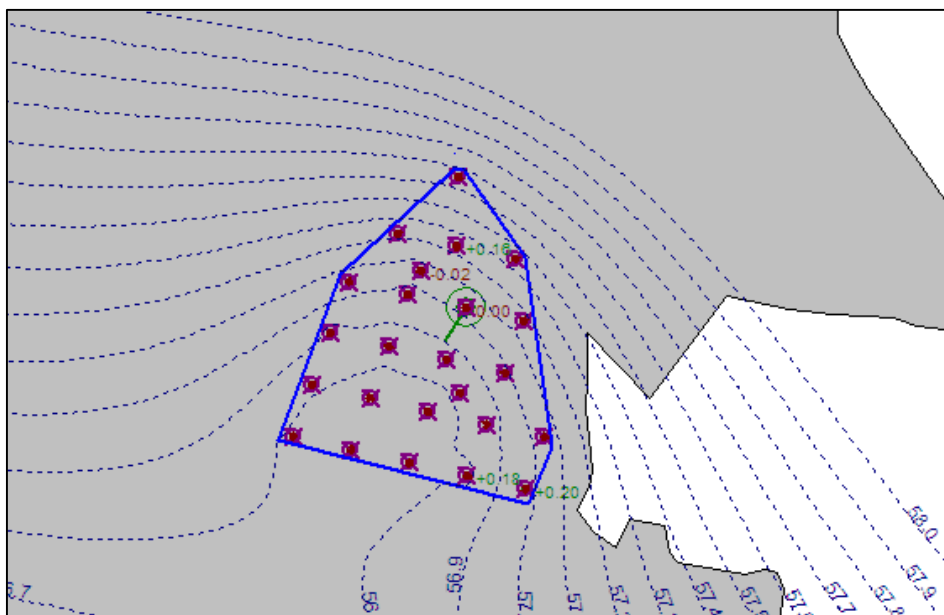


Figura 5.21. PPP Estiaje $K_{Promedio}$ y $T=10$ días (Zona I).

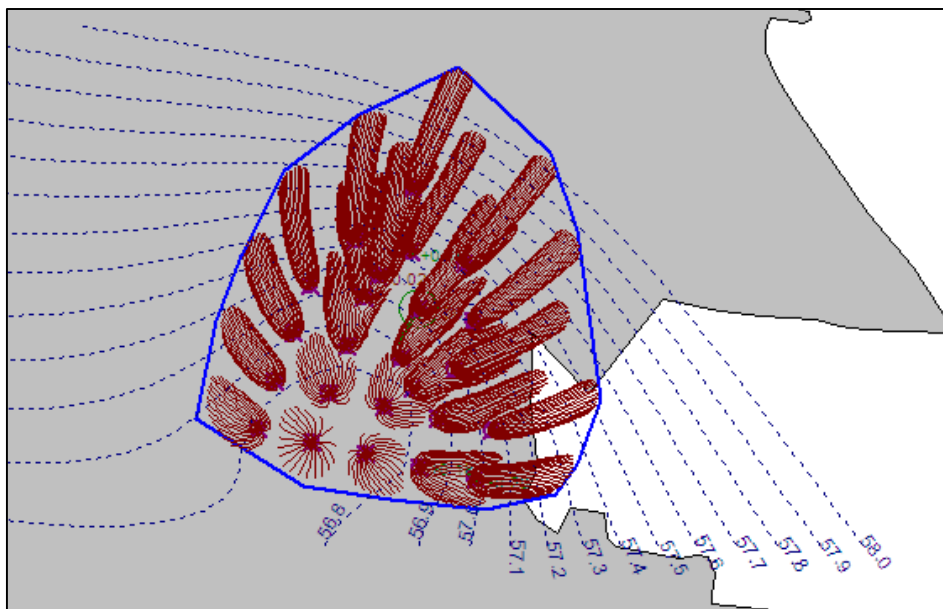


Figura 5.22. PPP Estiaje $K_{Promedio}$ y $T=5$ años (Zona II).

El valor de $K_{Promedio}$ para la época de estiaje (Figura 5.21.), mostró que la zona delineada es circundante a la Planta Mérida I presentando un radio de 1616 metros para un tiempo igual a 10 días, este resultado difiere 32 metros con respecto al radio obtenido en la época de lluvias (Figura 5.15.). Y para la zona II el resultado fue un radio de 2505 metros, 53 metros menos que lo obtenido en la época de lluvias (Figura 5.22.).

El software WhAEM2000, calculó las áreas de influencia debidas al gasto extraído de la Mérida I, las características del acuífero kárstico y los parámetros hidrogeológicos que le fueron ingresados, además los factores variables utilizados, el tiempo y la conductividad hidráulica. Debido a que, en general, los acuíferos kársticos presentan una alta vulnerabilidad a la contaminación ocasionada por los valores de conductividad hidráulica, se evaluaron los resultados de la delineación de las áreas de protección tomando en cuenta los valores máximo, mínimo y promedio ($K_{Máx}$, $K_{Mín}$ y $K_{Promedio}$), tanto para la época de lluvias como para la de estiaje, de la conductividad hidráulica (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Radios obtenidos (m) con el método de flujo uniforme 10 días y 5 años.

ESCENARIO	ZONA	TIEMPO	RADIOS DE INFLUENCIA		
			K _{MÁX}	K _{MÍN}	K _{PROM}
LLUVIAS	I	10 días	1750	1637	1648
	II	5 años	2821	2526	2558
ESTIAJE	I	10 días	1647	1607	1616
	II	5 años	2561	2484	2505

5.5. Selección de la metodología para la delimitación de PPP en un acuífero kárstico.

Se efectuó el análisis de los métodos que fueron utilizados para calcular los PPP para la delimitación la zona de estudio utilizando una tabla comparativa como se muestra en la Tabla 5.6.

La tabla presenta los datos necesarios, ventajas y desventajas de la aplicación de cada método. El método analítico de flujo uniforme, aplicado a través del software WhAEM2000, es el que requiere una mayor cantidad de información del acuífero y de acuerdo a lo señalado en el Manual del WhAEM2000 si los datos del acuífero son certeros la delineación dará un mejor resultado para la zona de estudio.

El WhAEM2000 empleando el flujo uniforme, es aplicable para un conjunto de pozos, es utilizado preferentemente para las zonas de abastecimiento que cuentan con más de un pozo de abastecimiento.

El método volumétrico aplicado a través de la ecuación 6, resultó con radio de 1768.84 metros siendo este resultado similar a los obtenido por el software WhAEM2000 que calculó un radio de 2041.77 metros, este resultado demuestra que en caso de no contar con el software WhAEM2000 y/o los datos necesarios, la ecuación 6 para calcular el radio por el método volumétrico da un resultado aceptable

para obtener la delimitación de un área de estudio, tomando en cuenta el gasto total de extracción.

Tabla 5.6. Ventajas y desventajas de las metodologías utilizadas para delimitar PPP.

MÉTODO	DATOS NECESARIOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
RADIO ARBITRARIO	- Mapa topográfico. - Observaciones de tipo hidrogeológicas.	- Económico - Información asequible. - Se utiliza como primer paso para la delimitación de PPP.	- Se aplican cuando no hay información hidrogeológica suficiente.
RADIO FIJO CALCULADO (Recarga)	- Gasto de extracción del pozo. - Recarga del acuífero	- Formula simple.	- El perímetro de protección da un área muy amplia debido a la alta recarga de un karst.
RADIO FIJO CALCULADO (Volumétrico)	- Gasto de extracción del pozo. - Porosidad. -Tiempo de viaje. -Espesor de agua dulce	- Sencillo de aplicar y económico. - Requiere conocimiento de datos hidrogeológicos. -Área de protección razonable	
MODELOS ANALÍTICOS WhAEM	- Caudal bombeado - Gradiente hidráulico - Espesor - Transmisividad - Porosidad	- Aplicación de ecuaciones sencillas. - Considera parámetros hidrogeológicos de la zona. - Resultados confiables. - Datos de calidad - Re-calcular al incrementar datos.	

El método volumétrico como se muestra en la Tabla 5.6., requiere datos factibles de obtener ya sea con trabajo de campo o por revisión de literatura para la obtención de las características hidrogeológicas del acuífero o sitio de estudio.

De acuerdo a los resultados obtenidos la mejor metodología a utilizar es el método de flujo uniforme aplicado a través del software WhAEM2000, debido a la precisión de los datos con el que se alimenta el software, debido a que da dos opciones: 1) calcular el área a delimitar para un pozo de extracción y 2) para una batería de pozos.

5.6. Riesgo a la contaminación del agua subterránea

5.6.1. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de la ZMM y municipios anexos (Método COP)

El mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuerdo al método COP, que considera los factores del flujo de agua subterránea, tipo de suelo y precipitación, mostró que en el área de estudio se tiene vulnerabilidad clasificada como baja y moderada (Figura 5.23.). Los extremos norte (Progreso) y sur (Tecoh) del área de estudio presentaron la vulnerabilidad más baja debido a que en la zona costera se tiene la presencia de un acuitardo o caliche (Perry 1989) y el municipio Tecoh, presenta una baja vulnerabilidad debido a la cantidad de precipitación registrada en el municipio.

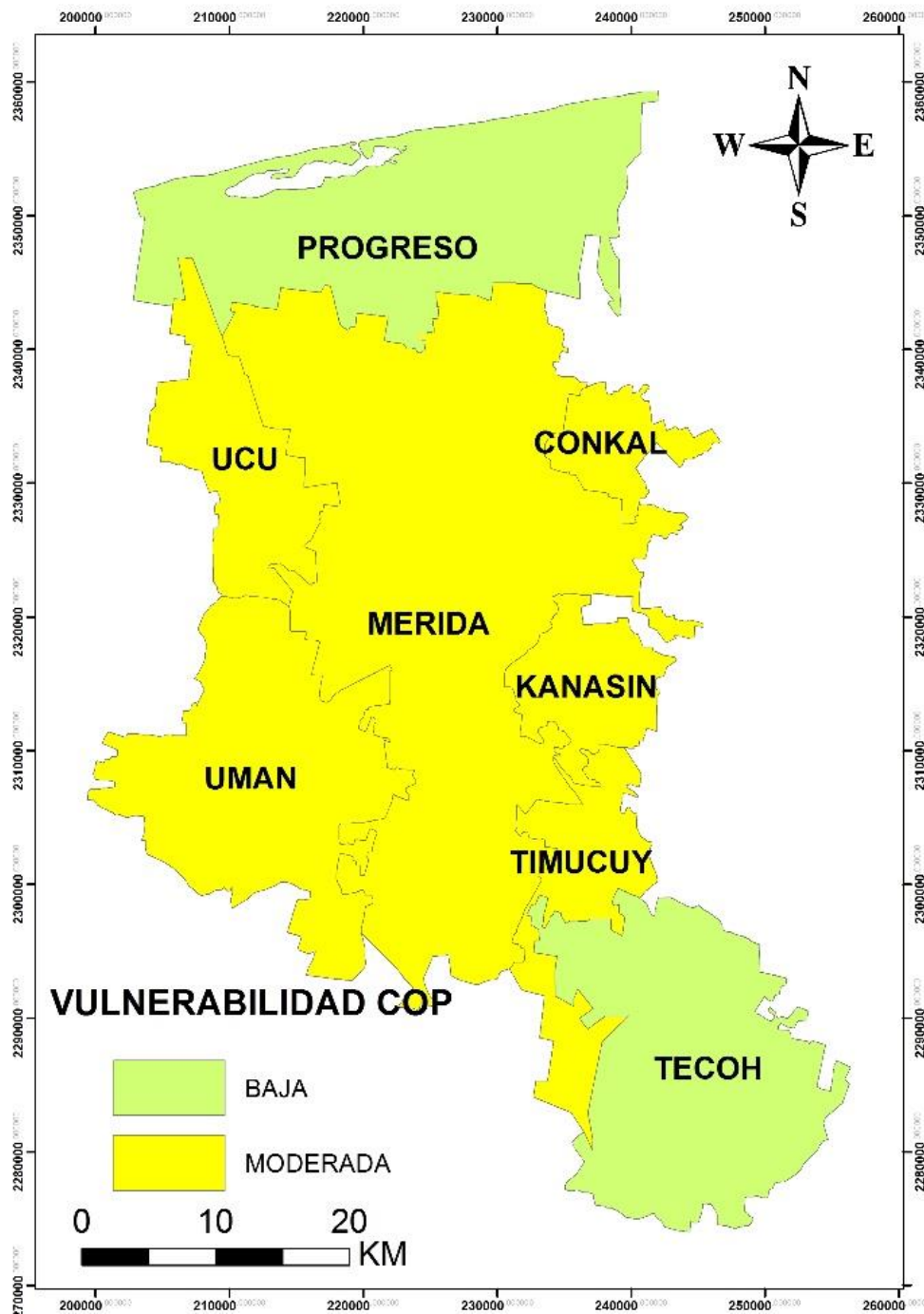


Figura 5.23. Mapa de vulnerabilidad método COP para la ZMM.

5.6.2. Mapa de amenazas de la ZMM y municipios anexos

El mapa de amenazas a la contaminación por nitrógeno presenta 3 niveles, bajo, moderado y alto de acuerdo a la carga total de Nitrógeno (kg/año) producidas al año en cada municipio. La escala de las amenazas se definió de acuerdo a los valores de nitrógeno obtenidos, estableciendo que si la cantidad de kilogramos de nitrógeno al año era menor de dos millones se consideró peligro Bajo, entre dos y ocho millones el nivel de amenaza se considera Moderado y mayor a ocho millones es un peligro Alto. La Figura 5.24, demuestra que el municipio de Mérida es el único que presenta amenaza alta, atribuible a las grandes de cantidades de nitrógeno generadas al año por la producción de cerdos, la cantidad de fosas sépticas y residuos sólidos presentes en el municipio (Tabla 5.7.).

Tabla 5.7. Principales aportaciones de nitrógeno según diferentes actividades en el área de estudio

Municipio	Agricultura	Avicultura	Porcicultura	Fosas sépticas	Residuos sólidos	N-Total (kg/año)
Conkal	115422	3035	6287490	41144	23566	6470657
Kanasín	187297	1813246	1743569	354191	202871	4301174
Mérida	319937	348976	12463728	3738294	2141198	19012133
Progreso	103337	52958	3168273	242811	139076	3706455
Tecoh	60782	434711	2068236	72900	41755	2678384
Timucuy	29444	2505	1616877	30749	17612	1697187
Ucú	39920	754565	141693	15611	8941	960730
Umán	146839	755420	2675633	229469	131434	3938795

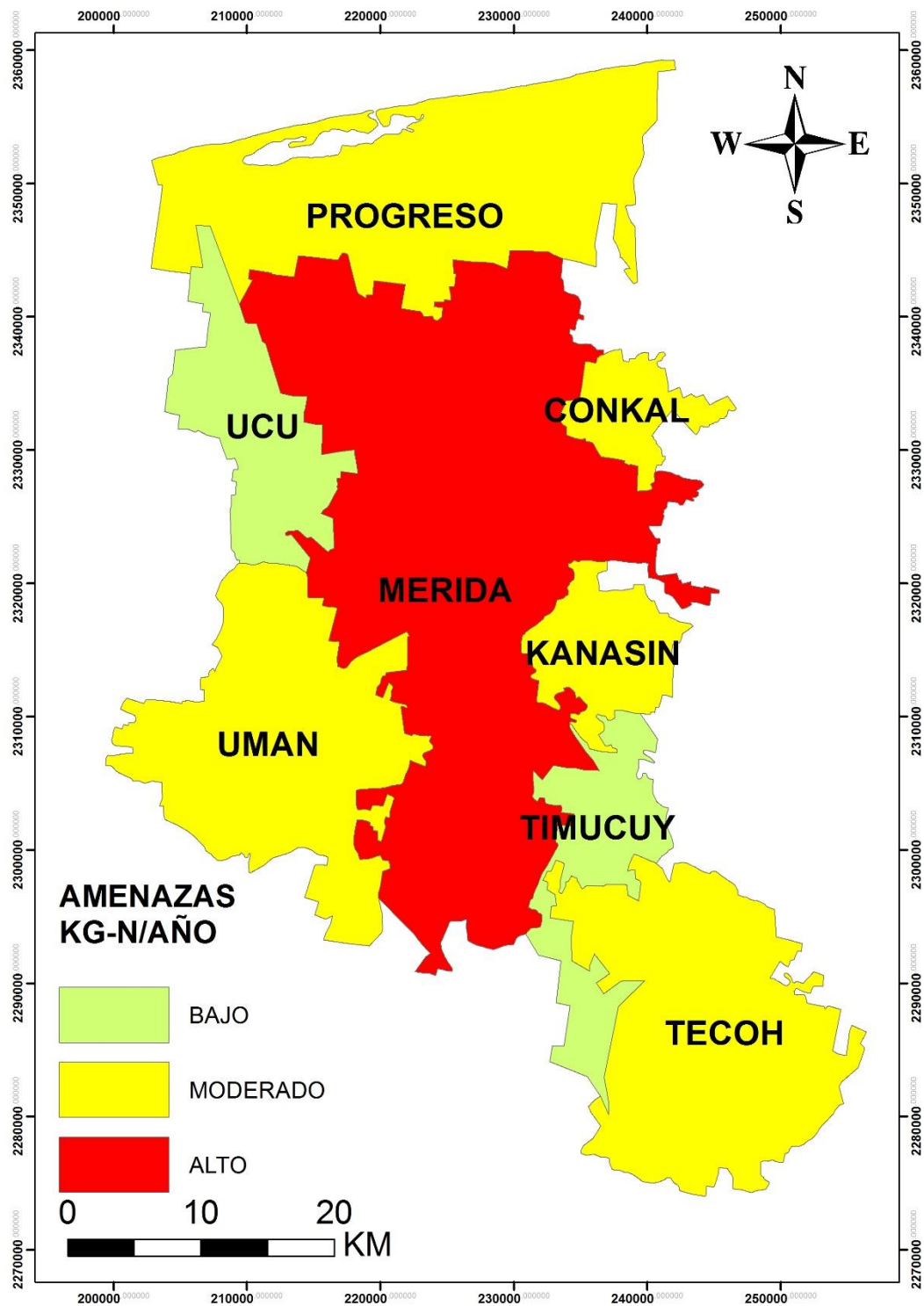


Figura 5.24. Mapa de amenazas (Kg Nitrógeno/año) para la ZMM.

5.6.3. Mapa de riesgo a la contaminación de la ZMM y municipios anexos

La combinación de los mapas de vulnerabilidad y amenazas dieron origen al mapa de riesgo a la contaminación del agua subterránea del área de estudio, el resultado final del riesgo se calculó a partir de una matriz de doble entrada (Van 1997, Jiménez et al. 2011) resultando la matriz de riesgo (Tabla 4.8.).

Tabla 5.8. Matriz para la determinación del riesgo a la contaminación del agua subterránea

MATRIZ DE RIESGO		AMENAZA		
		BAJO	MODERADO	ALTO
VULNERABILIDAD	BAJA	BAJO	MODERADO	MODERADO
	MODERADA	MODERADO	MODERADO	ALTO

De acuerdo a esta clasificación, la zona de estudio se puede clasificar como riesgo moderado siendo el municipio de Mérida el único que se clasifica como riesgo alto (Figura 5.25.).

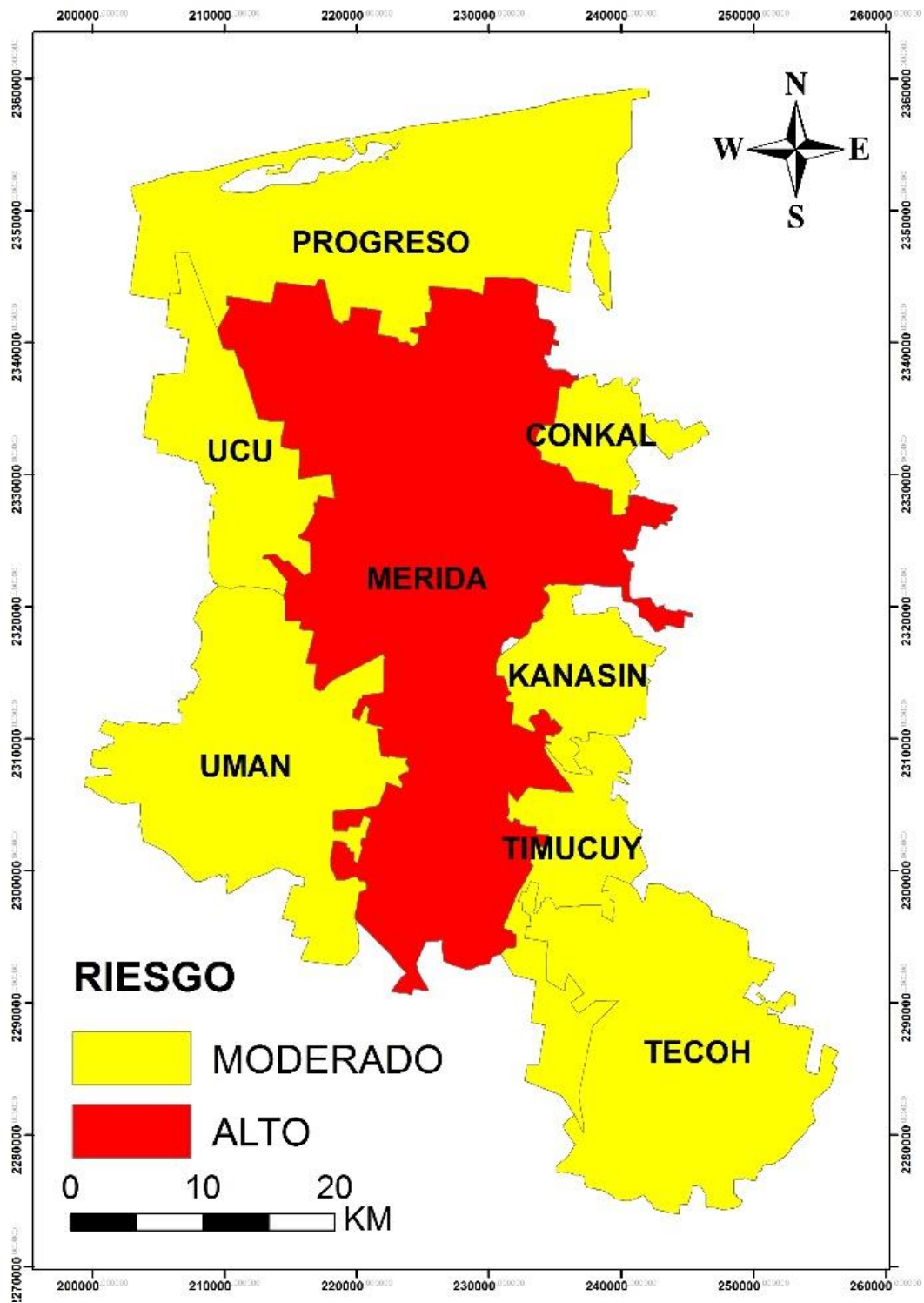


Figura 5.25. Mapa de riesgo para la ZMM.

5.7. Plan de manejo para la protección del recurso hídrico en un acuífero kárstico

El Plan de manejo para la protección del recurso hídrico de planta de abastecimiento Mérida I se establece con la finalidad de garantizar calidad de las aguas subterráneas y los beneficios hidrológicos para mantener la calidad de vida y los niveles de bienestar de la población.

En la revisión de las medidas técnicas y legales, se concluyó que la zona de estudio se localiza encuentra dentro de una de las dos Áreas Naturales Protegidas (ANPS) contempladas dentro del Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del municipio de Mérida (Gobierno del Estado de Yucatán 2006). De acuerdo a esta revisión, el área de estudio se localiza específicamente dentro de la zona sujeta a conservación denominada Reserva Cuxtal, lo cual permite de manera indirecta una primera regulación y manejo del sitio de estudio para garantizar calidad de las aguas subterráneas y los beneficios hidrológicos actuales.

La delimitación de perímetros de protección de pozos para el área de estudio estableció un radio de protección de 2821 metros en las condiciones menos favorables (Época de lluvias y $K_{Máx}$) lo cual permite conocer el área que debe de ser protegida. En este radio de influencia se deberán regular las actividades humanas que se desarrollen a través de medidas de prevención.

El mapa de riesgo indicó que el peligro alrededor en fuente de abastecimiento se encuentra caracterizado como alto, lo cual indica que es primordial la protección de esta área ubicada en un acuífero kárstico vulnerable la contaminación.

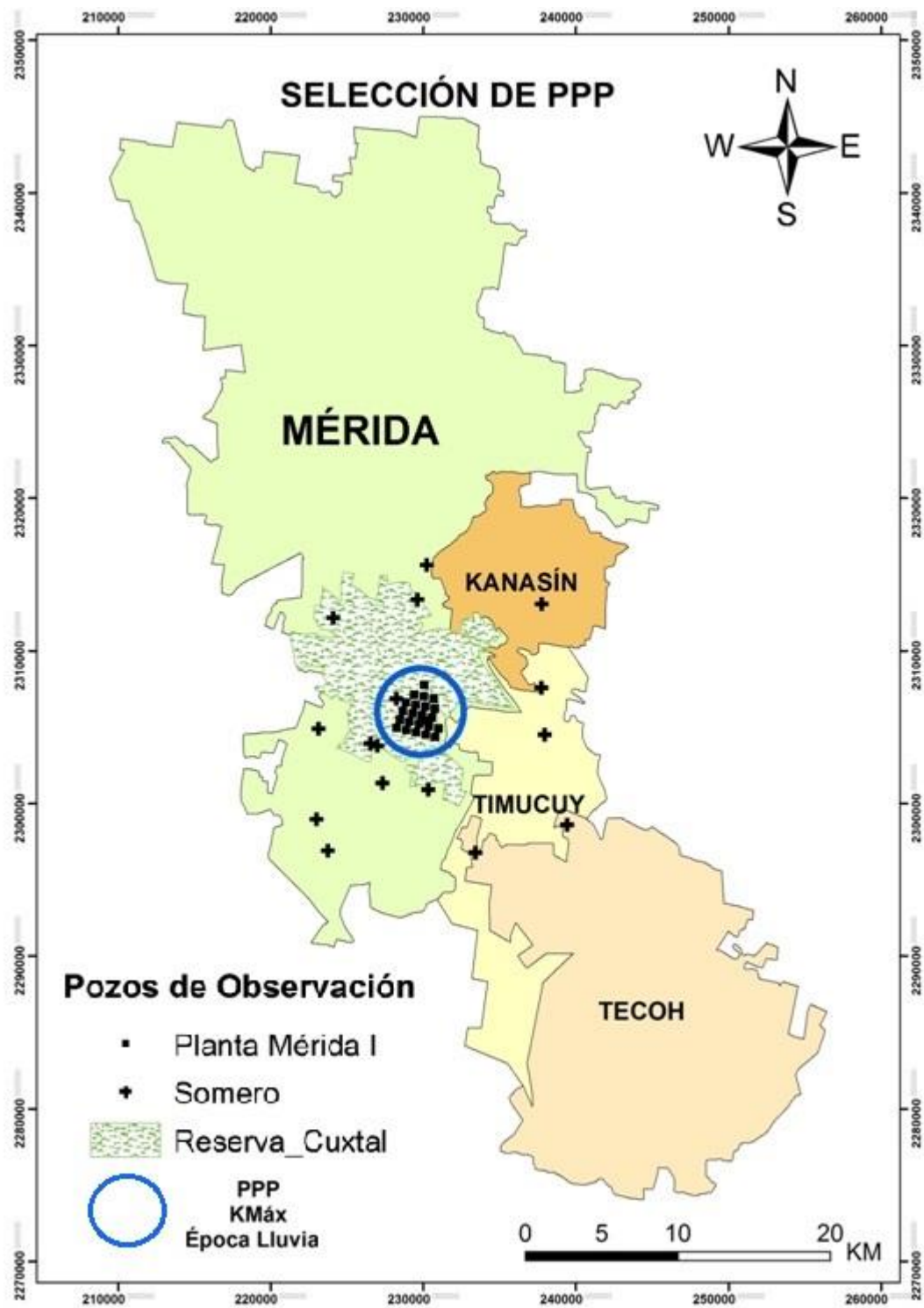


Figura 5.26. PPP para $K_{Máx}$ y época de lluvias y Reserva ecológica de Cuxtal.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Las cotas topográficas obtenidas demuestran que la zona de estudio presenta una topografía plana, disminuyendo sus alturas de sur a norte en el área de estudio.

Se obtuvieron direcciones preferenciales del flujo en el área de estudio; similares para las dos temporadas siendo el flujo preferencial local de SW – NE.

La dirección preferencial presentó un comportamiento irregular en área de extracción debido a la influencia del bombeo continuo dentro de la planta Mérida I.

Las concentraciones más altas del ion nitrato se localizaron en la parte central y noroeste de la ciudad de Mérida debido al uso de las fosas sépticas y la porcicultura.

En general no existe riesgo a la salud por nitratos para adultos, pero el riesgo aumenta para los niños que consumen agua de los sistemas intraurbanos, alimentados con leche de fórmula.

La distribución espacial del índice del riesgo a la salud por nitratos es una evidencia científica que confirma que las plantas de abastecimiento de agua para la ciudad de Mérida no representan mayor riesgo para salud pública, por la presencia de nitratos.

El radio arbitrario deberá ser de 30 metros, como mínimo para la zona I, para el caso de la Planta Mérida I, tomando en cuenta las características kársticas del acuífero y la necesidad de establecer una distancia que regule la protección de los pozos individuales y los campos de pozos, en ausencia de normas legales que establezcan protección para las fuentes de abastecimiento.

El radio fijo calculado presenta rangos entre 55 y 61 metros para un tiempo de viaje de 10 días y rangos de 750 a 829 metros para un tiempo de viaje de 5 años, radios que se proponen para la protección de cada pozo.

Los resultados obtenidos para el radio fijo calculado por el método de recarga presenta un radio de protección de 11055.81 metros para un tiempo de 5 años, esto debido al alto índice de recarga que tiene el acuífero kárstico en estudio.

El cálculo del radio fijo por método volumétrico fue de 1768.84 metros y presentó similitud con el radio de 2041.77 calculado a través del método volumétrico por el WhAEM2000, ambos calculados para un tiempo de 5 años.

La aplicación del flujo uniforme a través del WhAEM, con respecto al escenario mas desfavorable para la delimitación de PPP (Época de lluvias, $K_{Máx}$, $t= 5$ años) dio un radio de 2821 metros para la zona II el cual incluye los radios obtenidos para los diferentes métodos que fueron aplicados para la delimitación.

El método volumétrico es un método factible debido a que los datos necesarios para realizar el cálculo son fáciles de obtener y de simple aplicación.

La mejor metodología a utilizar es el método de flujo uniforme aplicado a través del software WhAEM2000, debido a la precisión de los datos con el que se alimenta el software, debido a que da dos opciones: 1) calcular el área a delimitar para un pozo de extracción y 2) para una batería de pozos.

El riesgo a la contaminación es moderado para la ZMM y municipios anexos. El municipio de Mérida es el único que se clasifica como riesgo alto, resultado de la vulnerabilidad moderada en la zona de estudio y el nivel de amenaza alto debido a la carga de nitrógeno (Municipio de Mérida).

La delimitación del PPP para el área de estudio, radio de 2821 metros en las condiciones menos favorables (Época de lluvias y $K_{Máx}$), se localiza dentro de la zona sujeta a conservación denominada Reserva Cuxtal.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS

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

Aguilar D. Y., Bautista F., Mendoza M. E., Delgado C. (2014). Propuesta de IVAKY: índice de vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. En "10 soluciones para el manejo sustentable del agua. Península de Yucatán". Fundación ICA., México., 112-135.

Andreo B., Goldscheider N., Vadillo I., Neukum J., Sinreich M., Jiménez P., Brechenmacher J., Carrasco F., Hötzl H., Perles M., Zwahlen F. (2006). Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Libar (Southern Spain). Science of the Total Environment 357, 54– 73.

APHA, AWWA, WEF. (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th Edition. Clesverí L.S., Eaton A.D. y A.E. Greenberg (Eds.) Washington, D.C. USA.

Ávila G. P. (2002). Cambio global y recursos hídricos en México: hidropolítica y conflictos contemporáneos por el agua. México: Instituto Nacional de Ecología (INE).

Ayora D. M. (2012). Determinación de conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento en la zona de captación Mérida I. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Yucatán.

Banv V., & Deriszadeh M. (2005). Wellhead Protection Area Delineation Using The Analytic Element Method. Water, Air, and Soil Pollution 161 , 39–54.

Bibi R. N. (2010). Exploration, modelling and management of groundwater-dependent ecosystems in karst – the Sian Ka'an case study, Yucatan, Mexico. Denmark: Tesis Doctoral. Technical University of Denmark.

Bolio B. E. R., Cabrera S. S. A., Bautista F., Pacheco A. J. G. (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.

Bozek, F., Jesonkova, L., Dvorak, J., Bozek, M., Bakos, E. (2013). Assessment of health risk to ground water resources for the emergency supply of population in relation to the content of nitrates and nitrites. World Academy of Science, Engineering and Technology, 7, 1369-1374.

Brewerton L. J. (1993). Aquifer properties of samples from Merida, Yucatán, México. United Kingdom. British Geological Survey. Technical report. Hydrogeology series.

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

Carrillo C. M. E. (2006). Estudio Hidrogeológico de la costa Nororiental de Yucatán. Mérida Yucatán. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Yucatán.

César V. E. (1994). Abastecimiento de Agua Potable, Volumen I. México: Universidad Autónoma de México. División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica.

Civita M. V. (1995). A methodology for delineation and design of spring protection area system. Proceedings IAH Congr. Solution 95 (Session A, no. 3), Edmonton, AB, Canada, June 1995.

Civita M. V. (2008). An improved method for delineating source protection zones for karst springs based on analysis of recession curve data. Hydrogeology Journal 16, 855-869.

CNA. (2001). Compendio básico del agua en México 2002. México: Comisión Nacional del Agua.

CNA. (2007). Delimitación de zonas de Protección de pozos para agua. México: Comisión Nacional del Agua. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

Connair D., Murray, B. S. (2002). Karst groundwater basin delineation, Fort Knox, Kentucky. Engineering Geology 65, 125–131.

Custodio E., & Llamas M. R. (1983). Hidrología Subterránea. Barcelona: OMEGA.

Deming D. (2002). Introduction to Hydrogeology. New York: McGraw Hill.

Domínguez J., & Carrillo-Rivera J. J. (2007). El agua subterránea como elemento de debate en la historia de México. México: Instituto de Investigaciones Históricas Universidad Autónoma de México.

Dong Y., Xu H., & Li G. (2013). Wellhead protection area delineation using multiple methods. Environ Earth Science , 1-8.

Duhau E. (1998). Hábitat popular y política urbana. México: UAM y Miguel Angel Porrúa.

Escalante Z., A. B. (2000). Diagnóstico preliminar para la delimitación de una zona de reserva hidrogeológica al sur de la ciudad de Mérida, Yucatán. Mérida: Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Yucatán.

Espinoza C., Muñoz R., Lobo G. (2004). Hacia una propuesta de zonas de protección de captaciones en Chile. Lima, Perú: HIDRORED.

Euán A.J. (2012). Caracterización de fuentes no puntuales de contaminación. Parte complementaria del Proyecto YUC-2008-C06-108520.

Expósito J. L., Esteller M. V., Paredes J., Rico C., Franco R. (2010). Groundwater Protection Using Vulnerability Maps and Wellhead Protection Area (WHPA): A Case Study in Mexico. *Water Resour Manage* 24 , 4219–4236.

Díaz-Barriga F. (1999). Metodología de identificación y evaluación de riesgos para la salud en sitios contaminados. OPS/CEPIS/PUB/99.34, Lima.

Fagundo J. R., González P. (2002). Procesos geoquímicos naturales e inducidos por el hombre en acuíferos kársticos costeros. Caso de estudio: Sector hidrogeológico Güira Quivicán (CUENCA SUR DE LA HABANA). *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, N.2, p. 69-77.

Foster S. y Hirata R. (1991). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Documento del CEPIS, con la OMS y la OPS, Lima.

Foster S., Hirata R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. Lima, Perú: WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical manual.

Foster S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M., Paris M. (2001). Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. World Bank, GWMATE. Washington.

Foster S. S. D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Vulnerability of Soil and Groundwater to pollutants*. TNO Committee on Hydrological Research Information N°38, Ed. by W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegenigh.

Gijón Y. G. N. (2006). Análisis espacial de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en el estado de Yucatán, México. Mérida: Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán.

Gobierno de Navarra. (2012). Clasificación climática de Koppen. *Metereología y climatología de Navarra*. Disponible en: <http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm> Recuperado el 30 de Julio del 2015.

Gobierno del Estado de Yucatán. (2006). Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Municipio de Mérida, Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán, México.

González H. R. A. (2005). Evaluación del impacto ambiental y afectación hidrogeológica del basurero de Mérida, Yucatán. México: Tesis Doctoral. Universidad de Autónoma de México.

González R. A. (2007). Hidrogeología de los acuíferos de las sierras de Pajalar y Mojón (Jaén). Granada: Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada.

Herrera M. A. (2012). Análisis del riesgo a la contaminación del agua subterránea en la zona metropolitana Mérida, Yucatán. Mérida: Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán.

Hirata R. (2002). Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas. Cuba: HIDRORED.

Hirata R., Rebouças A. (1999). La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. Boletín Geológico Minero de España 110 (4): 423–436.

Iglesias M. E. (2001). Economía y gestión sostenible de las aguas subterráneas: El acuífero Mancha Occidental. Tesis doctoral. Universidad de Madrid.

INEGI. (2002). Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática. Estudio hidrológico en el estado de Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán. México.

Jamaludin, N., Sham, S.M., Ismail, S.N.S. (2013). Health risk assessment of nitrate exposure in well water of residents in intensive agriculture area. American Journal of Applied Sciences, 10, 442-448.

Jiménez M.A., Carrasco C.F., Martínez N. (2011) Protection of groundwater intended for human consumption: a proposed methodology for defining safeguard zones.

Johansson P.O., Hirata R. (2002). Rating of groundwater contamination sources. En "Groundwater contamination inventory. A methodological guide." Zaporozec A. (Editor), UNESCO, 63-74.

Larena E. W. Y. (2013). Disponibilidad de agua en la zona de captación Mérida I y adecuación de un índice de calidad para aguas subterráneas. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán.

López S. G. (1996). La gestión del agua subterránea en la cuenca alta del río Guadiana: de la economía convencional a la economía ecológica. Universidad de Castilla-La Mancha.

López-Vera F. (1980). Datación mediante Cloro-36 de aguas subterráneas en el acuífero terciario detrítico de Madrid. (Nota preliminar). Madrid: Boletín Meteorológico y Minero.

López-Vera F. (2002). Estrategias para definir políticas de gestión de calidad de los acuíferos: La directiva Europea 2000/60/CE. Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación, caracterización y evaluación. (pág. 10pp.). Habana, Cuba: HIDRORED.

López-Vera F. & Mahmoud, M. (1995). Ensayos de flujo en lisímetros con trazadores químicos y radiactivos. Investigación en Zona No Saturada. Vitoria: Universidad del País Vasco.

Marín S. L., Pacheco A. J., Méndez R. R. (2004). Hidrogeología de la Península de Yucatán. En: Jiménez B, Marín L (Eds) El agua en México vista desde la Academia. Academia Mexicana de Ciencias. pp: 159-176.

Martínez B., J. J. (2009). El nitrógeno en las aguas subterráneas de la comunidad de Madrid: Descripción de los procesos de contaminación y desarrollo de herramientas para la designación de zonas vulnerables. Alcalá: Tesis Doctoral. Departamento Interuniversitario de Ecología, Universidad de Alcalá de Henares.

Martínez N., C. (2002). Propuesta metodológica para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos detríticos y su implementación en el territorio español: Aplicación a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (Segovia). Madrid: Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid.

Martínez N., C., García García A. (2003). Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Meteorología y aplicación al territorio. Instituto geológico y minero de España (IGME). Madrid, España.

Miller J. C. (1996). Vulnerabilidad relativa de los acuíferos floridanos y yucatecos a la contaminación del agua subterránea y su protección. En: Memorias del 3er Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, San Luis Potosí, México , 4(67-81).

Mora L., H. J. (2002). Migración de plomo a través de facies hidroquímicas del agua subterránea. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Departamento de ingeniería civil: hidráulica y energética.

NOM-003-CNA. (1996). Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos. México: Comisión Nacional del Agua.

NOM-127-SSA1. (1994). Norma Oficial Mexicana. Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano – límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México: Secretaría de Salubridad y Asistencia.

NRC (1993). Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.

Pacheco A., J., Calderón R., L., Cabrera S., A. (2004). Delineación de la zona de protección hidrogeológica para el campo de pozos de la planta Mérida I, en la ciudad de Mérida, Yucatán, México. Revista Ingeniería 8-1 , 7-16.

Pacheco J., Cabrera A., Torres M., Molina M., Pacheco R., Peraza I. (2011). Reserva hidrogeológica para el abastecimiento de agua con calidad para la Zona Metropolitana de Mérida. Informe Parcial del Proyecto 108520. Fondo mixto CONACYT-GOB. EDO. YUCATÁN. Mérida, Yucatán.

Palacios S. L. C. (2013). Aplicación de técnicas geofísicas para la evaluación de parámetros hidrogeológicos en Mérida, Yucatán. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán.

Pérez M. F. (2004). Dinámica del arsénico en aguas subterráneas de pozos y sedimentos del distribuidor general de agua potable de Zimapán, Hidalgo. Zimapán, Hidalgo: Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.

Pérez S. J. J. (2007). Hidrogeología del sistema kárstico de la fuentona Muriel (Soria). Madrid: Departamento de Ingeniería y morfología del terreno de la Universidad Politécnica de Madrid.

Pérez C.R., Pacheco Á. J., Euán Á. J. (2008). Evaluación a Escala Regional de la Vulnerabilidad del Agua Subterránea a la Contaminación en Yucatán-México. Ambiente Ecológico. 1668-3358.México.

Perry E., Swift J., Gamboa J., Reeve A., Sanborn R., Marín L., Villasuso M. (1989). Geologic and environmental aspects of surface cementation, north coast Yucatan, Mexico. En "Hydrogeological Investigations in Northwester Yucatan México, using resistivity surveys" Steinich B., Marin L., Ground Water, 34 (4), 640-646.

Perry E., Velázquez-Oliman G., Marin L. (2002). The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. International Geology Review, 44, pp: 191-221.

Pochon A., Tripet J. P., Kozel D., Meylan B., Sinreich M., Zwahlen F. (2008). Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland. Hydrogeology Journal, 16, 1267–1281.

Qian J., Zhan H., Wu Y., Li F., Wang J. (2006). Fractured-karst spring-flow protections: a case study in Jinan, China. Hydrogeology Journal, 14, 1192–1205.

Rojas F. A. Y., Pacheco A. J. G., Esteller A. M. V., Camargo V. M. A., Sansores C. S. A. (2015). Spatial distribution of nitrate health risk associated with groundwater use as drinking water in Merida. Journal of Applied Geography, 65, 49-57.

Shiklomanov I. A. (2002). World water resources a new appraisal and assessment for the 21st century. United Kingdom: UNESCO.

Sosa V. K. (2014). Vulnerabilidad del agua subterránea mediante el método COP en el estado de Yucatán. Tesis de maestría Opción Ambiental. Universidad Autónoma de Yucatán.

Srinivasa R. Y., Jugran D. K. (2003). Delineación de las zonas potenciales y las zonas con calidad aceptable para uso domestico, propuestas usando sensores y SIG. Revista de ciencias hidrológicas, 48 (5), 821-833.

USEPA. (2013). Integrated risk information system (IRIS), United States Environment Protection Agency, Washington.

USEPA. 2001. Risk Assessment guidance for superfund: Volume III - Part A, Porcess for conducting probabilistic risk assessment, United States Environment Protection Agency, Washington.

USEPA (1987). United States Environmental Protection Agency. Guidelines for delineation of wellhead protection areas. Office of Groundwater Protection.

Van-Westen CJ (1997) Hazard, vulnerability and risk analysis. En: ILWIS 2.1 for Windows. The Integrated Land and Water Information System. Applications Guide. ILWIS Department International Institute for Aerospace Survey Earth Sciences Enschede, The Netherlands. 352 p.

WhAEM (2000). Wellhead Analytical Element Method Working with WhAEM2000. Office of Research and Development. Washington, DC.

Wick K., Heumesser C., Schmid E. (2012). Groundwater nitrate contamination: Factors and indicators. Journal of Environmental Management, 111, 178-186.

Zaporozec A. (2001). Contaminant source inventory. In: Zaporozec, A. (Ed.) Groundwater contamination inventory a methodological guideline. UNESCO. Paris.

Zhang U. H., Hiscock K. M. (2011). Modelling the effect of forest cover in mitigating nitrate contamination of groundwater: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands. Journal of Hydrology, 399 , 212–225.

Zwahlen F. (2003). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, scope, goal, results. European Commission, COST Action 620, Belgium.

APÉNDICES

Lecturas de niveles freáticos (Octubre 2012 a Marzo del 2013)

FECHA		10/10/2012	20/10/2012	01/11/2012	17/11/2012	01/12/2012	24/01/2013	07/02/2013	23/02/2013	07/03/2013
No. DE POZO	COTA TOPOGRÁFICA BROCAL	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)
1	ND	9.90	9.78	9.85	9.91	9.95	10.04	10.07	10.11	10.15
2	11.425	10.11	10.00	10.06	10.11	10.15	10.29	10.31	10.34	10.35
J22	10.39	ND	9.06	9.05	9.08	9.12	9.26	9.27	9.30	9.33
J21	11.81	ND	10.54	10.54	10.56	10.60	10.75	10.77	10.80	10.83
J7	11.313	ND	9.76	9.76	9.79	9.83	9.97	9.99	10.02	10.05
J3	11.144	ND	9.50	9.50	9.53	9.57	9.72	9.74	9.76	9.78
J2A	10.484	ND	8.91	8.91	8.95	9.00	9.14	9.16	9.19	9.22
12	10.926	9.33	9.30	9.29	9.31	9.36	9.50	9.53	9.55	9.58
3	ND	9.01	8.95	8.94	8.97	9.00	9.15	9.18	9.20	9.23
6	ND	11.27	11.21	11.21	11.23	11.27	11.40	11.43	11.45	11.49
4	ND	8.76	8.73	8.71	8.73	8.77	8.91	8.93	8.95	8.99
5	14.100	12.40	12.35	12.34	12.36	12.40	12.54	12.56	12.59	12.62
14	15.05	13.78	13.77	13.80	13.84	13.87	14.00	14.03	14.05	14.08
15	13.68	11.98	11.94	11.93	11.95	12.00	12.13	12.15	12.17	ND
17	12.409	10.74	10.71	10.73	10.76	10.80	10.95	10.95	10.98	11.00
7	10.565	9.00	8.91	8.95	9.02	9.06	9.21	9.25	9.25	9.29
8	9.832	8.22	8.18	8.17	8.21	8.25	8.40	8.42	8.45	8.48
9A	12.155	10.31	10.27	10.29	10.34	10.37	10.46	10.50	10.53	10.55

Lecturas de niveles freáticos (Junio del 2013 a Abril del 2014)

FECHA		12/06/2013	26/06/2013	11/07/2013	10/09/2013	01/10/2013	19/10/2013	27/11/2013	16/12/2013	16/01/2014	30/01/2014	13/02/2014	06/03/2014	20/03/2014	10/04/2014	29/04/2014
No. DE POZO	COTA TOPOGRÁFICA BROCAL	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)	NIVEL ESTÁTICO (N.E.)
		1	ND	10.11	10.02	10.03	9.52	9.38	9.36	9.22	9.26	9.23	9.29	9.28	9.39	9.46
2	11.425	10.36	10.29	10.26	9.85	9.61	9.57	9.41	9.44	9.43	9.48	9.50	9.59	9.64	9.75	9.82
J22	10.39	9.30	9.22	9.12	8.80	8.49	8.41	8.18	8.18	8.20	8.23	8.26	8.33	8.39	8.47	8.55
J21	11.81	10.88	10.80	10.71	10.38	10.07	10.00	9.76	9.75	9.78	9.81	9.84	9.91	9.97	10.02	10.13
J7	11.313	9.89	9.81	9.74	9.40	9.10	9.03	8.80	8.80	8.82	8.84	8.88	8.92	8.97	9.05	9.13
J3	11.144	9.71	9.60	9.53	9.19	8.89	8.81	8.60	8.60	8.61	8.64	8.67	8.74	8.80	8.88	8.96
J2A	10.484	8.95	8.87	8.79	8.46	8.16	8.07	7.86	7.86	7.88	7.91	7.94	8.00	8.06	8.14	8.22
12	10.926	9.66	9.59	9.53	9.19	8.90	8.82	8.60	8.60	8.62	8.66	8.69	8.75	8.81	8.90	8.97
3	ND	9.34	9.27	9.20	8.86	8.56	8.48	8.25	8.24	8.28	8.30	8.34	8.41	8.46	8.56	8.62
6	ND	11.58	11.50	-----	11.13	10.80	10.72	10.50	10.50	10.54	-----	10.60	10.67	10.72	10.81	10.88
4	ND	9.56	9.49	9.40	-----	8.80	8.71	8.47	8.47	8.52	8.54	8.55	8.55	8.70	8.79	8.85
5	14.100	12.71	12.63	12.56	12.25	11.94	11.86	11.63	11.63	11.68	11.70	11.74	11.81	11.86	11.95	12.01
14	15.05	14.05	14.03	13.93	13.53	13.29	13.32	13.12	13.14	13.18	13.22	13.26	13.34	13.38	1.47	13.53
15	13.68	12.30	12.22	12.16	11.87	11.53	11.45	11.23	11.20	11.25	11.26	11.29	11.35	11.43	11.52	11.58
16=19	13.602	13.65	13.58	13.50	13.21	12.87	12.80	12.58	12.57	12.16	12.63	12.67	12.74	12.80	12.88	12.95
17	12.409	11.08	10.98	10.95	10.60	10.30	10.24	10.03	10.03	10.04	10.06	10.10	10.17	10.24	10.32	10.39
20	12.477	10.64	10.54	10.53	10.07	9.87	9.82	9.56	9.67	9.67	9.71	9.71	9.81	9.87	9.96	10.04
7	10.565	9.28	9.22	9.20	9.75	8.51	8.49	8.33	8.36	8.36	8.41	8.44	8.52	8.59	8.68	8.75
8	9.832	8.58	8.52	8.45	7.94	7.78	7.69	7.45	7.45	7.48	7.54	7.27	7.68	7.73	7.82	7.89
9A	12.155	10.52	10.48	10.42	10.00	9.79	9.84	9.67	9.71	9.75	9.79	9.82	9.89	9.94	10.00	10.05
10=21	11.899	10.26	10.26	10.18	9.70	9.57	9.63	9.48	9.50	9.56	9.61	9.63	9.70	9.74	9.81	9.85

Niveles piezométricos (Junio del 2013 a Abril del 2014)

FECHA		12/06/2013	26/06/2013	11/07/2013	10/09/2013	01/10/2013	19/10/2013	27/11/2013	16/12/2013	16/01/2014	30/01/2014	13/02/2014	06/03/2014	20/03/2014	10/04/2014	29/04/2014
No. DE POZO	COTA TOPOGRÁFICA BROCAL	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA	CARGA
		HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA	HIDRAULICA
2	11.425	1.07	1.14	1.17	1.58	1.82	1.86	2.02	1.99	2.00	1.95	1.93	1.84	1.79	1.68	1.61
J22	10.39	1.09	1.17	1.27	1.59	1.90	1.98	2.21	2.21	2.19	2.16	2.13	2.06	2.00	1.92	1.84
J21	11.81	0.93	1.01	1.10	1.43	1.74	1.81	2.05	2.06	2.03	2.00	1.97	1.90	1.84	1.79	1.68
J7	11.313	1.42	1.50	1.57	1.91	2.21	2.28	2.51	2.51	2.49	2.47	2.43	2.39	2.34	2.26	2.18
J3	11.144	1.43	1.54	1.61	1.95	2.25	2.33	2.54	2.54	2.53	2.50	2.47	2.40	2.34	2.26	2.18
J2A	10.484	1.53	1.61	1.69	2.02	2.32	2.41	2.62	2.62	2.60	2.57	2.54	2.48	2.42	2.34	2.26
12	10.926	1.27	1.34	1.40	1.74	2.03	2.11	2.33	2.33	2.31	2.27	2.24	2.18	2.12	2.03	1.96
5	14.100	1.39	1.47	1.54	1.85	2.16	2.24	2.47	2.47	2.42	2.40	2.36	2.29	2.24	2.15	2.09
14	15.05	1.00	1.02	1.12	1.52	1.76	1.73	1.93	1.91	1.87	1.83	1.79	1.71	1.67	13.58	1.52
15	13.68	1.38	1.46	1.52	1.81	2.15	2.23	2.45	2.48	2.43	2.42	2.39	2.33	2.25	2.16	2.10
17	12.409	1.33	1.43	1.46	1.81	2.11	2.17	2.38	2.38	2.37	2.35	2.31	2.24	2.17	2.09	2.02
7	10.565	1.29	1.35	1.37	0.82	2.06	2.08	2.24	2.21	2.21	2.16	2.13	2.05	1.98	1.89	1.82
8	9.832	1.25	1.31	1.38	1.89	2.05	2.14	2.38	2.38	2.35	2.29	2.56	2.15	2.10	2.01	1.94
9A	12.155	1.64	1.68	1.74	2.16	2.37	2.32	2.49	2.45	2.41	2.37	2.34	2.27	2.22	2.16	2.11