



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOBRE LOS RECURSOS NATURALES

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE DOCTORADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

“ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA ACUIFERO UBICADO AL
PONIENTE DE MORELIA, MICHOACAN”

TESIS

QUE PRESENTA EL

M. EN C. JOSÉ PÉREZ VILLARREAL

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

DIRECTOR DE TESIS

JORGE ALEJANDRO ÁVILA OLIVERA

CODIRECTOR

ISABEL ISRADE ALCÁNTARA

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO.

AGOSTO 2018

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera**, quien fue mi asesor, usted siempre me tendió su mano para orientarme y apoyarme durante todo el trabajo de tesis, le agradezco mucho su confianza y el trato amable que habla de su gran calidad humana.

A la **Dra. Isabel Israde Alcántara**, sus conocimientos geológicos fueron fundamentales para darle forma a este trabajo, usted nos abrió muchas puertas, le agradezco sus palabras de aliento en los momentos difíciles.

Al **Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy**, por sus acertadas observaciones al trabajo de tesis, usted con su trabajo de muchos años ha sentado gran parte del conocimiento geológico que ha permitido sustentar esta tesis.

Al **Dr. Otoniel Buenrostro Delgado**, por sus consejos y observaciones, en especial su ayuda en la preparación y presentación del examen predoctoral, usted siempre ha estado presente, muchas gracias.

Al **Dr. José Jaime Alejandro Carrillo Chávez**, por dedicar tiempo a revisar el trabajo de tesis.

Al **Dr. Javier Gustavo Heredia Díaz**, por recibirme en la estancia de investigación en el IGME, su asesoría en la modelación del sistema acuífero fue muy valiosa.

A las autoridades de la **Comisión Nacional del Agua** y del **Organismo Operador de Agua Potable y Saneamiento** por permitirnos acceder a las bases de datos hidrogeológicos de la zona Morelia-Capula y por apoyarnos en el acceso a los pozos para tomar las muestras de agua subterránea.

A la **M. en C. Carolina Muños Torres** del Centro de Geociencias y el **Dr. Ciro Eliseo Márquez Herrera** de la Facultad de Química, ambos de la UNAM, por apoyarnos en el análisis de las muestras.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por otorgarme la beca doctoral que hizo posible concluir mis estudios de posgrado.

Al **Instituto Tecnológico Superior de Uruapan** por darme el permiso laboral y apoyo para cursar los estudios de doctorado.

DEDICATORIAS

A mi esposa **Rosalba Leticia** por su amor, constante apoyo y valentía para recorrer juntos esta aventura que fue el estudio del Doctorado.

A mis hijos **Sebastián y Diana**, por ser mi fuente de motivación, los amo, gracias por existir.

A mi padre **Carlost**, mi mama **Lidia**, a mis hermanos **Jesús, Carlos, Carlost e Israelt**, siempre los llevo en mi corazón.

A mis **profesores** por darme la oportunidad de ver el mundo desde sus ojos.

A mis **amigos** por la alegría que le dan a la vida.

A todas las personas que de una forma u otra ayudaron a elaborar esta tesis, especialmente a mis compañeros del **INIRENA** y del **IGME** este fruto es producto de muchas semillas.

RESUMEN

La zona Morelia-Capula es un área de 128 km² ubicada entre las localidades de Morelia y Capula. La zona es de interés en términos hidrogeológicos ya que sus más de 120, 000 habitantes dependen en un 100% del sistema acuífero para abastecer la demanda de agua, sin embargo existen factores que ponen en riesgo su calidad y cantidad. La calidad debido a que en la zona se ubica el antiguo tiradero municipal ubicado sobre materiales geológicos permeables y una falla geológica, operó por más de 23 años (1984-2007), recibiendo un promedio de 700 toneladas diarias de residuos (municipales, manejo especial y peligrosos) sin contar con medidas para el manejo de lixiviados. Además en la zona Morelia-Capula el manejo de las aguas residuales domésticas es inadecuado, ya que estas se descargan en canales que carecen de impermeabilización. También existen actividades agrícolas de temporal que son un riesgo debido al potencial de percolación de agroquímicos al acuífero. La cantidad de agua subterránea es también una preocupación, ya que cada año se presentan abatimientos que en casos extremos pueden alcanzar los 10 m, ocasionando que varios pozos tengan que ser reperforados a mayores profundidades para poder seguir operando. Para generar conocimiento enfocado a entender los fenómenos que influyen en la calidad y cantidad del agua subterránea de la zona Morelia-Capula se procedió a reconocer la dinámica del sistema acuífero, para ello se generó y recopiló información para conformar un modelo hidrogeológico, se caracterizaron químicamente muestras de agua subterránea, se caracterizaron los sistemas de flujo, y finalmente se desarrolló un modelo matemático para representar la superficie piezométrica en un periodo de 44 años (1994-2038). Los resultados indican que en la zona Morelia-Capula existe un sistema acuífero conformado por dos unidades hidrogeológicas, una volcánica de tipo confinada que abarca la mayor parte de la zona y otra que le sobreyace compuesta por materiales terrígenos de tipo semiconfinada y en algunas partes libre. La piezometría medida en el año 2015 ubica el nivel estático en un promedio de 74.63 m, al comparar este dato con el del año 1994 se encuentra que en 21 años el sistema acuífero se ha abatido 44.63 m. En lo concerniente al antiguo tiradero municipal y su relación con la calidad del agua subterránea se encontró que no existe una afectación al sistema acuífero que sea evidente en los parámetros analizados (iones mayores, iones menores, elementos traza y fisicoquímicos). La caracterización de los sistemas de flujo de agua subterránea muestra que la zona Morelia-Capula actúa como un área de tránsito y descarga para el sistema acuífero, donde interactúan sistemas locales, intermedios y regionales, siendo el sistema intermedio el que abastece a la mayor parte de los pozos. La modelación matemática muestra que la superficie piezométrica, tiene un comportamiento diferencial tanto espacial como temporal, hacia el final del periodo de modelación los niveles se mantienen prácticamente estables en Capula, los abatimientos extremos alcanzan 250 m.

Palabras clave: Tiradero municipal, abatimiento, zona Morelia-Capula, sistemas de flujo, modelación matemática.

ABSTRACT

The Morelia-Capula zone is an area of 128 km² located between the localities of Morelia and Capula. The zone is of interest in hydrogeological terms due to its more than 120, 000 inhabitants depend on 100% of the aquifer system to supply the water demand, however there are factors that put their quality and quantity at risk. The quality due to the fact that the old municipal landfill located in the area, is sited over permeable geological materials and a geological fault, the landfill worked for more than 23 years (1984-2007), receiving an average of 700 tons of waste per day (municipal, special and hazardous wastes) without having measures for leachate management. Furthermore, in the Morelia-Capula zone, the management of domestic wastewater is inadequate, since these are discharged in canals that lack waterproofing. There are also agricultural activities (during the rainy season) that are a risk due to the potential of percolation of agrochemicals to the aquifer. The quantity of groundwater is also a concern, since every year there are groundwater table depletion that in extreme cases can reach 10 m, causing that several wells need to be re-drilled at greater depths in order to continue their operation. To generate knowledge focused on understanding the phenomena that influence the quality and quantity of groundwater in the Morelia-Capula area, it proceeded to recognize the dynamics of the aquifer system, for which information was generated and compiled to build a hydrogeological model, groundwater samples were chemically characterized, the flow systems were characterized, and finally a mathematical model was developed to represent the piezometric surface in a period of 44 years (1994-2038). The results indicate that in the Morelia-Capula area there is an aquifer system consisting of two hydrogeological units, one volcanic that is confined that covers most of the area, and another that overlies it composed of terrigenous materials that is semiconfined and in some parts unconfined. The piezometry measured in 2015 situate the static level at an average of 74.63 m, when comparing this data with that of the year 1994 it is found that in 21 years the groundwater levels have dropped 44.63 m. Regarding the old municipal landfill and its relation to the quality of groundwater, it was found that there is not affectation to the aquifer system that be evident in the parameters analyzed (major ions, minor ions, trace elements and physicochemical). The characterization of the groundwater flow systems shows that the Morelia-Capula zone acts as a transit and discharge area for the aquifer system, where local, intermediate and regional systems interact, where the majority of wells extract it water from the intermediate system. Mathematical modeling shows that the piezometric surface has a differential behavior, at the center (where the large housing developments are located) and northeast of the study area there are abatement cones, towards Capula the levels remain practically stable, at the end of the modeling period the extreme groundwater level reach 250 m depth.

Keywords: Municipal dump, depletion, Morelia-Capula zone, flow systems, mathematical modeling.

INDICE

INDICE DE TABLAS	9
INDICE DE FIGURAS	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Introducción.....	12
1.2 Antecedentes	14
1.2.1 Evolución del aprovechamiento del agua en la ciudad de Morelia	14
1.2.2 Estudios sobre el efecto de los lixiviados en la calidad del agua subterránea.....	15
1.2.2.1 Casos de contaminación de acuíferos por lixiviados en el ámbito internacional	15
1.2.2.2 La contaminación de acuíferos por lixiviados en México.....	17
1.2.2.3 El contexto estatal y local de la contaminación por lixiviados a las aguas subterráneas.....	19
1.2.3 Investigaciones hidrogeológicas en la ciudad de Morelia	21
PROBLEMA DE INVESTIGACION	25
PREGUNTAS DE INVESTIGACION.....	25
HIPOTESIS.....	26
OBJETIVOS	26
Objetivo general.....	26
Objetivos particulares	26
CAPITULO 2: CARACTERIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO	27
2.1 Ubicación de la zona de estudio	27
2.2 Caracterización del medio geológico	29
2.2.1 Contexto geológico regional	29
2.2.2 Geología superficial	31
2.2.3 Geología del subsuelo	32
2.2.4 Geología estructural.....	38
2.3 Caracterización hidrológica.....	41
2.3.1 Rasgos generales	41
2.3.2 Estimación de las lluvias.....	43
2.3.3 Estimación de la recarga por lluvias	45
2.3.4 Uso y consumo del agua	47
2.4 Caracterización hidrogeológica.....	50

2.4.1 Rasgos hidrogeológicos generales	50
2.4.2 Pruebas de bombeo.....	55
2.4.3 Modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio.....	70
CAPITULO 3: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA INFILTRACIÓN DE LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL ANTIGUO TIRADERO MUNICIPAL	72
3.1 La problemática ambiental asociada al antiguo tiradero municipal de Morelia	72
3.2 Evaluación del efecto de la infiltración de lixiviados en la calidad del agua subterránea de la zona Morelia-Capula	75
3.2.1 Toma, transporte y almacenamiento de muestra.....	75
3.2.2 Análisis fisicoquímicos del agua subterránea	75
3.2.3 Análisis químicos del agua subterránea	77
3.3 Resultados y Discusión de la evaluación del efecto de la infiltración de lixiviados	79
3.3.1 Análisis fisicoquímicos	79
3.3.2 Análisis de iones mayores y menores.....	85
3.3.3 Análisis de elementos traza	87
CAPITULO IV: CARACTERIZACION DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA ZONA MORELIA-CAPULA.....	90
4.1 El contexto de los sistemas de flujo de agua subterránea	90
4.2 Generación de un índice para clasificar los sistemas de flujo de agua subterránea	93
4.2.1 Selección de los parámetros para clasificar sistemas de flujo	93
4.2.2 Determinación de los rangos de clasificación para cada parámetro.....	94
4.2.3 Generación del índice para clasificar los flujos.	96
4.2.4 Aplicación del I_F a casos de estudio	98
4.2.5 Aplicación del I_F en diferentes medios geológicos	99
4.3 Resultados y discusión de la identificación de los sistemas de flujo de agua subterránea en el poniente de Morelia.....	101
CAPITULO 5: MODELACION MATEMÁTICA DEL SISTEMA ACUÍFERO UBICADO AL PONIENTE DE MORELIA	111
5.1 Bases teóricas para la modelación matemática de acuíferos	111
5.1.1 Introducción a la modelación matemática de acuíferos	111
5.1.2 Principios matemáticos que rigen el flujo del agua subterránea	115
5.1.3 Funcionamiento del algoritmo MODFLOW	120
5.1.4 Características del software Modelmuse	122

5.2 Desarrollo del modelo matemático del sistema acuífero ubicado al poniente de Morelia	123
5.2.1 Discretización espacial y temporal del modelo matemático	124
5.2.2 Elementos representados en la modelación	126
5.2.3 Calibración del modelo	129
5.3 Resultados y discusión de la modelación matemática	129
CONCLUSIONES GENERALES	132
RECOMENDACIONES	135
REFERENCIAS	136
ANEXOS	148
Coordenadas de los sitios de estudio	148
Análisis fisicoquímicos y químicos de las muestras de agua subterránea	150
Aforos de los pozos incluidos en la modelación	156
Trabajos publicados y (o) aceptados	157

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Concentrado de información Internacional de casos de lixiviados contaminando aguas subterráneas.	16
Tabla 1.2 Concentrado de información nacional de casos de lixiviados contaminando aguas subterráneas.	19
Tabla 1.3 Concentrado de información estatal y local de casos de lixiviados contaminando aguas subterráneas	21
Tabla 2.1 Concentrado de información de la precipitación en la zona Morelia-Capula.	44
Tabla 2.2 Concentrado de información de la temperatura en la zona Morelia-Capula.	45
Tabla 2.3 Estimación de la infiltración en la zona Morelia-Capula.	46
Tabla 2.4 Estimación de la extracción de agua subterránea en la zona Morelia-Capula.	48
Tabla 2.5 Información histórica de los abatimientos de pozos ubicados dentro de la zona de estudio.	52
Tabla 2.6 Resultados de las pruebas de bombeo. Las fechas con asterisco son aproximadas.	67
Tabla 3.1 Análisis de varianza de parámetros fisicoquímicos de muestras de agua subterránea obtenidas durante el primer y segundo muestreo.	84
Tabla 3.2 Análisis de varianza de parámetros fisicoquímicos de muestras de agua subterránea donde se comparan el primer y segundo muestreo.	84
Tabla 4.2 Revisión bibliográfica de rangos de temperatura, sólidos disueltos totales (SDT) y profundidad, en diferentes casos de estudio donde se clasificó puntualmente el tipo de flujo de agua subterránea.	95
Tabla 4.3 Rangos de temperatura, sólidos disueltos totales y profundidad para clasificar flujos de agua subterránea.	96
Tabla 4.4 Escala para clasificar el tipo de flujo de agua subterránea a partir del IF.	97
Tabla 4.5 Comparación del tipo de flujo en base al autor y al IF.	98
Tabla 4.6 Porcentaje de similitud del tipo de flujo respecto al autor y al IF.	99
Tabla 4.7 Aplicación del IF a diferentes tipos de acuíferos.	100
Tabla 4.8 Índices de flujo de la zona de estudio.	102
Tabla A.1 Coordenadas de los sitios de estudio.	148
Tabla A.2 Análisis fisicoquímicos del primer muestreo.	150
Tabla A.3 Iones mayores y menores del primer muestreo.	151
Tabla A.4 Elementos traza del primer muestreo.	152
Tabla A.5 Análisis fisicoquímicos del segundo muestreo.	153
Tabla A.6 Iones mayores y menores del segundo muestreo.	154
Tabla A.7 Elementos traza del segundo muestreo.	155
Tabla A.8 Listado de pozos (activos) considerados en la modelación. Los valores subrayados indican valores aproximados.	156

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Lixiviados y lodos emanados por el antiguo tiradero municipal de Morelia	24
Figura 2.1 Localización de la zona de estudio.....	27
Figura 2.2 Microlocalización de la zona de estudio	28
Figura 2.3 Localización de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM).....	29
Figura 2.4 Modelo digital de elevación	30
Figura 2.5 Geología superficial de la zona Morelia-Capula	31
Figura 2.6 Secciones geológicas de la zona de estudio.....	33
Figura 2.7 Sección geológica 1.	33
Figura 2.8 Sección geológica 2.	34
Figura 2.9 Sección geológica 3.	34
Figura 2.10 Sección geológica 4.	35
Figura 2.11 Sección geológica 5.	35
Figura 2.12 Sección geológica 6.	36
Figura 2.13 Sección geológica 7.	36
Figura 2.14 Ubicación de los materiales fluviolacustres (paleolago).	37
Figura 2.15 Sistema de fallas regional de la zona de estudio.....	38
Figura 2.16 Principales fallas de la ciudad de Morelia.....	39
Figura 2.17 Geología estructural de la zona de estudio..	40
Figura 2.18 Ubicación de la zona Morelia-Capula en la cuenca del lago de Cuitzeo	41
Figura 2.19 Ubicación de la zona de estudio en la subcuenca Morelia-Capula. ..	42
Figura 2.20 Ubicación de las estaciones meteorológicas en la subcuenca Morelia-Capula.....	43
Figura 2.21 Áreas de cultivo y urbanas en la zona Morelia-Capula.....	47
Figura 2.22 Manantiales, fallas geológicas y ubicación de materiales fluviolacustres en la zona de estudio.....	51
Figura 2.23 Superficie piezométrica de la zona Morelia-Capula.....	54
Figura 2.24 Sitios donde se realizaron pruebas de bombeo.	55
Figura 2.25 Prueba de bombeo del pozo 1 (23 de Marzo).	57
Figura 2.26 Prueba de bombeo del pozo 2 (La Esperanza).	57
Figura 2.27 Prueba de bombeo del pozo 3 (Ricardo Flores Magón).	58
Figura 2.28 Prueba de bombeo del pozo 4 (San Isidro Itzícuar).	58
Figura 2.29 Prueba de bombeo del pozo 5 (San José Itzícuar).	59
Figura 2.30 Prueba de bombeo del pozo 6 (Arko San Antonio).	59
Figura 2.31 Prueba de bombeo del pozo 7 (Mariano Abasolo).	60
Figura 2.32 Prueba de bombeo del pozo 8 (Tzindurio Sarh).	60
Figura 2.33 Prueba de bombeo del pozo 9 (San Juanito Itzícuar).	61
Figura 2.34 Prueba de bombeo del pozo 10 (Ario de 1815).	61
Figura 2.35 Prueba de bombeo del pozo 12 (Villa Magna 3).	62
Figura 2.36 Prueba de bombeo del pozo 13 (Villas del Pedregal 1).	62
Figura 2.37 Prueba de bombeo del pozo 15 (Ignacio Allende).	63
Figura 2.38 Prueba de bombeo del pozo 16 (Residencial Tinijaro).	63
Figura 2.39 Prueba de bombeo del pozo 17 (Héroes Republicanos).	64
Figura 2.40 Prueba de bombeo del pozo 18 (Arko San Juan).	64

Figura 2.41 Prueba de bombeo del pozo 20 (Capula 2).....	65
Figura 2.42 Prueba de bombeo del pozo 23 (La Maestranza).....	65
Figura 2.43 Prueba de bombeo del pozo 26 (El Cerrito Itz'icuaró).....	66
Figura 2.44 Prueba de bombeo del pozo 38 (Tanganxoan).	66
Figura 2.45 Distribución espacial del comportamiento del acuífero en base a la interpretación de las pruebas de bombeo.	68
Figura 2.46 Valores de la transmisividad en la zona de estudio.....	69
Figura 2.47 Modelo conceptual de la zona de estudio.	71
Figura 3.1 Ubicación del tiradero Municipal de Morelia	73
Figura 3.3 Valor de la temperatura del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.	79
Figura 3.4 Valor del pH del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.....	80
Figura 3.5 Valor de la conductividad eléctrica del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.	81
Figura 3.6 Valor del potencial de óxido-reducción del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.	81
Figura 3.7 Valor del oxígeno disuelto del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.	82
Figura 3.8 Agrupamiento de sitios respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.....	83
Figura 3.9 Comparativos de los valores de los sólidos disueltos totales de los dos muestreos.....	86
Figura 3.10 Elementos que superaron la norma, muestreo abril-mayo y noviembre-diciembre.....	88
Figura 3.11 Geología a detalle del antiguo tiradero municipal y nivel piezométrico del año 2015.....	89
Figura 4.1 Índices de flujo de la zona Morelia-Capula.....	105
Figura 4.2 Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea.	106
Figura 4.3 Modelo conceptual de los sistemas de flujo de la zona Morelia-Capula.	108
Figura 5.1 Ejemplo de mallado por diferencias finitas y mallado por elementos finitos.....	112
Figura 5.2 Diagrama general del proceso de modelación	114
Figura 5.3 Diagrama esquemático de los elementos de la ecuación de Darcy. .	115
Figura 5.4 Diagrama esquemático del movimiento del agua subterránea en una unidad acuífera de forma cúbica.	116
Figura 5.5 Celdas que rodean una celda central.....	121
Figura 5.6 Zona donde se realizó la modelación matemática, en color salmón se muestran los asentamientos humanos.....	124
Figura 5.7 Vista en planta del modelo matemático.....	125
Figura 5.8 Representación tridimensional de las unidades hidrogeológicas de la zona Morelia-Capula.	128
Figura 5.9 Evolución de la superficie piezométrica del año 1995 al 2038.	131

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La Ciudad de Morelia es la Capital del estado y la localidad más poblada de Michoacán. Morelia concentra varias actividades, resaltando las industriales, académicas y administrativas que en su conjunto convierten a la ciudad en un polo de desarrollo económico estatal que atrae a personas que finalmente se establecen, por lo tanto el crecimiento poblacional es una constante. El incremento poblacional ha generado un crecimiento de la zona urbana particularmente hacia la periferia. El crecimiento de Morelia ha implicado una mayor demanda de servicios, donde el agua juega un papel central ya que las fuentes de abastecimiento se encuentran limitadas a tres opciones la Presa de Cointzio (22.66%), manantiales (33.41%) y la red de pozos profundos (43.93%) (Ávila y Garduño 2007). El agua subterránea es uno de los recursos más importantes ya que es la única fuente de abastecimiento de varias zonas de Morelia, como es el caso de la zona Morelia-Capula donde se requiere reconocer tanto la dinámica del sistema acuífero, como el efecto del antiguo tiradero municipal sobre la calidad del agua.

La cercanía del relleno sanitario a la mancha urbana de Morelia implica un riesgo, ya que los residuos municipales desprenden lixiviados, los cuales contienen diferentes componentes entre los cuales están los elementos traza, entre ellos los elementos pesados (Vaverková y Adamcová 2014). Los elementos traza pueden moverse en los acuíferos y llegar hasta los pozos que abastecen de agua a las poblaciones. Los materiales geológicos entorno a un sitio de disposición de residuos municipales pueden facilitar o contener la migración de elementos traza en un acuífero. Sin embargo, existen ejemplos que evidencian que los sitios para disponer de los residuos municipales pocas veces cumplen con los criterios geológicos adecuados (Israde-Alcántara et al. 2009; Bernache 2012). El antiguo tiradero de la Ciudad de Morelia se encuentra ubicado sobre materiales permeables compuestos por una secuencia de flujos de lavas fracturados,

depósitos de caída no consolidados y estratos de materiales fluviolacustres (Israde-Alcántara et al. 2005). Aunado a la presencia de materiales permeables en el subsuelo del antiguo tiradero municipal de Morelia, también es de considerarse la cercanía a los desarrollos habitacionales (a menos de dos kilómetros), los cuales satisfacen su demanda de agua por medio de pozos de extracción que se encuentran en riesgo de ser contaminados por lixiviados. Otro factor de riesgo es la ubicación geográfica del antiguo tiradero municipal, ya que se encuentra en una zona alta, lo que implica la posibilidad de que los flujos de agua subterránea arrastren los contaminantes hacia los desarrollos habitacionales que se localizan a una menor altitud. Estudios previos (Verduzco 2010; Israde-Alcántara et al. 2005) han evidenciado que en sitios cercanos al antiguo tiradero municipal de Morelia existe una afectación por elementos traza a las aguas subterráneas, por lo cual es necesario estudiar el avance de la contaminación.

En la zona Morelia-Capula existen abatimientos acelerados de los niveles piezométricos, por lo que es necesario estudiar el movimiento del agua subterránea para entender los fenómenos de interés en la zona Morelia-Capula. Se observará que durante el desarrollo del presente trabajo se abordaran diversos temas que en su conjunto dan sentido y sustento a la presente tesis.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Evolución del aprovechamiento del agua en la ciudad de Morelia

La ciudad de Morelia fue fundada en el año 1541. En sus inicios la ciudad se abastecía de agua de los ríos que surcaban la ciudad. El río Chiquito fue la principal fuente de abastecimiento hasta mediados del siglo XX (Sánchez y Urquijo 2014). En el año 1549 se construyó un acueducto el cual ha pasado por varias fases de construcción y reconstrucción, permitiendo el abastecimiento y distribución de agua a la ciudad por medio de un sistema de fuentes (Carreón 2014). Al pasar el tiempo la ciudad de Morelia fue incrementando su población y con ello la demanda de agua. Por lo cual fue necesario buscar otras fuentes de suministro, recurriendo a los cuerpos superficiales de agua cercanos a la ciudad. Así se inició el aprovechamiento de la presa de Cointzio en el año 1952 (Sánchez y Urquijo 2014), para lo cual fue necesario desarrollar las obras hidráulicas correspondientes que son la cortina, tubería y planta de potabilización, aunque con la desventaja de que este cuerpo de agua está sujeto a las variaciones estacionales de precipitación, por lo tanto su volumen de explotación es variable durante el año. Al continuar la expansión de Morelia la red hidráulica de la ciudad fue captando el líquido proveniente de los manantiales agua de la zona (Sánchez y Urquijo 2014). Uno de los principales manantiales que aporta agua durante todo el ciclo anual es la Mintzita, ubicada al sur de la ciudad de Morelia. Sin embargo aún con el desarrollo de la red hidráulica de la ciudad de Morelia la presa de Cointzio y los manantiales no proporcionan el suficiente aporte para satisfacer las necesidades de la población. Por lo que ha sido necesario recurrir a la explotación del acuífero, los primeros pozos profundos se construyeron en la década de los setentas. En la actualidad el acueducto y las fuentes han dejado de surtir agua, y se han convertido en elementos estéticos de la ciudad, dejando el abastecimiento a la presa de Cointzio, los manantiales y los pozos. Según datos de Ávila (2007) el abastecimiento de agua de la ciudad de Morelia (3 648.56 litros por segundo) se distribuye en manantiales (33.41%), la presa de Cointzio (22.66%) y la red de

pozos (43.93%). Se resalta que la mayor fuente de agua de la ciudad proviene de aprovechamientos subterráneos.

El incremento en el uso de las aguas subterráneas ha tenido efectos negativos en los mantos acuíferos de la ciudad de Morelia, evidenciándose signos de sobreexplotación, como el abatimiento de los niveles piezométricos (Sánchez y Urquijo 2014; Ávila y Garduño 2007; Garduño et al. 2014).

1.2.2 Estudios sobre el efecto de los lixiviados en la calidad del agua subterránea

1.2.2.1 Casos de contaminación de acuíferos por lixiviados en el ámbito internacional

El manejo de los residuos y por lo tanto la generación de lixiviados es un problema común en la mayoría de los países del mundo. La problemática asociada al manejo de los residuos se agravó con la aparición de los grandes núcleos poblacionales los cuales requieren de sitios donde se canalicen los desechos producidos tanto en los hogares como en las actividades productivas. Los sitios destinados al manejo de residuos son causa de diversas problemáticas ambientales como la generación de malos olores, los incendios continuos y los lixiviados. En busca de eliminar los problemas asociados al manejo de residuos se han planteado diferentes opciones de manejo, como la incineración y la disposición final en rellenos sanitarios. Aunque estas opciones tienen la limitante de implicar un alto costo para su operación, por lo cual solo los municipios con el capital económico suficiente pueden adoptar medidas adecuadas para el manejo de residuos.

Existen diferentes ejemplos alrededor del mundo que evidencian la afectación a las aguas subterráneas por la infiltración de lixiviados. En la tabla 1.1 se presenta un concentrado de información donde se observan diferentes casos de lixiviados que contaminan aguas subterráneas. Comparando los diferentes casos se puede observar que la contaminación de acuíferos por lixiviados provenientes de la disposición final de residuos es un problema común en países

ricos y pobres. También se resalta que la contaminación por lixiviados tiene una componente importante que es el tipo de material geológico presente en el lugar, así como el volumen de residuos que recibe y el tipo de residuos peligrosos que se vierten. Se destaca que, al momento de seleccionar los lugares para disponer de los residuos, la geología local pasó a un segundo plano.

Aún los sitios clausurados representan una problemática ambiental ya que la generación de lixiviados continúa por varios años, inclusive algunos autores (Tremblay et al. 2014) señalan que la contaminación a los acuíferos podría continuar varias décadas.

Tabla 1.1 Concentrado de información Internacional de casos de lixiviados contaminando aguas subterráneas.

Lugar	Residuos recibidos por día (toneladas)	Afectaciones al agua subterránea	Tipo de acuífero	Referencia
Poblado La Guasima, Venezuela.	800	Incremento de Manganeseo y Aluminio, coliformes fecales y totales, sulfuros de hidrógeno y plaguicidas.	Granular.	(Polo y Guevara 2001)
Localidad de Coronel Moldes, Argentina.	11	Aumento de iones mayores, incremento de la carga microbiana (aerobia y anaerobia). Presencia de As, Cu y Pb. Incremento de la DQO y DBO, disminución del OD.	Arenoso-arcilloso de tipo libre.	(Gomez et al. 2009)
La Habana, Cuba.	3000	Aumento de la conductividad eléctrica, DBO y DQO.	-	(Espinosa et al. 2010)
Lagos, Nigeria.	-	Aumento de los sólidos disueltos, conductividad eléctrica y sodio. Presencia de entero bacterias.	-	(Aderemi et al. 2011)
Copenhague, Dinamarca.	-	Fenoles, herbicidas, hidrocarburos, solventes clorados, iones mayores, metales pesados.	Heterogéneo con capas de arcillas y arenas.	(Milosevic et al. 2012)
Tiruchirappalli, India.	470	Aumento de la	Aluvión.	(Kanmani y

		conductividad eléctrica, sólidos disueltos, DBO, DQO, iones mayores y metales pesados.		Gandhimathi 2013)
Changsha, China.	3600	Aumento de sólidos disueltos, DBO, iones mayores y elementos traza.	Granitos fracturados.	(Wang et al. 2013)
Tucumán, Argentina.	800	Alta concentración de materia orgánica y metales pesados.	Materiales aluviales no consolidados.	(Fernández et al. 2014)
Minnesota, EUA.	-	Compuestos orgánicos y metales pesados.	Arcillas y limos.	(Nolan et al. 2014)
Matang, Malasia.	2000	Aumentos de iones mayores y metales pesados.	Aluvión (limos, arenas, arcillas y gravas).	(Syafalni et al. 2014)
Saint Lambert de Lauzon, Canadá.	1000	-	Superficial, granular.	(Tremblay et al. 2014)
Dehtín, República Checa.	55	Incremento de la concentración de metales pesados.	-	(Vaverková y Adamcová 2014)
Norman, EUA.	350	Aumento en las concentraciones de cloro.	Aluvión.	(Masoner y Cozzarelli 2015)

1.2.2.2 La contaminación de acuíferos por lixiviados en México

En México el manejo de los residuos tiene su eslabón más débil en la disposición final (Bernache 2012; Reyes-Gutiérrez et al. 2013). Es usual que la disposición final de residuos se realice en lugares que no son aptos como barrancas, canteras y minas abandonadas. En la mayoría de los casos los sitios de disposición final de residuos carecen de las medidas mínimas de control de lixiviados, lo que lleva a que contaminen los cuerpos de aguas superficiales o se infiltren en el subsuelo afectando a las aguas subterráneas (Reyes-Gutiérrez et al. 2013). Situación que se agrava durante la época de lluvias, donde el volumen de lixiviados se multiplica (Polo y Guevara 2001).

Muchos de los sitios destinados actualmente para la disposición final de residuos municipales fueron construidos antes de la puesta en marcha de la NOM-083-ECOL-1994 (posteriormente sustituida por la NOM-083-SEMARNAT-2003),

por lo cual carecen de las medidas necesarias para contener los lixiviados. Es importante resaltar que previo a la puesta en marcha de la normatividad muchos de los tiraderos municipales recibían residuos peligrosos de tipo hospitalario e industrial (Israde-Alcántara et al. 2005) ya que dicha actividad no estaba penalizada, por lo cual en los lixiviados se pueden encontrar restos de compuestos químicos tóxicos y metales tóxicos. Otra situación que complica los casos de contaminación de acuíferos por lixiviados son los antiguos tiraderos ya clausurados, los cuales aunque fueron cerrados seguirán emitiendo contaminantes por varios años (Tremblay et al. 2014). A nivel nacional existe poca información sobre la cantidad de tiraderos clausurados (Buenrostro e Israde 2003) y aún menos de aquellos clandestinos, por lo cual se desconoce a ciencia cierta su impacto sobre los cuerpos de aguas subterráneos. Con la puesta en marcha de norma NOM-083-SEMARNAT-2003, los municipios están obligados a manejar sus residuos en rellenos sanitarios. Sin embargo existe una falta de recursos económicos para construir y operar rellenos sanitarios y en muchos casos los residuos municipales se siguen manejando en forma inadecuada (Bernache 2012).

En la tabla 1.2 se presenta un concentrado de información nacional de casos de contaminación de acuíferos por lixiviados. En la tabla 1.2 se puede observar que en varios casos no se llevó un registro del volumen de residuos que recibía diariamente el sitio. Resalta que los sitios para disposición final de los residuos no cumplían con los criterios geológicos adecuados y por lo tanto se evidenciaron problemas de contaminación por lixiviados en las aguas subterráneas. La tabla 1.2 ilustra que el manejo inadecuado de los residuos municipales es un problema común en toda la República Mexicana. Los casos presentados indican que el único mecanismo de remediación a las aguas subterráneas contaminadas por lixiviados ha sido la atenuación natural lo que apunta a que no existe una política pública que trate de fondo el problema.

Tabla 1.2 Concentrado de información nacional de casos de lixiviados contaminando aguas subterráneas.

Lugar	Residuos recibidos por día (toneladas)	Afectaciones al agua subterránea	Tipo de acuífero	Referencia
Ciudad de Durango.	400	Incremento de la conductividad, sólidos disueltos, dureza y cloruros.	Acuífero libre, compuesto por arenas y grava.	(Pérez et al. 2002)
Mérida, Yucatán.	-	Incremento de carbono orgánico y cloruros.	Kárstico, con fracturamiento.	(González et al. 2007)
Mexicaltzingo, Estado de México.	-	Incremento de la conductividad eléctrica y de los sólidos disueltos.	Acuífero libre, con material granular estratificado de arcillas, limos, arenas y gravas.	(Reyes-Gutiérrez et al. 2013)
Valle de Mexicali, Baja California.	30	Incremento en la concentración de metales pesados.	Acuífero granular, superficial.	(Gómez-Puentes et al. 2014)

1.2.2.3 El contexto estatal y local de la contaminación por lixiviados a las aguas subterráneas

El panorama estatal en cuanto al manejo de los residuos, y por lo tanto de la afectación por lixiviados al entorno natural es similar al contexto nacional. Estudios (Buenrostro e Israde 2003) señalan que a pesar de haberse construido rellenos sanitarios para las localidades más pobladas de Michoacán, éstos poco han contribuido al control de la contaminación ambiental pues no cumplen cabalmente con las normas ambientales. En el estado existen varios ejemplos del riesgo ambiental asociado al manejo de los residuos municipales. En la ciudad de Zamora se constató la presencia de cadmio en los residuos presentes en un tiradero abandonado (Navarrete 2004). En Zinapécuaro se evidenció una inadecuada disposición de los residuos municipales, donde uno de los puntos críticos es la cercanía de una laguna de lixiviados respecto al cuerpo de agua superficial de La Presa el Rocío (Sánchez-Núñez et al. 2008). Estudios realizados en la cuenca de Cuitzeo al norte del estado de Michoacán, señalan que muchos de los sitios destinados a la disposición final de residuos municipales se ubican en

zonas con estratos geológicos de alta permeabilidad y porosidad, que representan un alto riesgo de infiltración de contaminantes (Israde-Alcántara et al. 2009).

En la tabla 1.3 se presenta una síntesis de la información estatal y local sobre la afectación por lixiviados. Se observa que en muchos sitios no se llevó un registro de la cantidad de residuos que ingresaron. También se resalta que la mayoría de los sitios se ubican sobre estratos geológicos permeables, por lo que representan un riesgo a los acuíferos.

En la ciudad de Morelia se tienen dos investigaciones que han profundizado en el estudio de la contaminación por lixiviados al acuífero, el presentado por Israde y colaboradores en el año 2005 y la tesis de maestría de Verduzco del 2010.

En el año 2005 Israde y colaboradores caracterizaron la geología y las implicaciones ambientales del entorno del basurero municipal de la ciudad de Morelia, concluyendo que existe un riesgo debido a la presencia de fallas, y un gradiente de flujo en dirección al este (donde se sitúan zonas habitadas), además se encontró presencia de Cd, Pb, Zn, Ni, Cr y As tanto en lixiviados como en muestras de agua subterránea de pozos cercanos al basurero.

En año 2010 Verduzco retoma el tema de la contaminación del acuífero asociada al tiradero municipal de Morelia situando la zona de estudio en un polígono comprendido entre los volcanes de Tzirate, el Águila, los volcanes Las Tetillas y El Quinceo y la confluencia de los ríos Chiquito y Grande. El estudio presenta evidencias de un avance de la contaminación de las aguas subterráneas causada por el tiradero, señalando que el 52.5% de los sitios evaluados cumplen con las condiciones adecuadas para consumo humano.

Tabla 1.3 Concentrado de información estatal y local de casos de lixiviados contaminando aguas subterráneas

Lugar	Residuos recibidos por día (toneladas)	Afectaciones al agua subterránea	Tipo de acuífero	Referencia
Cuenca del Lago de Cuitzeo.	-	Infiltraciones de lixiviados.	Sustratos de porosidad alta.	(Buenrostro e Israde 2003)
Sahuayo.	-	Incremento de las concentraciones de cadmio.	-	(Navarrete 2004)
Morelia.	700	Incremento en la concentración de metales pesados.	Basaltos fracturados y arenas.	(Ishade-Alcántara et al. 2005).
Zinapécuaro.	-	Desborde de lixiviados.	Secuencias de rocas basálticas, volcanoclásticas, depósitos lacustres y aluviales.	(Sánchez-Núñez et al. 2008)

1.2.3 Investigaciones hidrogeológicas en la ciudad de Morelia

Las primeras investigaciones asociadas a las aguas subterráneas de Morelia fueron llevados por Garduño-Monroy y colaboradores, enfocándose a estudiar la relación entre la extracción de aguas subterráneas y las subsidencias en diversos sitios de la ciudad (Garduño-Monroy et al. 2001). Los resultados del trabajo mostraron que la sobreexplotación de agua subterránea es uno de los principales factores que generan hundimientos (subsidencia). La extracción intensiva de agua subterránea ha ocasionado efectos adversos en el sistema acuífero, Ávila y Garduño evidenciaron que en Morelia existe un abatimiento de los niveles piezométricos de 2.46 metros por año en promedio (Ávila y Garduño 2007).

Los pozos profundos y manantiales representan respectivamente el 43.93% y el 33.41% del suministro de agua de la ciudad de Morelia (Ávila y Garduño 2007), ambos suman el 77.34% del recurso hídrico proviene del sistema acuífero. Esto da una idea de la importancia del agua subterránea, por lo que diversos estudios se han enfocado a entender el comportamiento del sistema acuífero. Una de las zonas que más ha despertado interés en cuanto al conocimiento de su

geohidrología es el poniente de Morelia debido a dos razones, una su identificación como una zona de recarga para el sistema acuífero y otra por las implicaciones de que ahí se ubica el antiguo tiradero municipal (actual relleno sanitario). Israde-Alcántara y colaboradores han señalado que el poniente de Morelia es favorable para la recarga de agua subterránea, y que los volcanes Las Tetillas y El Quinceo y el cerro del Águila forman los reservorios que alimentan los acuíferos del Cerrito y los Itzícuaros, definiendo dos acuíferos, el primero acuífero se ubica entre 45 y 60 metros de profundidad y el segundo entre 180 y 200 m, señalando que las lavas funcionan como una capa confinante. Menciona que el flujo de aguas subterráneas va de oeste (medio volcánico) a este (medio volcánico-sedimentario) (Israde-Alcántara et al. 2005). Los trabajos de Israde y colaboradores han puesto la atención en la importancia de conocer los recursos hídricos subterráneos, dando pie a otras investigaciones en la región. Medina-Vega realizó en el año 2008 un trabajo donde desarrolló un modelo conceptual del acuífero de Cuitzeo, donde identifica cuatro unidades geohidrológicas en el acuífero. En el trabajo se indica que en la zona de estudio existen flujos locales y regionales. Medina señala que los flujos de agua subterránea tienen una dirección del sureste al noreste de la ciudad de Morelia, ubicando los puntos de recarga al sur y los de descarga al norte (Medina 2008). Trabajos realizados por Garduño-Monroy y colaboradores han profundizado en el conocimiento geohidrológico de Morelia y sus alrededores. Garduño-Monroy y colaboradores han evidenciado que las unidades geohidrológicas se ven afectadas por fallas y fracturas (Garduño-Monroy et al. 2010). Los estudios previos realizados en la zona (Garduño et al. 2014) han permitido definir cinco unidades hidrogeológicas en la ciudad de Morelia, las andesitas de Mil Cumbres, los flujos piroclásticos ignimbríticos, el complejo volcánico del cerro del Punhuato, las secuencia fluviolacustres y la secuencia volcánica del corredor Tarasco compuesto por lavas basálticas y basáltico andesíticas. Se propone que los flujos de agua subterránea están relacionados con los materiales geológicos que conforman tres acuíferos. El primero corresponde a un acuífero profundo con flujo intermedio, confinado, con una superficie freática entre 100 y 150 metros, ubicado adentro del techo de las

andesitas. El segundo se comporta como un acuífero somero con flujo local, de tipo libre y una profundidad de hasta 80 metros, se encuentra en los poros de los depósitos lacustres y fluviolacustres. El tercer acuífero se encuentra ubicado en las lavas del vulcanismo semiescudo en el poniente de Morelia. Señala la mezcla de aguas provenientes de diversos acuíferos indicando que el principal flujo de agua subterránea va del oeste y sur hacia el noreste (Garduño et al. 2014).

Un tema constante en los estudios geológicos e hidrogeológicos ha sido el riesgo que representa para las aguas subterráneas el mal manejo de los residuos en la cuenca del lago de Cuitzeo (Buenrostro 2004; Israde-Alcántara et al. 2004), donde existen múltiples vertederos clandestinos (Israde-Alcántara et al. 2009). Se ha evidenciado que el tiradero municipal de Morelia se ubica en una zona donde el subsuelo es permeable y existen fallas geológicas que facilitan la infiltración de lixiviados que pueden llegar a las aguas subterráneas que abastecen a los habitantes de la zona (Israde-Alcántara et al. 2005).

Se han realizado estudios entorno a la calidad de las aguas subterráneas de Morelia y sus alrededores. Se ha demostrado que la composición química del agua subterránea cambia en los diferentes pozos de la ciudad de Morelia, y que los ubicados al norte tienen la menor calidad (Madrigal 2005). El trabajo realizado por Estrada (2015) también menciona que los pozos ubicados al norte de Morelia tienen menor calidad y lo asocia a que los flujos de agua subterránea tienen dirección SO-NE. Estrada identifica la relación entre las fallas geológicas y la calidad del agua subterránea. Además evidencia variaciones en los parámetros químicos y fisicoquímicos del agua subterránea respecto a las épocas de secas y de lluvias (Estrada 2015). En relación al tema del agua y salud pública se resalta el trabajo realizado por Organista (2017) quien define la relación entre la calidad del agua subterránea y la salud pública. No fue evidente la relación entre la calidad del agua y la presencia de enfermedades hídricas en la zona Morelia-Capula (Organista 2017). Encuestas realizadas a la población que habita en la zona Morelia-Capula indicaron que en algunos sitios existe presencia de olores y sabores desagradables en el agua subterránea, lo cual se asoció a la dosificación

de cloro en el sistema de abastecimiento. Organista encontró que en las comunidades de Capula y Tacícuaro se presentan padecimientos que se pueden asociar a plomo, manganeso o arsénico, sin embargo desconoce si el origen de los contaminantes puede asociarse al agua subterránea.

En cuanto a modelación geohidrológica existen escasas investigaciones en la zona de Morelia, el más sobresaliente corresponde al realizado por Estrada en donde realiza un análisis de flujos de aguas subterráneas por medio del software Visual Modflow versión 3.1 en el cual considera la geología y la topografía de la zona (sin tomar en cuenta el efecto de la extracción de agua subterránea), indica que los flujos de aguas subterráneas tienen una dirección del SO al NE (Estrada 2015).

Los estudios realizados en torno a la geología de Morelia y la falta de control de lixiviados (figura 1.1) en el antiguo tiradero municipal ponen de manifiesto la necesidad de profundizar en el entendimiento del sistema acuífero ubicado en la zona Morelia-Capula. Además, tanto pobladores como autoridades municipales tienen interés por saber si existe o no un efecto negativo en la calidad del agua subterránea por causa de la infiltración de lixiviados.



Figura 1.1 Lixiviados y lodos emanados por el antiguo tiradero municipal de Morelia, imagen obtenida en mayo de 2015

PROBLEMA DE INVESTIGACION

El poniente de Morelia depende del agua subterránea para el abastecimiento hídrico de la zona, que presenta un creciente desarrollo urbano, donde la población se ha quintuplicado en los últimos veinte años, pasando de un aproximado de 20 000 a 100 000 habitantes, sin embargo se desconoce el funcionamiento del sistema acuífero. Los principales fenómenos de interés en la zona de estudio son dos. El primero es el efecto de infiltración de lixiviados provenientes del antiguo tiradero municipal en la calidad del agua subterránea. El segundo es el estudio de los cambios en los flujos de agua subterránea respecto al tiempo. Entender la dinámica del sistema acuífero permitirá generar conocimiento que ayude a tomar decisiones enfocadas a optimizar el suministro de agua subterránea.

PREGUNTAS DE INVESTIGACION

¿Cuál es la dinámica del agua subterránea en la zona de estudio?

¿El relleno de tierra clausurado está afectando a la calidad del agua de la zona de estudio?

¿Cómo está afectando la extracción de agua a la dinámica del acuífero?

HIPOTESIS

El análisis de las características químicas y físico-químicas del agua subterránea en conjunto con los niveles piezométricos, permiten identificar la dinámica del flujo del sistema acuífero ubicado al poniente de Morelia.

OBJETIVOS

Objetivo general

Reconocer la dinámica del sistema acuífero ubicado al poniente de Morelia, por medio del análisis químico y físico-químico del agua subterránea en conjunto con los niveles piezométricos.

Objetivos particulares

- Caracterizar la química y fisicoquímica del agua subterránea en la zona de estudio.
- Reconocer la superficie piezométrica del acuífero en la zona de estudio.
- Caracterizar las propiedades hidrogeológicas de la zona de estudio.
- Generar un modelo conceptual de la zona de estudio.
- Modelar el comportamiento del sistema acuífero para reconocer el flujo en el subsuelo, así como la dirección de la contaminación del agua subterránea en caso de presentarse.

CAPITULO 2: CARACTERIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación de la zona de estudio

El municipio de Morelia se ubica dentro del estado de Michoacán, en el centro de México (figura 2.1).

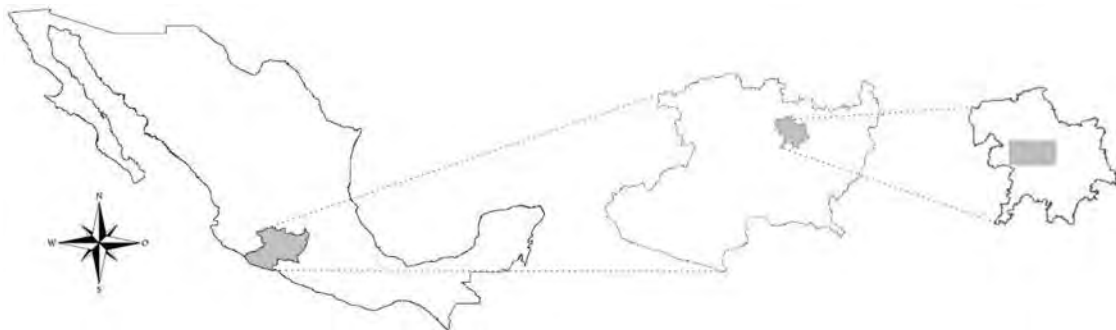


Figura 2.1 Localización de la zona de estudio.

El municipio de Morelia agrupa un conjunto de localidades. En la figura 2.2 se muestra la ubicación de la zona de estudio al oeste del municipio de Morelia (zona Morelia-Capula) y las principales localidades indica en un triángulo rojo se localización el antiguo tiradero municipal.

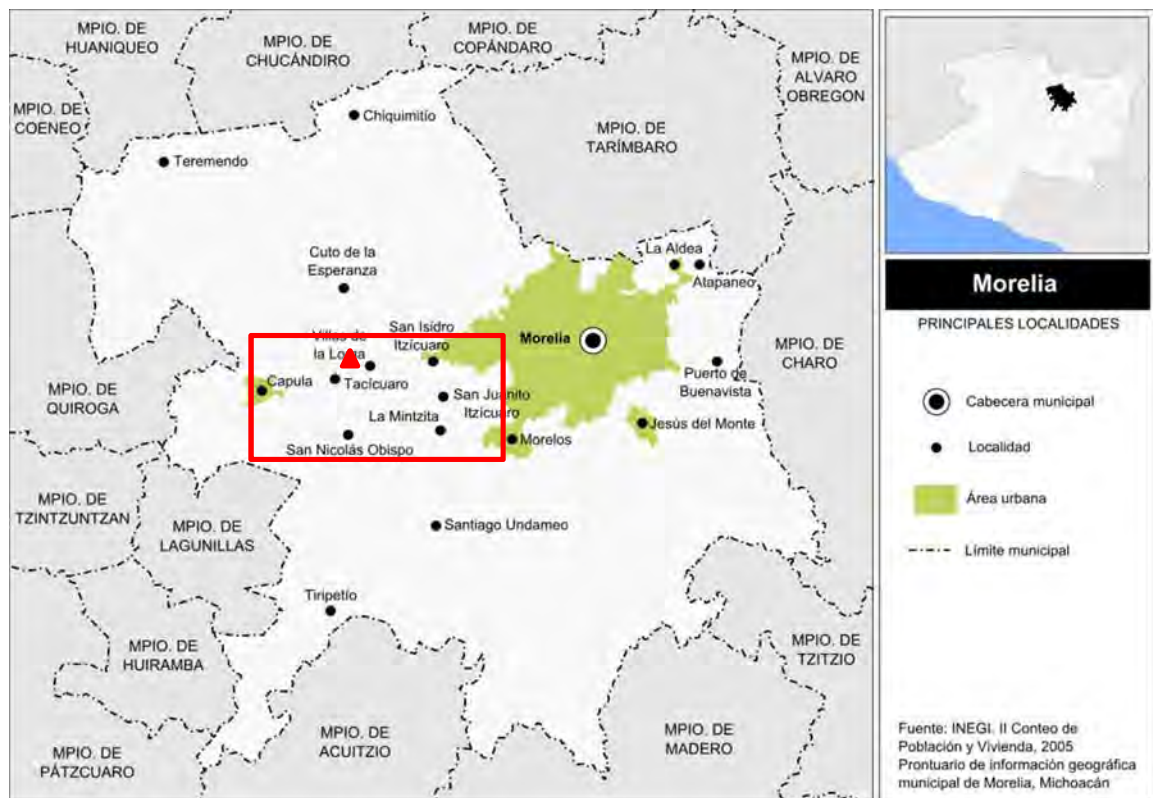


Figura 2.2 Microlocalización de la zona de estudio, remarcada en el cuadro rojo. El triángulo señala la ubicación del antiguo tiradero municipal, y el actual relleno sanitario.

La población ubicada en la zona Morelia-Capula sumaba en el año 2010 un aproximado de 84 000 habitantes, acorde a los datos del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). Para el año 2015 se realizó un nuevo censo poblacional, aunque no se dispone de los datos por localidades debido a que la información todavía está en procesamiento. Sin embargo, se calcula que la población actual supera los 100 000 habitantes, ya que el fraccionamiento Villas del Pedregal paso de 10 934 habitantes en el año 2010 a más de 40 000 en el año 2015.

2.2 Caracterización del medio geológico

2.2.1 Contexto geológico regional

La zona Morelia-Capula se ubica dentro de la provincia geológica denominada Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) también llamada Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, siendo uno de los sistemas tectónicos convergentes más complejos del planeta (Ferrari 2000; Gómez-Tuena et al. 2005). La FVTM es un arco volcánico que se origina por la subducción de las placas Rivera y Cocos en la placa Norteamérica. La FVTM es muy variable en los tipos de volcanes y la composición de sus productos (Ferrari 2000).

La FVTM está constituida por rocas volcánicas que se han acumulado durante varios periodos eruptivos. La evolución de la FVTM se ha dividido en 4 periodos, los cuales iniciaron hace 20 millones de años (Ferrari et al. 2012). La zona Morelia-Capula se encuentra dentro del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG). El CVMG es una de las regiones de vulcanismo monogenético más extensas del mundo (Corona-Chávez et al. 2006).



Figura 2.3 Localización de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). La zona Morelia-Capula se ubica dentro del cuadro rojo.

En la figura 2.4 se muestra un modelo digital de elevación de la zona Morelia-Capula. La zona Morelia-Capula se ubica dentro de un paisaje compuesto por lomas y valles y se encuentra entre dos importantes cuerpos volcánicos, al noreste se localiza el Quinceo y las Tetillas (ambos de tipo escudo) y al suroeste el cerro del Águila (semiescudo) (Garduño-Monroy et al. 2010). Otra característica del paisaje es la presencia de vulcanismo monogenético que se compone de domos, conos cineríticos, conos de lava y derrames con alturas bajas (Istrate-Alcántara et al. 2009). La zona ha tenido actividad volcánica reciente, en los últimos 10 000 años hay registro de reactivaciones del cerro del Quinceo (Garduño et al. 2014).

También resalta la presencia de fallas y fracturas, siendo la más significativa la falla Cointzio ubicada al sur de la zona de estudio, la cual forma parte del sistema de fallas Morelia-Acambay (Garduño et al. 2014).

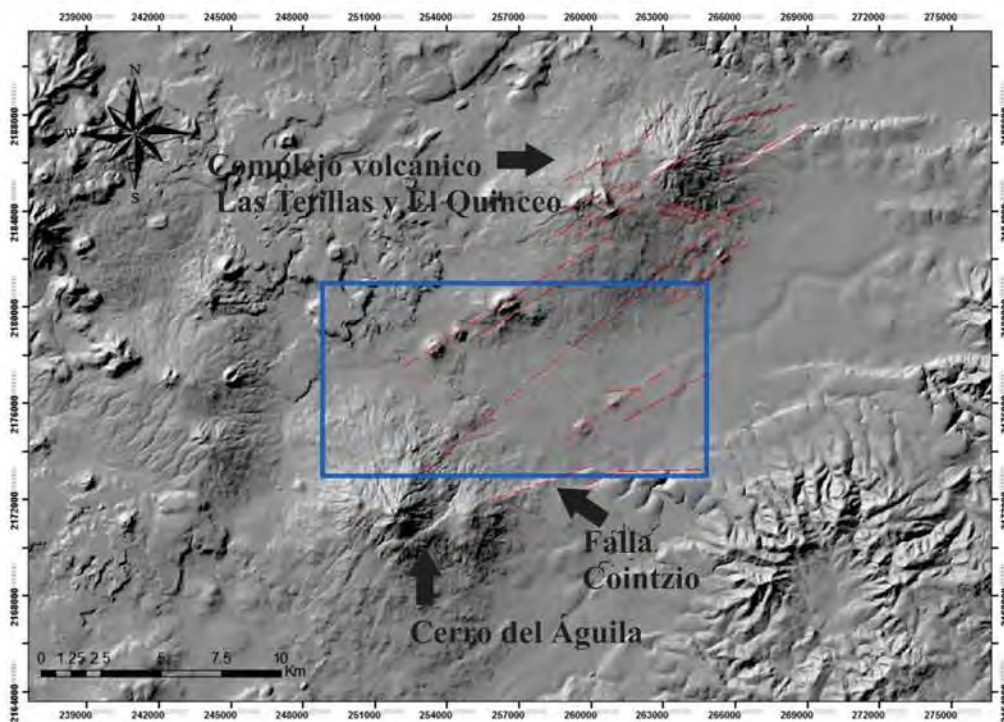


Figura 2.4 Modelo digital de elevación, en recuadro azul la zona Morelia-Capula, en líneas rojas las fallas geológicas.

2.2.2 Geología superficial

En la figura 2.5 se muestra un mapa de la geología superficial de la zona Morelia-Capula (Organista 2017), se observa que la mayor parte del área está cubierta por materiales originados por el vulcanismo del corredor Tarasco. Al noroeste se observa un área donde los materiales superficiales son de tipo aluvial. Al oriente se encuentra un área caracterizada por la presencia de materiales lacustres (arcillas) y fluviolacustres (arenas, conglomerados, gravas), evidenciando la existencia de un paleolago del cual quedan rastros, ya que aún se encuentran zonas de inundación que aparecen durante los periodos de lluvias formando un cuerpo de agua superficial de menos de un metro de profundidad.

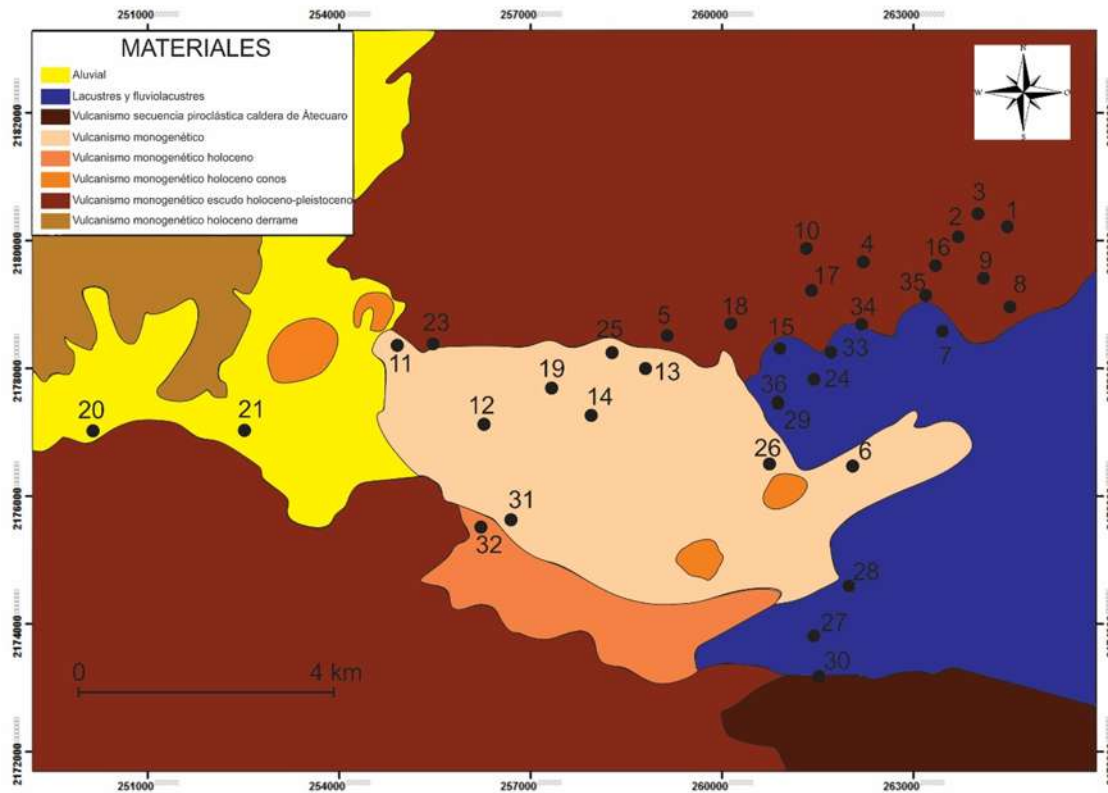


Figura 2.5 Geología superficial de la zona Morelia-Capula (modificado de Organista 2017).

2.2.3 Geología del subsuelo

Para conocer la geología del subsuelo de la zona de estudio se recopiló información de columnas litológicas de pozos de extracción de agua subterránea e interpretaciones de estudios geofísicos. Se realizó una recopilación de reportes técnicos y archivos del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). La información recopilada indica la geología del subsuelo en los primeros cuatrocientos metros de profundidad. Las secciones geológicas se presentan en las figuras 2.6 a 2.13. Una característica común en las descripciones litológicas de los pozos fue la heterogeneidad de los materiales encontrados, tanto horizontal como verticalmente. Lo cual indica que en un mismo sitio existen intercalaciones litológicas de diferentes espesores, que consisten en lavas fracturadas, depósito de caída mal y bien consolidado, así como depósitos fluviales y depósitos lacustres. Los materiales volcánicos de la zona Morelia-Capula presentan diversidad, en el poniente son de tipo basáltico y al sureste de tipo andesítico, poniendo de manifiesto la heterogeneidad geológica característica de la FVTM. Es evidente que la geología de la zona está fuertemente influenciada por los procesos volcánicos y tectónicos. Sobre yaciendo a rocas de tipo andesítico se observan depósitos sedimentarios y vulcanosedimentarios, particularmente en el sureste de la zona de estudio.

Se debe tener en cuenta que las descripciones geológicas y los sondeos eléctricos verticales fueron realizadas por diferentes empresas e investigadores, por lo cual existe cierto nivel de incertidumbre en cuanto a la interpretación de la información.

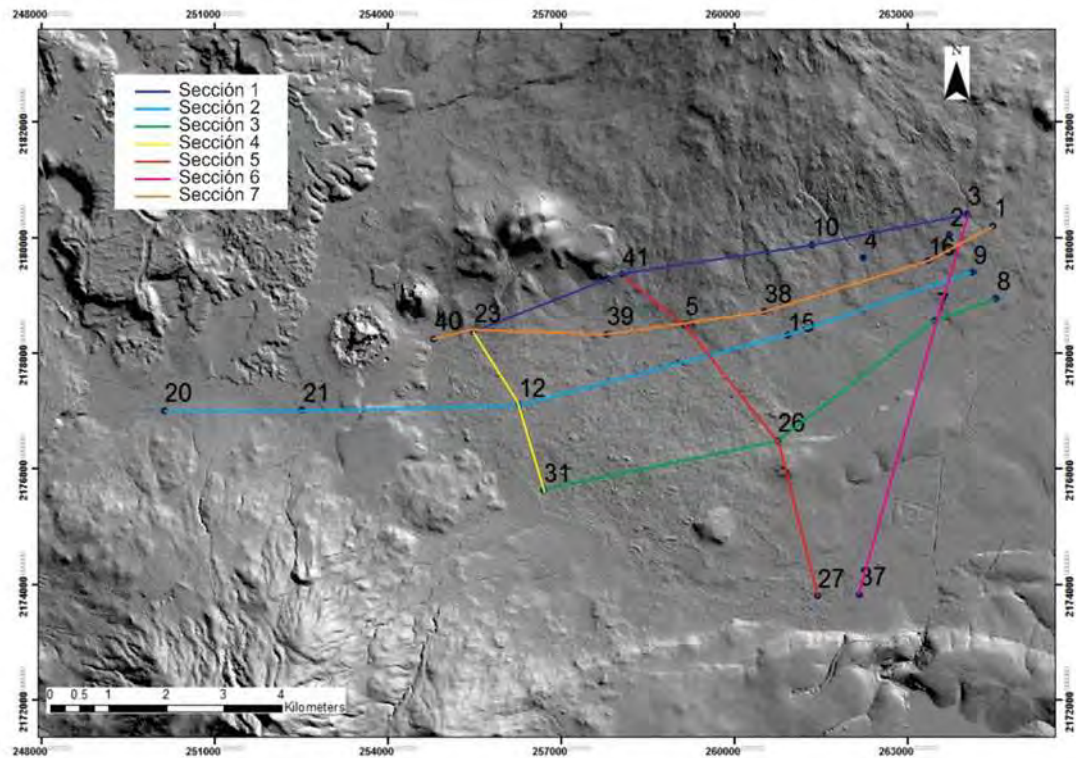


Figura 2.6 Secciones geológicas de la zona de estudio.

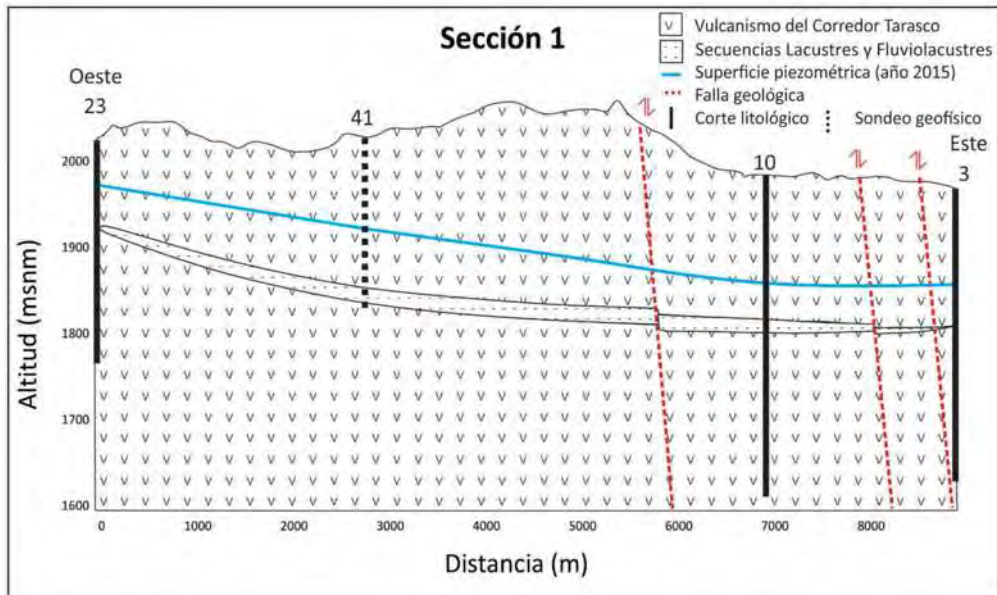


Figura 2.7 Sección geológica 1.

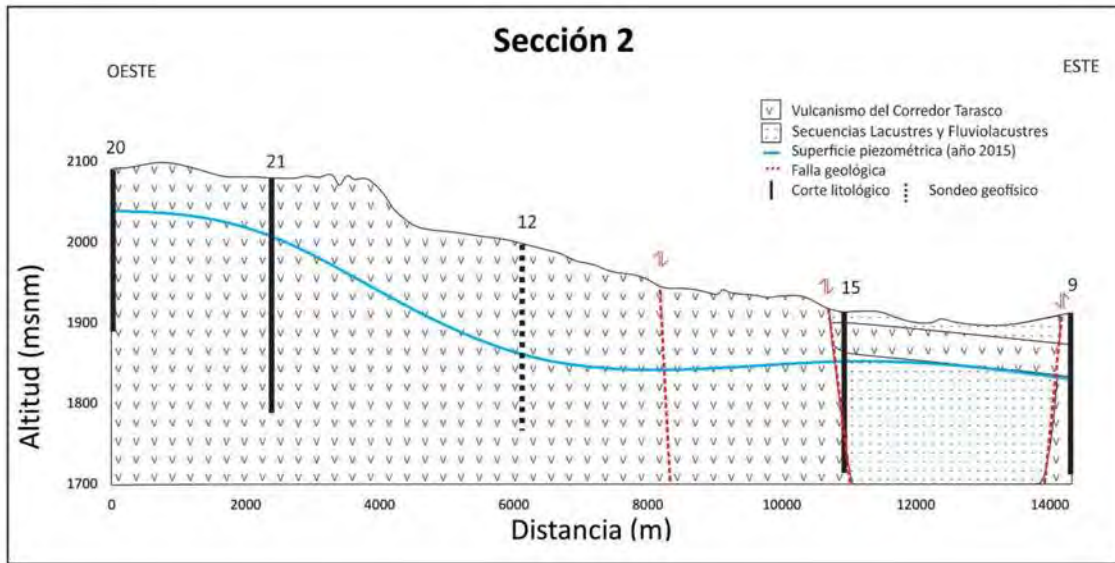


Figura 2.8 Sección geológica 2.

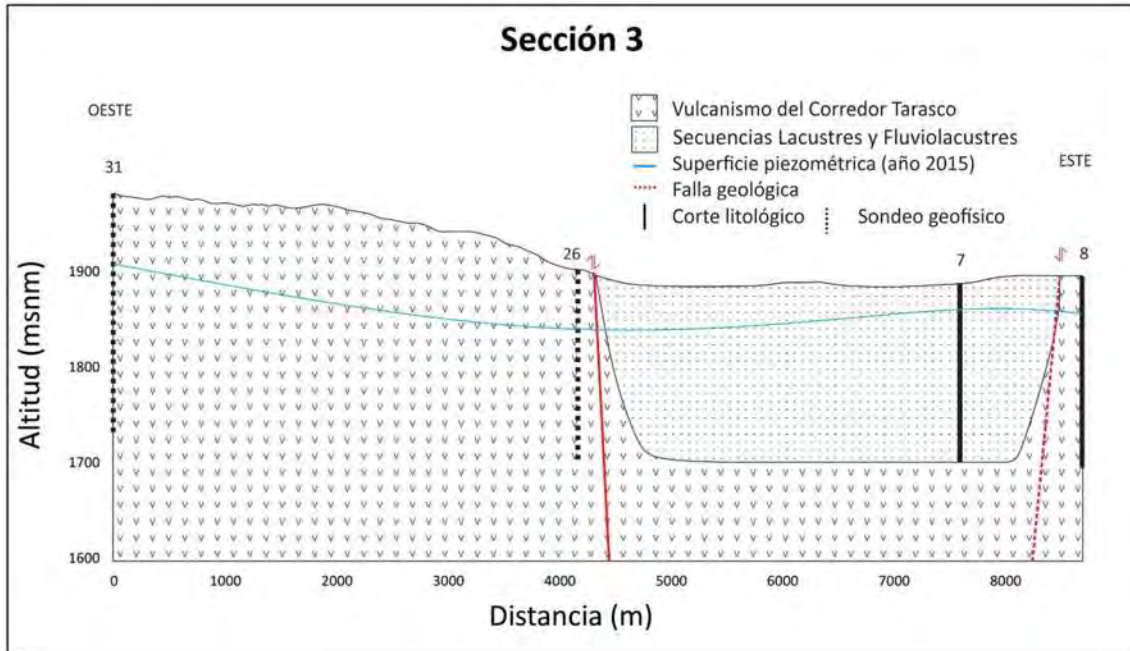


Figura 2.9 Sección geológica 3.

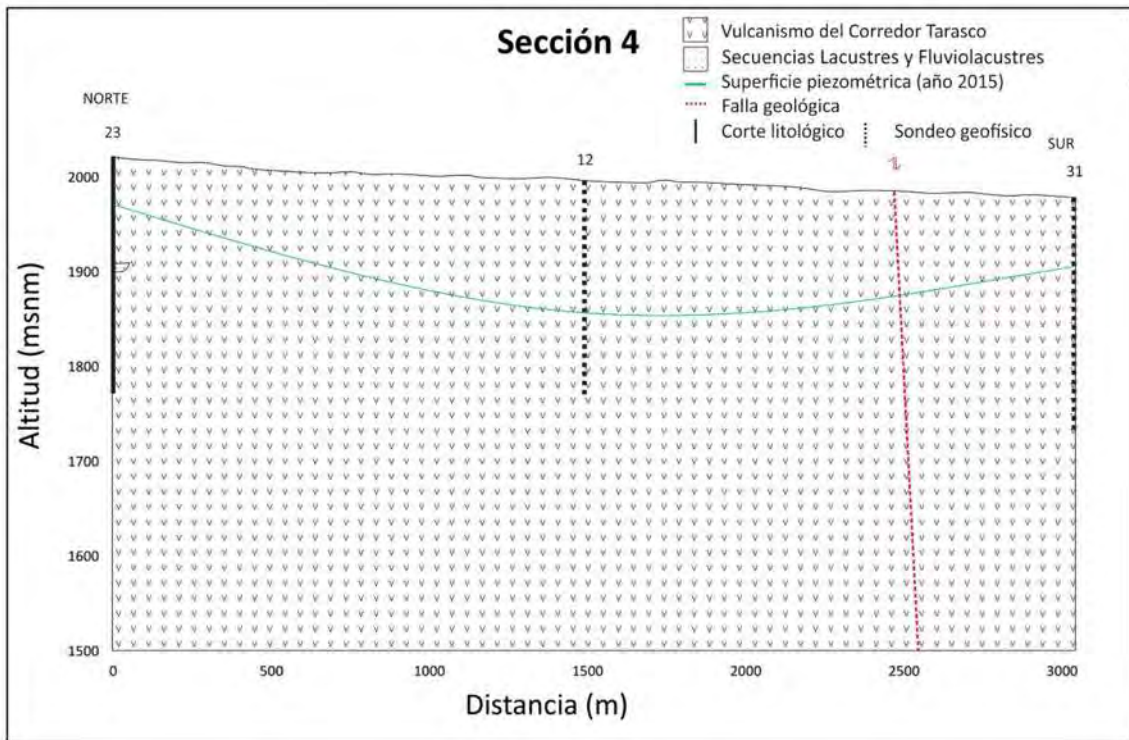


Figura 2.10 Sección geológica 4.

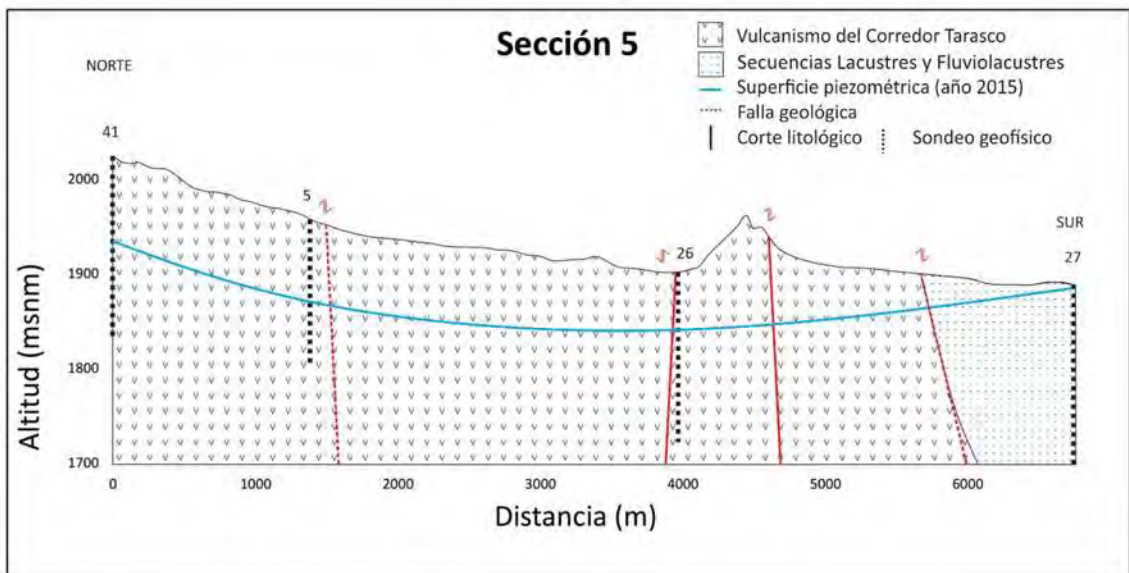


Figura 2.11 Sección geológica 5.

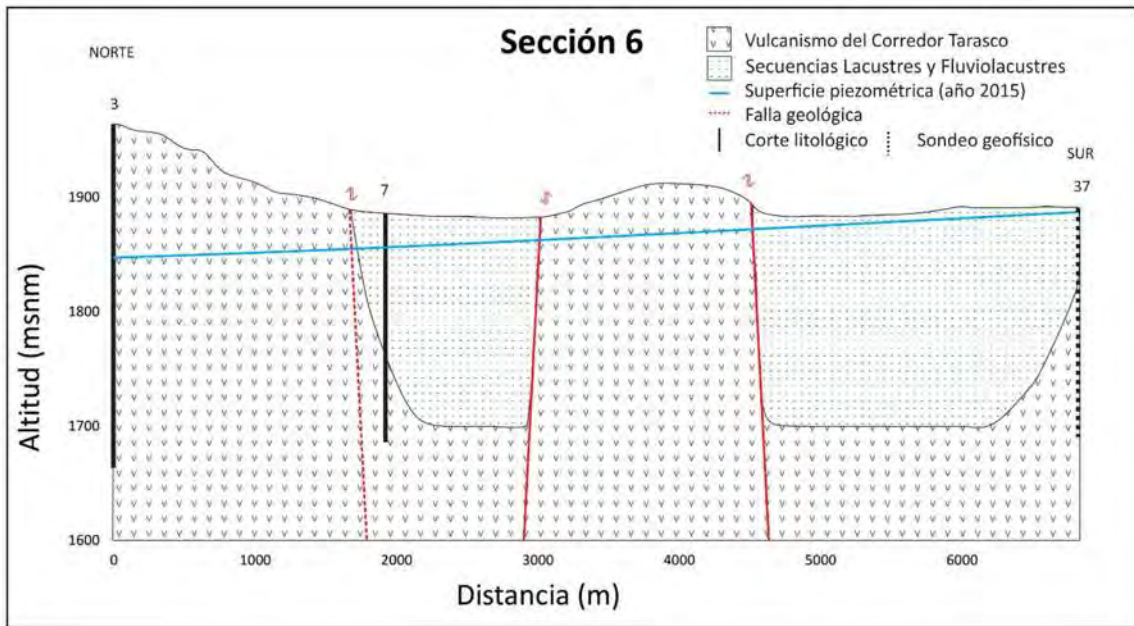


Figura 2.12 Sección geológica 6.

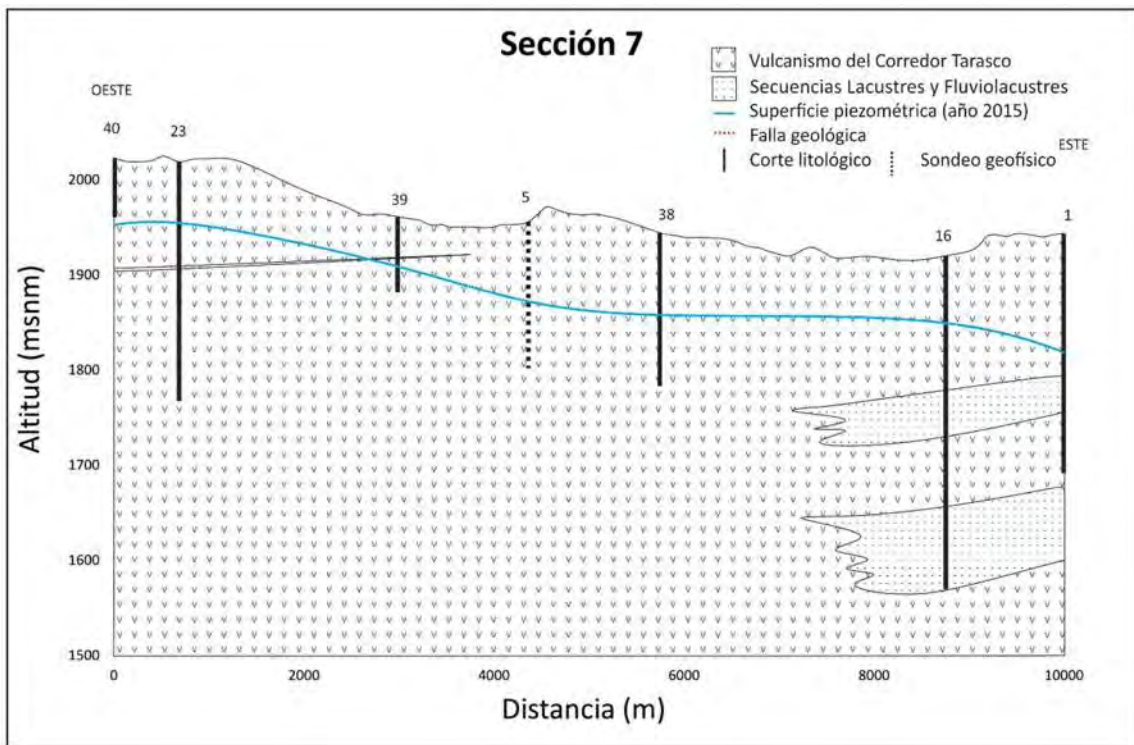


Figura 2.13 Sección geológica 7.

Se observa que en la mayor parte de la zona Morelia-Capula la geología está compuesta por materiales originados por el vulcanismo del corredor Tarasco que en algunas zonas contienen estratos delgados de secuencias cineríticas y fluviolacustres. En la zona ubicada entre los Itzícuaros y la mancha urbana de Morelia se encontraron materiales fluviolacustres con espesores de más de 200 metros, los cuales sobreyacen a los materiales volcánicos del corredor Tarasco. Los materiales fluviolacustres (figura 2.14) cubren una superficie considerable que abarca un área con un ancho de hasta 1.5 kilómetros y un largo de 4.5 kilómetros (paleolago). Hacia el noreste de la zona de estudio, en las faldas de los volcanes Las Tetillas y el Quinceo, se observa una intercalación de lavas, materiales lacustres y cenizas, representando una de las zonas más heterogéneas en lo que respecta a la geología del subsuelo.

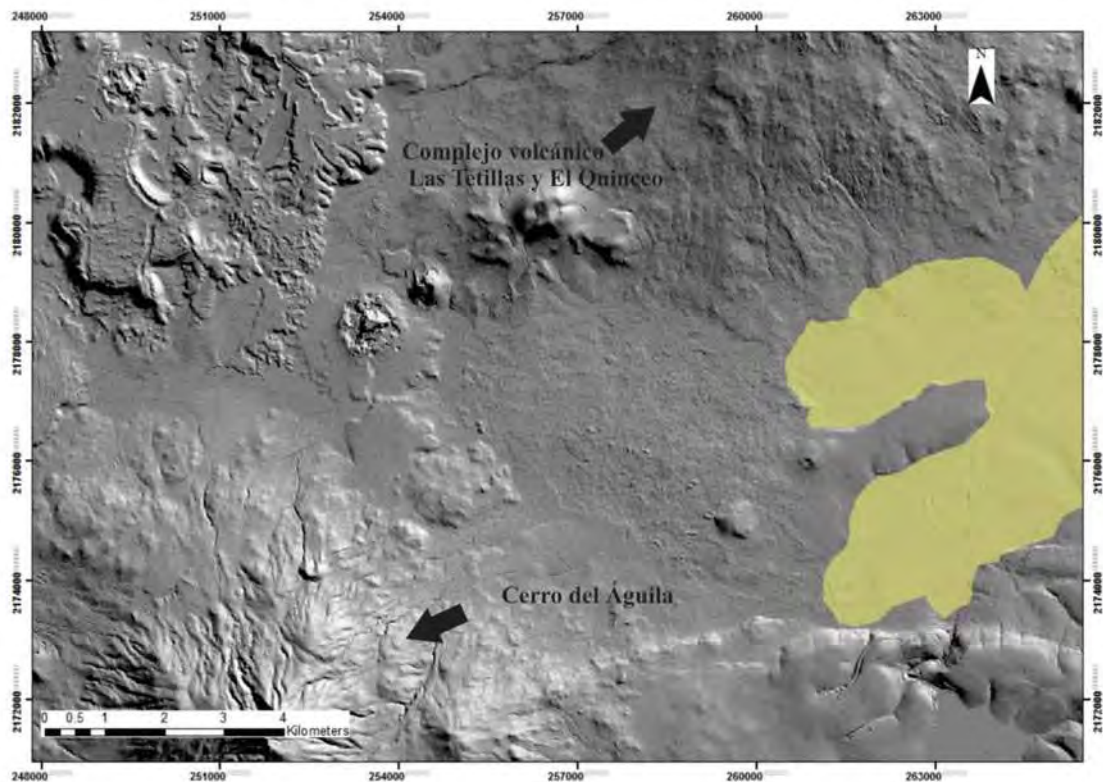


Figura 2.14 Ubicación de los materiales fluviolacustres (paleolago) en color amarillo.

2.2.4 Geología estructural

La FVTM es una de las provincias geológicas más estudiadas, debido a que en ella se concentran varios de los centros poblacionales más densos de México, los cuales han sido afectados más de una vez por la actividad sísmica asociada a las fallas geológicas (Sunye-Puchol et al. 2015).

La zona Morelia-Capula se encuentra dentro de uno de los sistemas de falla de la FVTM (Rodríguez-Pascua et al. 2010), el sistema Morelia-Acambay (figura 2.15), el cual tiene una longitud de más de 100 kilómetros y un ancho aproximado de 30 kilómetros, que forma las cuencas lacustres de Zacapu, Cuitzeo, Morelia y Acambay (Ferrari et al. 2012). El sistema Morelia-Acambay se conforma por un conjunto de fallas normales de dirección E-O y NE-SO. El sistema de fallas E-O es el más joven (7-9 millones de años) y ha estado activo durante el Holoceno, generando terremotos de los que hay registro en la cultura purépecha (Garduño-Monroy et al. 2009). En la actualidad el estudio del sistema de fallas Morelia-Acambay es un tema prioritario debido a que muchos asentamientos urbanos se localizan sobre éste, generando consecuencias como daños a la infraestructura y presentando un riesgo potencial ante eventos sísmicos.

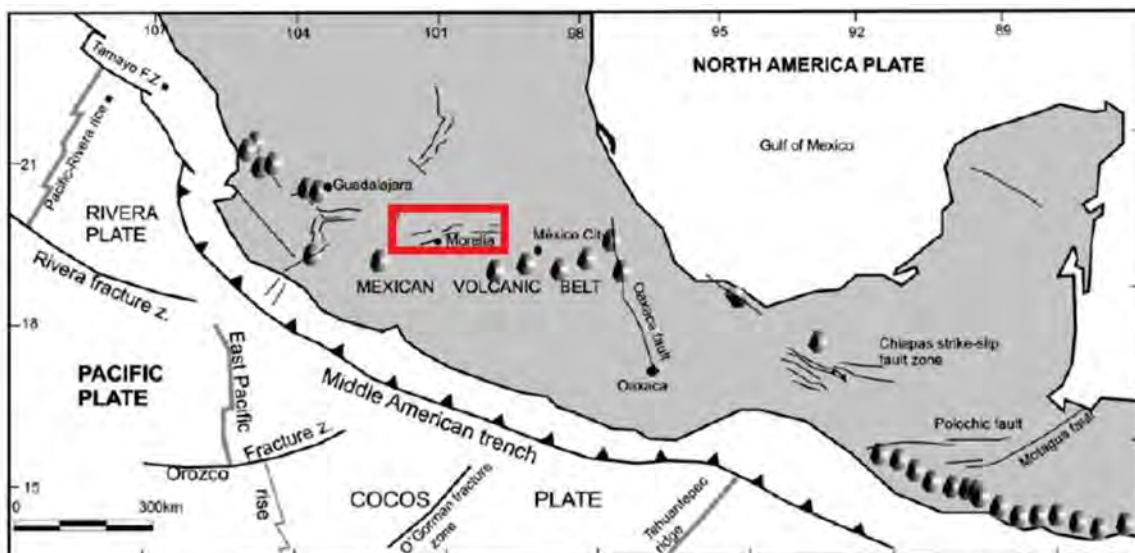


Figura 2.15 Sistema de fallas regional de la zona de estudio (Rodríguez-Pascua et al. 2010), en el recuadro rojo se muestra la localización del sistema de fallas.

En la ciudad de Morelia se tienen varias estructuras geológicas con dirección E-O pertenecientes al sistema de fallas Morelia-Acambay, en la figura 2.16 se muestran las principales estructuras, algunas de ellas se consideran activas ya que han tenido actividad sísmica en los últimos 35 000 años (Garduño-Monroy et al. 2001).

El sistema de fallas presente en la ciudad de Morelia genera un graben escalonado, el cual origina el paisaje característico de valles y lomas.

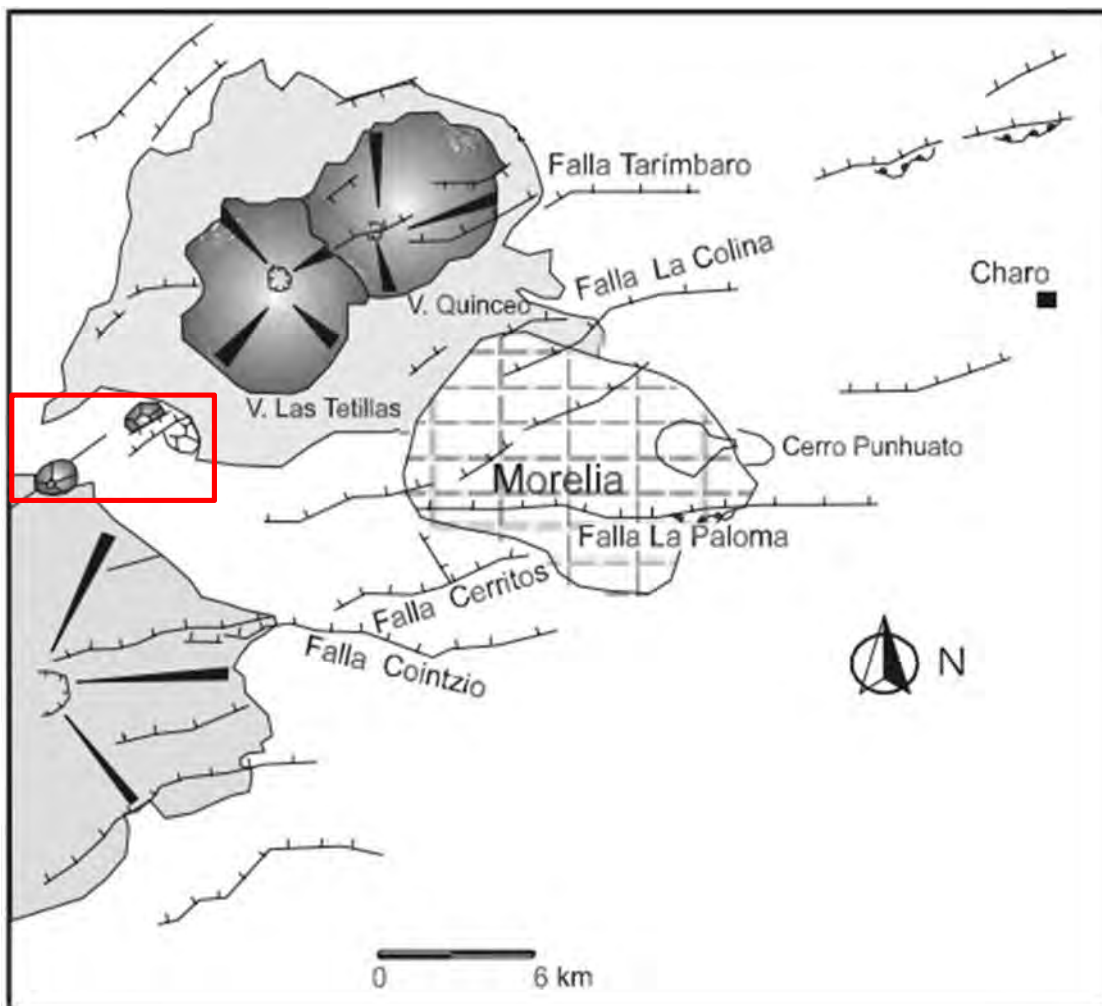


Figura 2.16 Principales fallas de la ciudad de Morelia (modificado de Garduño-Monroy et al. 2001), en el recuadro rojo se muestra la microlocalización de la zona de estudio.

En la zona Morelia-Capula se tenían pocos datos sobre la geología estructural, por lo cual fue necesario identificar las fallas y fracturas. La identificación de las fallas y fracturas se realizó a partir del modelo digital de elevación (con 5 metros de resolución). Se observa que las estructuras presentan dirección E-O, evidenciando un alineamiento con el sistema regional. Las fallas se encuentran en la mayor parte de la zona de estudio, algunas de ellas son muy evidentes como la falla que cruza el balneario Cointzio y la falla que atraviesa el poblado del Cerrito, ambas forman escarpes que se identifican a simple vista. Hay fallas que se ubicaron por el alineamiento de cuerpos volcánicos, tal fue el caso de los volcanes cineríticos que se ubican entre el desarrollo urbano la Maestranza y la localidad de Tacícuaro. Algunas fallas se encuentran parcialmente sepultadas, por lo que se sugiere que en estudios futuros se profundize en el entendimiento de la geología de la zona Morelia-Capula, por ser un polo de desarrollo urbano en constante crecimiento.

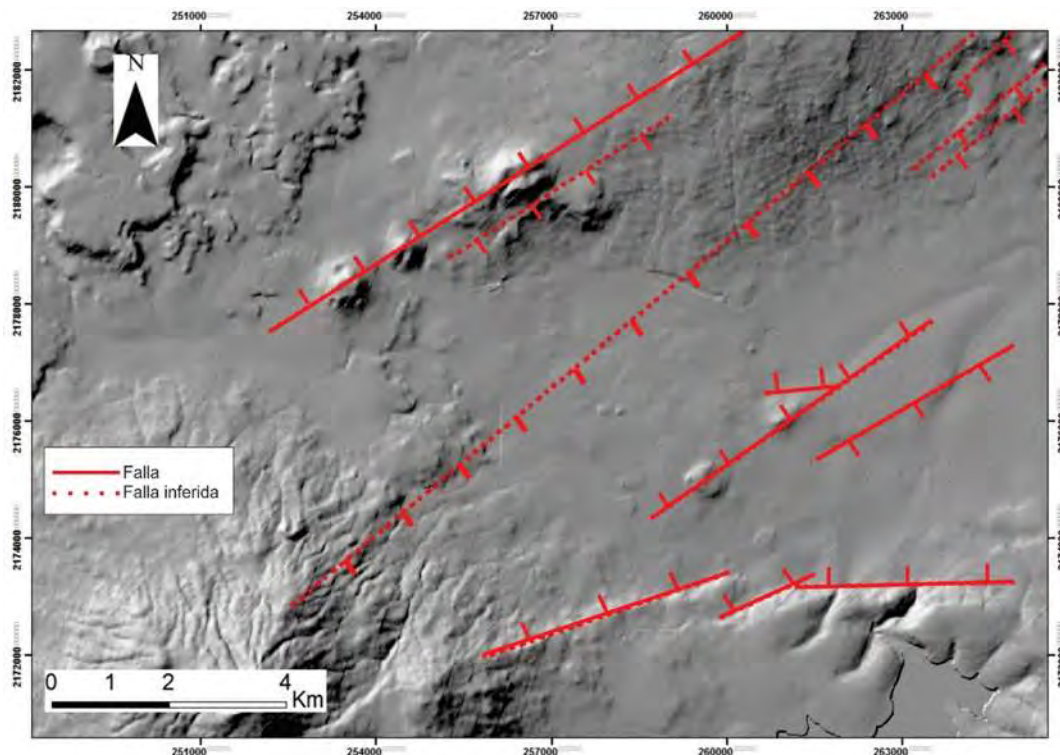


Figura 2.17 Geología estructural de la zona de estudio. Las estructuras se presentan en líneas achuradas de color rojo.

2.3 Caracterización hidrológica

2.3.1 Rasgos generales

La zona Morelia-Capula se ubica en la región hidrográfica Lerma-Chapala, dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo (figura 2.18) la cual tiene una extensión de 4 026 kilómetros cuadrados, es de tipo endorreica, en ella se encuentra el lago de Cuitzeo, el segundo más grande de México (Filini 2012). El clima de la cuenca del Lago de Cuitzeo se clasifica como templado con lluvias en verano, concentrándose en los meses de julio y agosto (Carlón y Mendoza 2007). Los registros indican que la precipitación media anual es de 817.7 mm por año, los valores cambian en diferentes sitios de la cuenca (Medina 2008). La temperatura media anual es de 17.5° C (Medina 2008).



Figura 2.18 Ubicación de la zona Morelia-Capula en la cuenca del lago de Cuitzeo (modificado de Carlón y Mendoza 2007).

La zona Morelia-Capula se ubica dentro de una subcuenca la cual se muestra en la figura 2.19. La subcuenca se determinó mediante el software ArcGIS versión 10.2.1, y para su delimitación se colocó el punto de salida de la cuenca donde convergen el río Itzícuaru y el afluente proveniente del manantial La Mintzita, ambos con caudal durante todo el año. La subcuenca es de tipo exorreica. En la zona de estudio no existen cuerpos lagunares permanentes, aunque hay estructuras denominadas bordos que sirven para captar el agua de lluvia; los bordos tienen un régimen hídrico estacional.

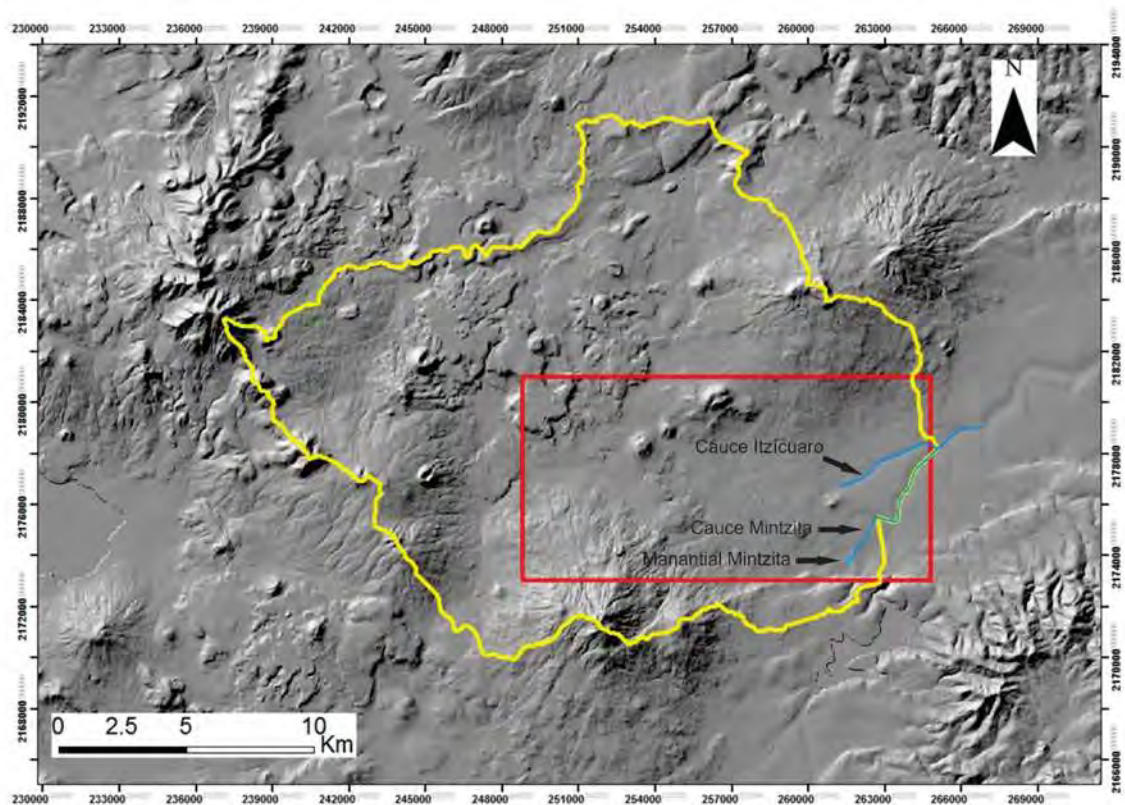


Figura 2.19 Ubicación de la zona de estudio en la subcuenca Morelia-Capula. En amarillo la subcuenca Morelia-Capula, en líneas azules los ríos permanentes y en el recuadro rojo la zona Morelia-Capula.

2.3.2 Estimación de las Lluvias

Para contar con datos de precipitación se recaudó información de estaciones meteorológicas ubicadas en las cercanías de la subcuenca Morelia-Capula (figura 2.20). A partir de la información de las estaciones se llevó a cabo la deducción de los datos faltantes de precipitación. La información de precipitación se muestra en la tabla 2.1.

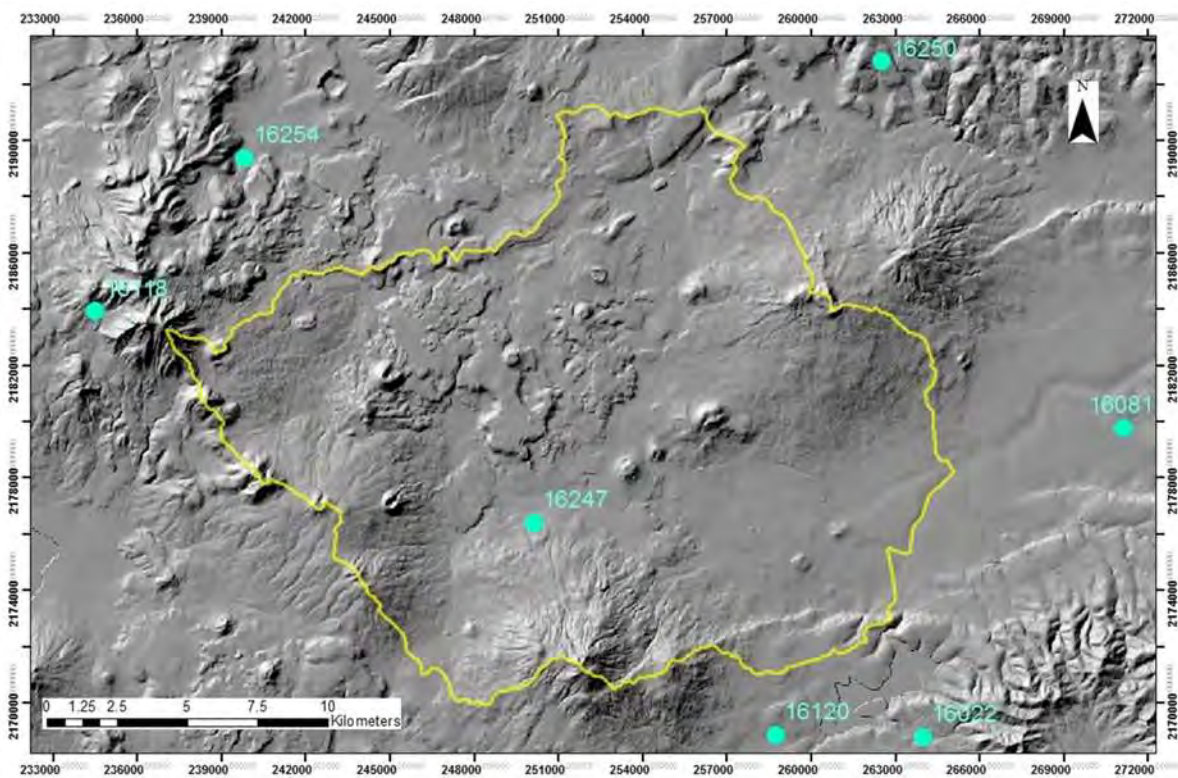


Figura 2.20 Ubicación de las estaciones meteorológicas en la subcuenca Morelia-Capula, los números en azul indican su clave ante CONAGUA.

Los datos de precipitación indican que el promedio anual de la precipitación considerando el periodo 1994-2014 (tabla 2.1) es de 707.9 mm/año. Se observa que los valores de precipitación variaron entre estaciones en un mismo año, así como entre los diferentes años de una misma estación.

Tabla 2.1 Concentrado de información de la precipitación en la zona Morelia-Capula.

Año	Precipitación media anual por cada estación (mm/año)						
	16022	16081	16118	16120	16247	16250	16254
1994	710.80	694.80	756.20	648.70	423.01	420.23	484.30
1995	966.10	829.85	769.80	1 091.60	488.15	481.20	683.30
1996	693.90	513.50	461.30	835.70	336.16	339.13	533.30
1997	672.00	713.20	305.85	793.70	727.68	441.98	510.28
1998	745.80	988.40	445.49	917.70	1 017.40	487.98	621.70
1999	653.10	730.80	383.42	675.40	766.90	669.60	675.10
2000	803.87	518.60	648.82	893.20	708.80	1 540.42	684.80
2001	894.80	848.00	441.75	946.00	1 264.60	808.54	1 117.90
2002	890.10	1 053.10	616.14	826.30	1 212.79	1 269.20	1 080.90
2003	812.70	971.40	452.28	861.30	874.58	885.90	693.00
2004	823.20	914.20	844.30	885.60	894.40	1 186.50	810.60
2005	859.90	756.80	584.80	935.50	773.00	657.61	643.80
2006	983.55	829.65	957.90	809.32	837.10	1 220.90	647.70
2007	527.72	692.20	638.20	844.42	781.14	995.90	737.70
2008	438.10	584.00	1 027.76	437.99	371.30	1 113.47	548.70
2009	520.31	720.70	667.75	517.31	428.37	868.76	557.52
2010	696.57	1032.03	670.40	685.41	542.21	550.16	999.64
2011	411.93	559.00	559.80	410.78	344.52	875.30	356.74
2012	435.73	609.20	746.50	432.61	356.09	921.40	303.38
2013	521.19	727.40	673.90	517.59	426.53	962.30	363.40
2014	454.13	625.80	747.41	451.84	375.37	795.32	319.83

2.3.3 Estimación de la recarga por lluvias

Para estimar la recarga asociada a las lluvias fue necesario calcular las temperaturas promedio y deducir los datos faltantes de temperatura de las estaciones meteorológicas. Los datos de temperatura (tabla 2.2) indican que el promedio anual considerando el periodo 1994-2014 es de 17.23°C. Se observa que los valores variaron entre estaciones en un mismo año, así como entre los diferentes años de una misma estación.

Tabla 2.2 Concentrado de información de la temperatura en la zona Morelia-Capula.

Año	Temperatura media anual por cada estación (°C)						
	16022	16081	16118	16120	16247	16250	16254
1994	19.94	19.37	15.09	17.55	14.82	18.11	17.07
1995	18.92	19.98	15.00	16.51	15.39	18.54	17.43
1996	18.39	18.71	17.89	16.88	14.21	17.64	17.05
1997	18.16	19.81	19.10	17.14	17.05	18.17	17.30
1998	19.11	19.34	18.43	17.87	18.14	19.10	18.03
1999	18.25	18.57	18.46	16.76	16.03	19.00	15.56
2000	18.38	19.32	18.92	16.90	13.48	17.41	15.56
2001	18.30	18.80	18.49	16.73	12.97	15.31	15.28
2002	18.76	18.77	19.97	17.36	13.51	15.30	15.64
2003	18.62	19.15	18.01	15.78	13.20	16.59	16.05
2004	18.12	18.42	16.31	16.19	12.98	15.38	16.78
2005	18.45	19.17	18.03	17.61	14.29	16.19	17.79
2006	18.26	18.81	16.06	16.88	13.29	15.84	17.65
2007	18.28	18.69	17.37	16.92	13.91	18.30	17.58
2008	18.02	18.45	18.29	16.42	13.96	17.17	17.53
2009	18.59	19.05	18.29	16.98	14.53	17.62	18.30
2010	18.02	18.38	18.71	16.36	13.90	17.47	17.68
2011	18.60	19.07	19.04	17.00	14.54	18.32	17.70
2012	16.36	16.42	19.91	14.53	12.07	17.65	15.19
2013	16.09	16.09	20.41	14.22	11.76	20.65	14.96
2014	18.37	18.80	19.80	16.74	14.29	20.45	16.88

La infiltración por lluvias se calculó restando la evapotranspiración potencial (ETP) a la precipitación. Para estimar la infiltración se utilizó el software Easy Val versión 4.0, el cual realiza el cálculo de la evapotranspiración mediante el método de Thornthwaite. Los resultados de la estimación de la infiltración se muestran en la tabla 2.3. La infiltración media anual corresponde a 202.2 mm/año por metro cuadrado, considerando el periodo 1994-2014. Se observa que en ciertos años en algunos sitios se presentó el caso de la ausencia de infiltración.

Tabla 2.3 Estimación de la infiltración en la zona Morelia-Capula.

Año	Estimación de la infiltración (mm/año por metro cuadrado)						
	16022	16081	16118	16120	16247	16250	16254
1994	185.0	201.3	305.4	140.2	0.0	0.0	55.6
1995	357.5	238.0	249.7	482.7	0.0	0.0	176.0
1996	174.2	24.7	4.2	293.4	0.0	0.0	130.4
1997	116.5	140.1	0.0	150.6	111.4	0.0	71.1
1998	244.6	459.6	16.9	378.4	487.6	17.1	192.7
1999	196.2	273.8	0.0	242.7	299.2	234.7	217.7
2000	271.9	57.0	156.9	356.4	174.4	1 036.2	185.2
2001	305.8	265.9	0.0	377.5	597.9	210.4	500.0
2002	271.7	391.0	183.3	239.2	509.0	467.4	436.7
2003	225.0	323.4	0.0	278.1	348.6	294.3	195.5
2004	242.3	315.5	284.1	312.5	252.0	520.5	238.3
2005	396.1	277.0	196.3	410.3	295.0	223.5	188.2
2006	425.7	235.8	431.0	223.7	218.3	601.7	177.6
2007	33.9	180.1	134.0	245.5	249.1	411.2	268.2
2008	3.0	110.5	541.1	0.4	0.0	360.7	85.8
2009	39.6	214.8	170.6	36.2	0.0	291.2	38.7
2010	135.0	445.4	137.8	123.8	26.6	76.5	447.8
2011	28.4	174.0	145.9	25.1	0.0	502.1	8.9
2012	0.0	106.2	178.9	0.0	0.0	407.7	0.0
2013	34.3	168.3	185.6	31.4	0.0	413.3	0.0
2014	2.4	61.8	211.6	0.0	0.0	234.2	0.0

2.3.4 Uso y consumo del agua

La zona Morelia-Capula es una zona de transición entre un medio urbano y un medio rural (figura 2.21). Básicamente toda el agua que se usa se destina al uso doméstico, aunque existen zonas de cultivo que son de temporal. Los cultivos que se encuentran en la zona Morelia-Capula son para consumo humano, y el principal es el maíz.

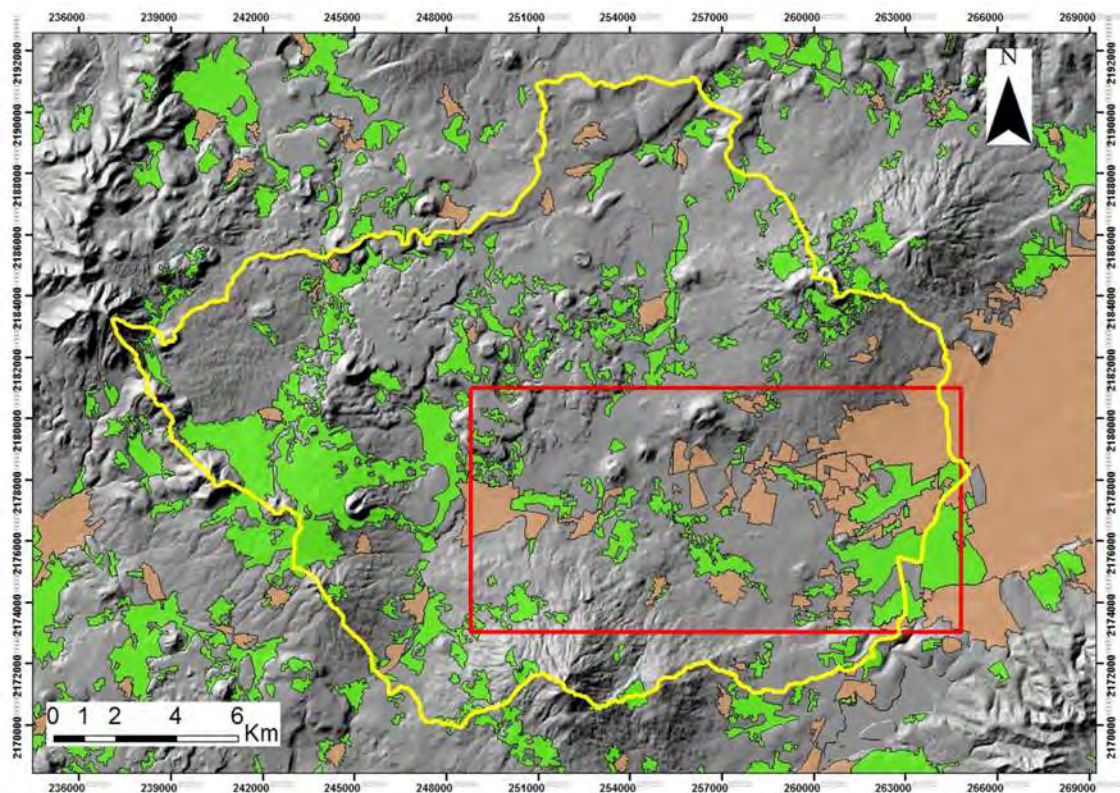


Figura 2.21 Áreas de cultivo (verde) y urbanas (color salmón) en la zona Morelia-Capula (recuadro rojo).

Para calcular la cantidad de agua que se consume se usaron dos métodos. El primer método consistió en multiplicar el número de horas diarias de operación por el gasto del pozo, y determinar así el volumen anual. Los datos se presentan en la tabla 2.4; el cálculo del agua que se consume es de 8 869 184.64 m³/año.

Tabla 2.4 Estimación de la extracción de agua subterránea en la zona Morelia-Capula. Los datos subrayados son valores aproximados indicados por los operadores de los pozos.

ID	Pozo	Gasto (l/s)	Horas de operación	Volumen anual (m ³)
1	23 de Marzo	15.00	20.00	394 200
2	La Esperanza	25.00	20.00	657 000
3	Ricardo Flores Magon	27.00	7.00	248 346
4	San Isidro Itzicuaró	10.00	20.00	262 800
5	San José Itzicuaró	11.50	20.00	302 220
6	Arko San Antonio	12.00	9.00	141 912
7	Mariano Abasolo	20.80	20.00	546 624
8	Tzindurio Sarh	30.00	2.00	78 840
9	San Juanito Itzicuaró	21.00	20.00	551 880
10	Ario de 1815	6.00	20.00	157 680
11	Gas del Lago	<u>15.00</u>	<u>2.00</u>	39 420
12	Villa Magna 3	10.00	20.00	262 800
13	Villas del Pedregal 1	4.00	20.00	105 120
14	Villas del Pedregal 3	25.00	24.00	788 400
15	Ignacio Allende	4.00	20.00	105 120
16	Residencial Tinijaro	9.00	20.00	236 520
17	Heroes Republicanos	18.50	20.00	486 180
18	Arko San Juan	2.00	20.00	52 560
19	La Hacienda 1	<u>15.00</u>	<u>10.00</u>	197 100
20	Capula 2	16.00	2.60	54 662.4
21	Tacicuaró	13.00	6.00	102 492
22	Cuto de la Esperanza	<u>8.00</u>	6.00	63 072
23	La Maestranza	14.80	8.00	155 577.6
24	Río Florido	6.00	6.00	47 304
25	Rancho Nuevo	5.00	8.00	52 560
26	El Cerrito Itzicuaró	9.00	8.00	94 608
28	Pozo La Mintzita	<u>20.00</u>	4.00	105 120
29	Hacienda Itzicuaró	6.50	13.00	111 033
31	San Nicolás Obispo	9.00	4.00	47 304
32	Cuanajillo	8.00	4.28	44 991.36
38	Tanganxoan	2.50	20.00	65 700
41	La Concepción	7.50	<u>6.00</u>	59 130
42	INIRENA	<u>12.00</u>	12.00	189 216
43	El potrero	<u>11.00</u>	<u>3.50</u>	50 589
44	Villas del pedregal 2	<u>15.65</u>	20.00	411 282
45	Villas del pedregal 4	<u>21.15</u>	24.00	666 986.4
46	Villas del pedregal 5	<u>23.33</u>	24.00	735 734.88
47	Capula 1	<u>15.00</u>	<u>10.00</u>	197 100

El segundo método de cálculo del consumo de agua es por medio de multiplicar la población de la zona, aproximadamente 100 000 habitantes, por el consumo anual per cápita partiendo de 0.15 m^3 por día (datos proporcionado por OOAPAS), a este valor (global) se sumó el porcentaje de fugas en la red en México que se ha estimado entre un 52% y un 60% del total (Salazar y Pineda 2010). Considerando el promedio de 56%, se tiene un consumo aproximado de agua subterránea en la zona Morelia-Capula de $8\,541\,000 \text{ m}^3/\text{año}$. Se observa que el método 1 y el método 2 proporcionan valores similares siendo $8\,869\,184.64 \text{ m}^3/\text{año}$ y $8\,541\,000 \text{ m}^3/\text{año}$, respectivamente.

2.4 Caracterización hidrogeológica

2.4.1 Rasgos hidrogeológicos generales

La zona Morelia-Capula es considerada una zona de recarga debido a la presencia de materiales geológicos permeables (Israde-Alcántara et al. 2005) y la amplia área de captación que escurre desde los volcanes el Quinceo, Las Tetillas y el cerro del Águila.

En la zona existen manantiales (figura 2.22) que tienen flujo durante todo el año, y otros que son de tipo estacional y solo aparecen por unos meses después de la época de lluvias, manifestando la presencia de flujos locales. Los manantiales se asocian a dos orígenes, el contacto entre materiales volcánicos y fluviolacustres, y aquellos asociados a fallas geológicas. Ejemplos de manantiales asociados al contacto entre materiales volcánicos y fluviolacustres son Hacienda Itzícuaró, San Isidro Itzícuaró, Parian y Tinijaro, se observa que estos afloramientos están alineados. Manantiales asociados a fallas geológicas son Balneario Cointzio (el cual se asocia a un flujo intermedio-regional por su temperatura de 32°C) y otros pequeños afloramientos ubicados sobre el escarpe de la falla La Paloma.

Las fallas geológicas juegan un papel importante en la hidrogeología de la zona Morelia-Capula. Se observa en algunos sitios que las fallas interconectan flujos profundos con superficiales, tal es el caso del pozo el Cerrito el cual se ubica directamente sobre una falla geológica, los datos señalan que la temperatura del agua llega a 29°C.

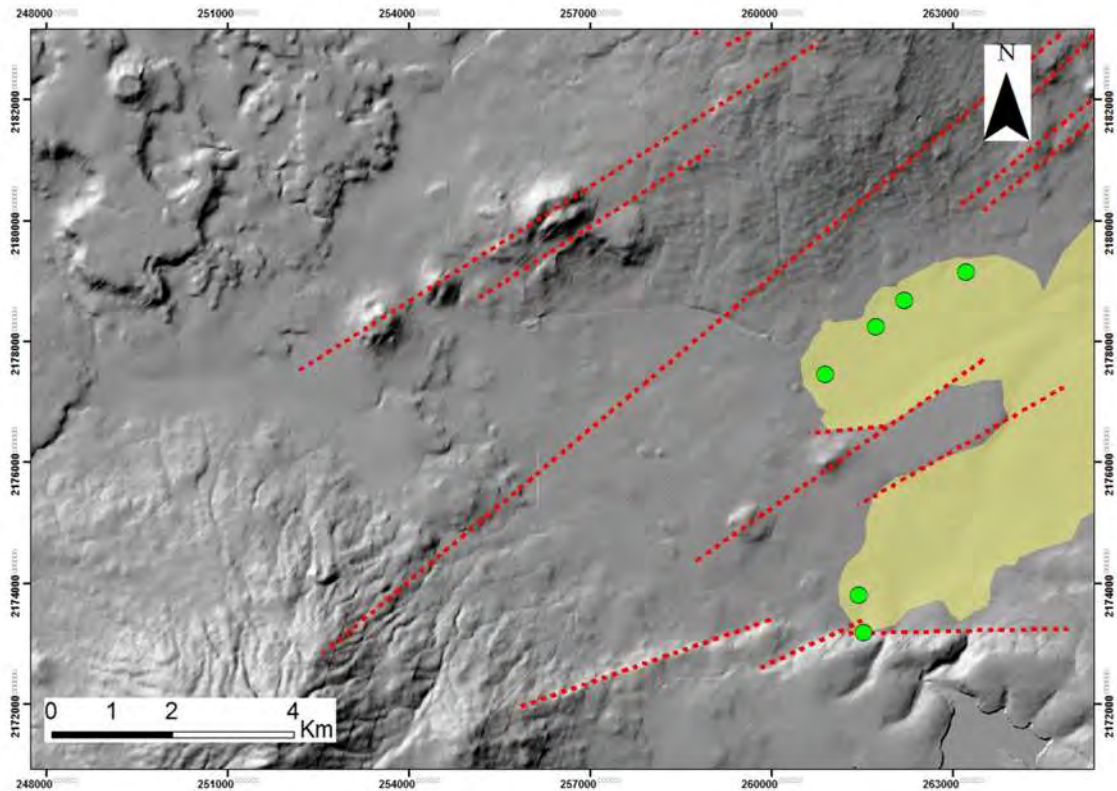


Figura 2.22 Manantiales (puntos verdes), fallas geológicas (líneas rojas) y ubicación de materiales fluviolacustres (zona amarilla) en la zona de estudio.

La información histórica de los abatimientos del agua subterránea en la zona Morelia-Capula se presenta en la tabla 2.5. Tomando en cuenta la información consultada en las bases de datos de OOAPAS y CONAGUA se tiene que la superficie freática previa a la explotación del agua subterránea se localizaba aproximadamente a los 30 metros de profundidad. Al año 2015 la superficie freática se encontraba entre 49 y 138 metros de profundidad, partiendo de esta información se obtiene un promedio de 74.63 m, considerando un periodo de 21 años (1994 al 2015) el abatimiento ha sido de 44.63 m, presentándose un abatimiento anual promedio es de 2.13 m/año.

Tabla 2.5 Información histórica de los abatimientos de pozos ubicados dentro de la zona de estudio.

Sitio	Clave	Datos piezométricos									
		Año	2001	2007	2015						
23 de Marzo	1	Año									
		Abatimiento (m)	44	44	123						
La Esperanza	2	Año	1995	1999	2002	2003	2007	2015	2016		
		Abatimiento (m)	89	65	103	103	115	137.9	137.53		
Ricardo Flores M.	3	Año	1999	2000	2001	2002	2003	2007	2014	2015	2016
		Abatimiento (m)	60	67	87	65	65	65	90	116.4	117.17
San Isidro Itzicuaro	4	Año	1993	1994	1999	2002	2003	2007	2014	2015	2016
		Abatimiento (m)	18	16.5	84	84	80	84	108	123.5	125.88
San José Itzicuaro	5	Año	2004	2013	2015	2016					
		Abatimiento (m)	53	78	83.28	84.22					
Arko San Antonio	6	Año	2005	2006	2007	2012	2014	2015			
		Abatimiento (m)	31	39.5	31	42	42	58.73			
Mariano Abasolo	7	Año	2000	2003	2007	2014					
		Abatimiento (m)	14	14	14	30					
Tzindurio Sarch	8	Año	2005	2014	2015						
		Abatimiento (m)	33.2	33	39.21						
San Juanito Itzicuaro	9	Año	1990	1999	2004	2005	2007	2012	2015		
		Abatimiento (m)	20	43	49	54.5	55	53	83.28		
Año de 1815	10	Año	2001	2002	2002	2006	2007	2014	2015	2016	
		Abatimiento (m)	96	113	128	131	131	129	141.03	145	
Gas del Lago	11	Año	2004	2015							
		Abatimiento (m)	48.3	51.7							
Villa Magna 3	12	Año	2008	2015	2016						
		Abatimiento (m)	60	135	147.42						
Villas del Pedregal 1	13	Año	2007	2008	2011	2015	2016				
		Abatimiento (m)	38	51	76	103.1	90.17				
Ignacio Allende	15	Año	1992	2007	2015	2016					
		Abatimiento (m)	29.6	29	59.67	59.91					
Residencial Tinjaro	16	Año	2001	2012	2014	2015					
		Abatimiento (m)	53	60	60	69.27					
Heroes Republicanos	17	Año	2003	2014	2015	2016					
		Abatimiento (m)	43	41	42.38	42.83					
Arko San Juan	18	Año	2004	2008	2012	2015	2016				
		Abatimiento (m)	78.6	61	90	98.83	100.28				
La Hacienda 1	19	Año	2008	2015							
		Abatimiento (m)	78	63							
Capula 2	20	Año	2001	2008	2015	2016					
		Abatimiento (m)	49	76	49.33	48.84					
Tacícuaro	21	Año	2004	2008							
		Abatimiento (m)	41	61							
Lomas de a Maestranza	23	Año	2008	2012	2015	2016					
		Abatimiento (m)	52	49	49.71	50.82					
Río Florido	24	Año	2004	2015							
		Abatimiento (m)	20	22.15							
Rancho Nuevo	25	Año	2008	2015							
		Abatimiento (m)	55	69.75							
El Cerrito Itzicuaro	26	Año	2002	2004	2008	2015					
		Abatimiento (m)	31.2	41	54	61.8					
Hacienda Itzicuaro	29	Año	2008	2015							
		Abatimiento (m)	62	38.38							
San Nicolás Obispo	31	Año	2004	2008							
		Abatimiento (m)	82.5	65							
Cuanajillo	32	Año	2007	2008							
		Abatimiento (m)	85	77							
Tanganxoan	38	Año	1999	2002	2007	2015	2016				
		Abatimiento (m)									

		Abatimiento (m)	62	66	70	85.84	88.16				
Las Garzas	39	Año	2004	2008							
		Abatimiento (m)	51	42							
P. Monitoreo	40	Año	2008								
		Abatimiento (m)	62								
La Concepción	41	Año	2004								
		Abatimiento (m)	80								
INIRENA	42	Año	1999	2015							
		Abatimiento (m)	21	41.39							

Con los datos de los niveles estáticos de los pozos y las alturas de los manantiales se generó la superficie piezométrica respecto al año 2015 (figura 2.23) que es cuando se contó con la mayor cantidad de información. En algunos pozos no se fue posible realizar la medición del nivel estático en año 2015 por lo cual se generaron proyecciones respecto a la fecha del último dato. La superficie piezométrica se elaboró mediante una interpolación kriging en el software Surfer versión 10.

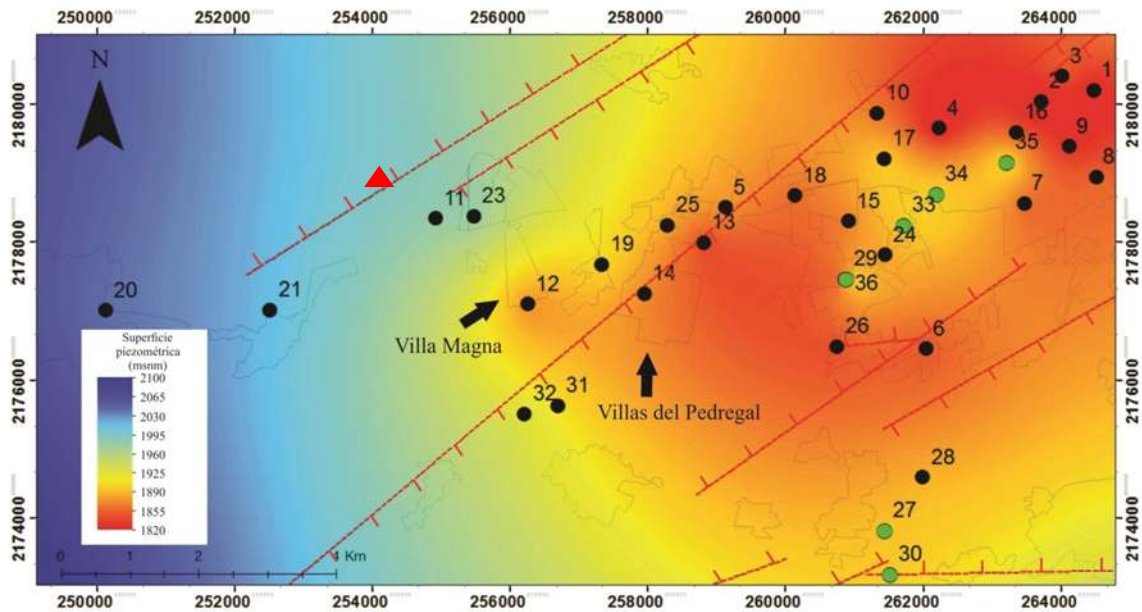


Figura 2.23 Superficie piezométrica de la zona Morelia-Capula. Manantiales (puntos verdes), pozos (puntos negros), antiguo tiradero (triángulo naranja) y fallas geológicas (líneas rojas).

La superficie piezométrica muestra que los mayores abatimientos se presentan en donde existe una mayor densidad de pozos, lo cual sucede en las zonas más pobladas, como es el caso de los fraccionamientos de Villa Magna y Villas del Pedregal al igual que los pozos cercanos a la ciudad de Morelia (1, 2, 3, 4, 9, y 16). Además, los pozos ubicados en las zonas con mayor densidad poblacional son aquellos que trabajan durante más horas por día, en algunos casos (pozos 12 y 14) operan en forma ininterrumpida, mientras que en otros trabajan por medio de sensores que cuando detectan bajos niveles en los tanque de almacenamiento se activan (pozos del OOAPAS). La figura 2.23 permite observar la presencia de grandes conos de abatimiento que alteran los flujos naturales de agua subterránea.

2.4.2 Pruebas de bombeo

Para identificar las propiedades hidrogeológicas del sistema acuífero de la zona Morelia-Capula se realizaron pruebas de bombeo. Para realizar las pruebas de bombeo se tomaron datos en pozos de extracción, los cuales se dejaron descansar durante doce horas antes de la adquisición de datos. Las mediciones piezométricas se realizaron con una sonda marca Solinst modelo Water Level Meter 101 con una longitud de 300 metros. En la figura 2.24 se muestra una imagen con la ubicación de los sitios donde se tienen datos o se llevaron a cabo pruebas de bombeo.

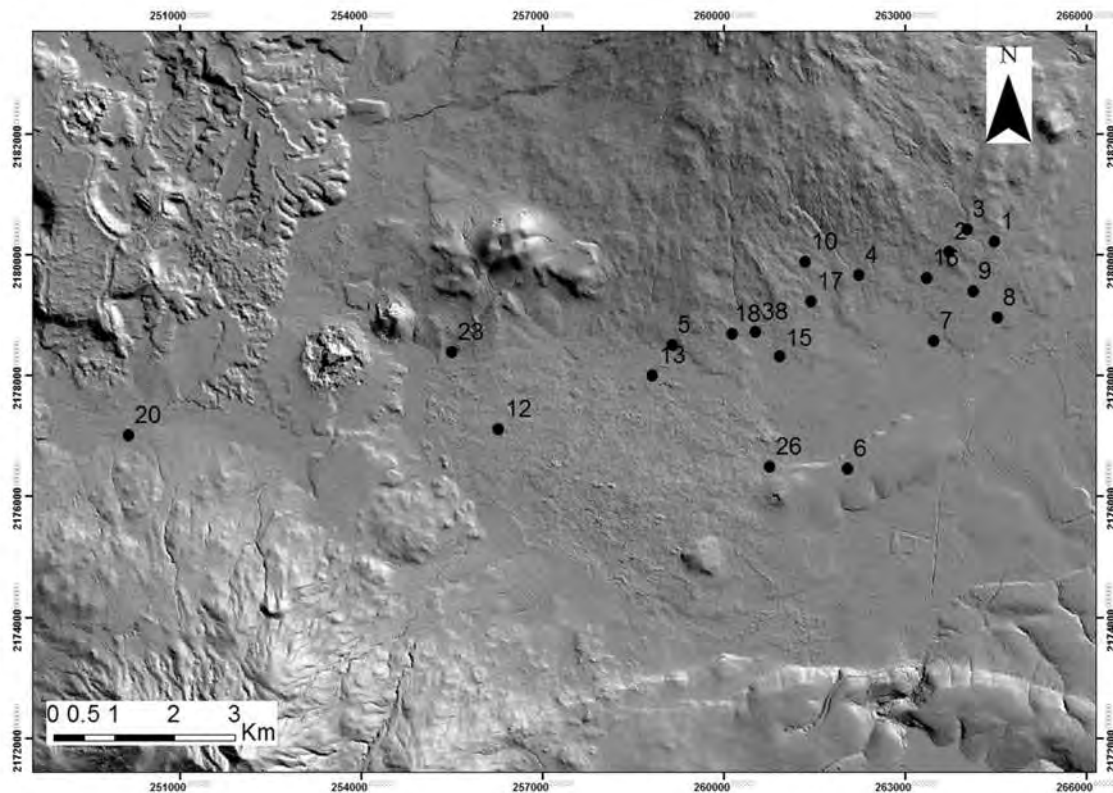


Figura 2.24 Sitios donde se realizaron pruebas de bombeo.

Las pruebas de bombeo (figuras 2.25 a 2.44) se interpretaron mediante el software AQTESOLV versión 4.0. Para elegir la solución para obtener los parámetros hidrogeológicos se tomaron en cuenta tres criterios:

- La geología, donde se consideró la presencia o ausencia de estratos confinantes o semiconfinantes.
- El ajuste de los datos respecto a la curva de la solución.
- El valor de la porosidad, se descartaron aquellos resultados donde la porosidad era mayor a 1 (error del procedimiento de cálculo del programa AQTESOLV).

En algunos pozos se observó que las curvas presentaron buen ajuste respecto a los datos (pozos 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 17, 20 y 23), mientras que en otros (1, 4, 7, 12, 13, 15, 16, 18, 26 y 38) el ajuste presentó variaciones respecto a los datos. Las variaciones de la curva respecto a los datos se pueden asociar a que el pozo cruza por litologías con diferentes transmisividades y el dato que se obtiene es un valor global de las transmisividades asociadas a cada estrato. También se debe tener en consideración que en ambientes volcánicos existe el fenómeno de doble porosidad, existiendo una porosidad intergranular de la matriz y otra por fisuración. La variación de la porosidad afecta directamente a los valores de transmisividad y por la tanto a la permeabilidad. Debido a la heterogeneidad de los estratos geológicos y a las variaciones de la porosidad es de esperarse que en un medio volcánico los resultados de las pruebas de bombeo presenten cierta diferencia entre los datos y las curvas de las soluciones analíticas.

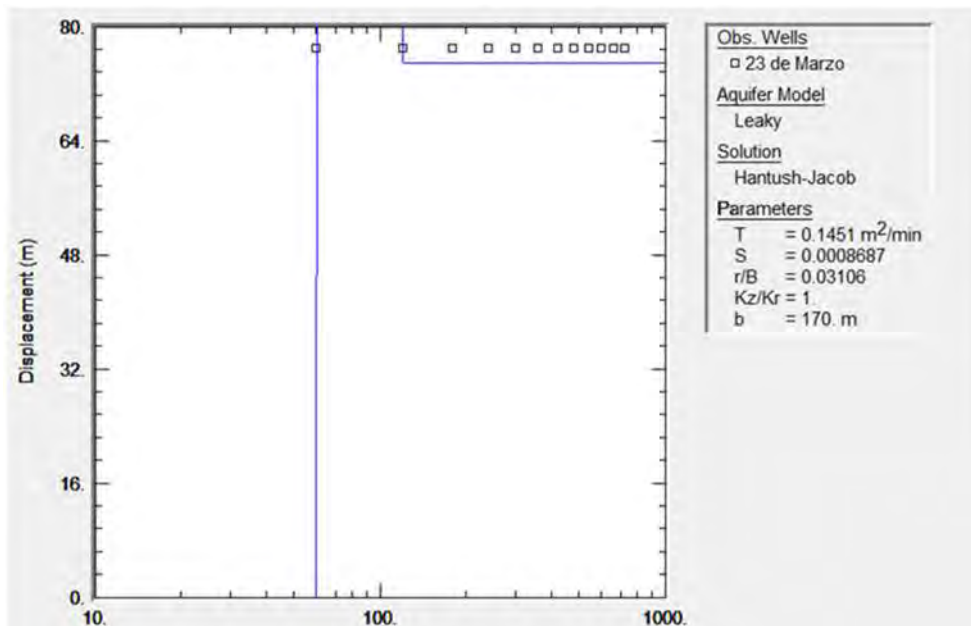


Figura 2.25 Prueba de bombeo del pozo 1 (23 de Marzo).

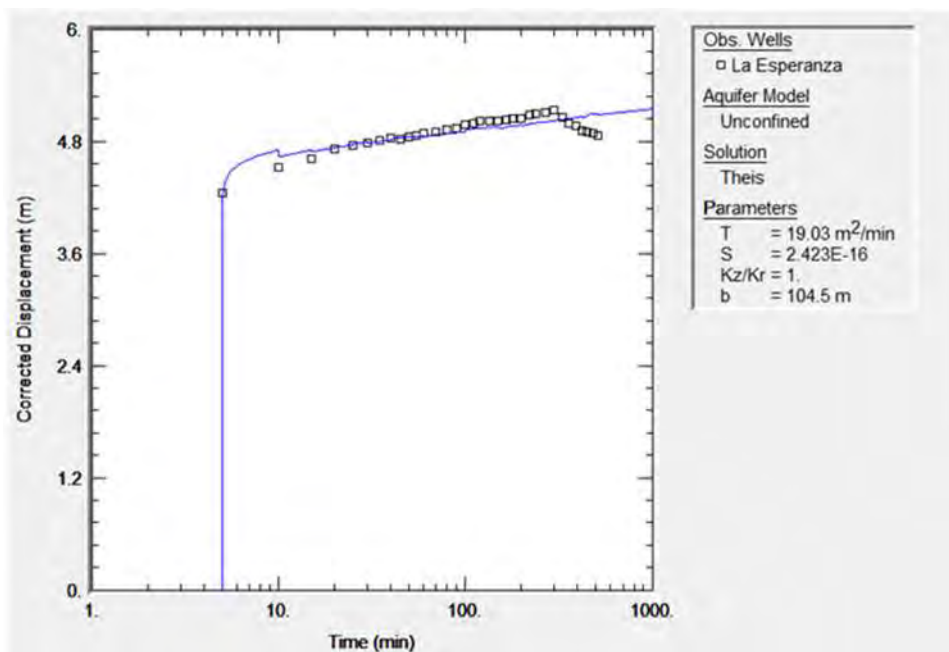


Figura 2.26 Prueba de bombeo del pozo 2 (La Esperanza).

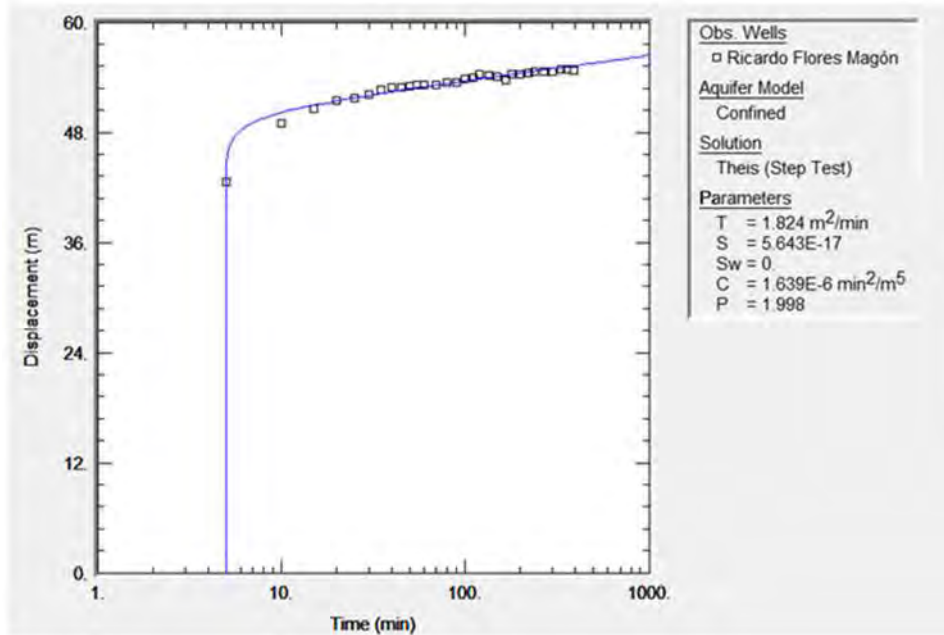


Figura 2.27. Prueba de bombeo del pozo 3 (Ricardo Flores Magón).

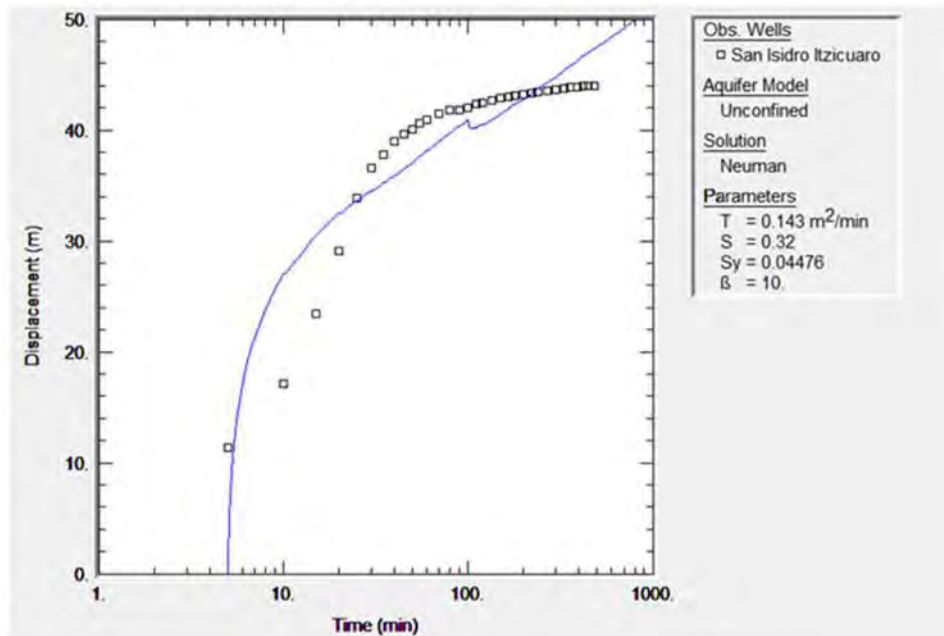


Figura 2.28 Prueba de bombeo del pozo 4 (San Isidro Itzicuaró).

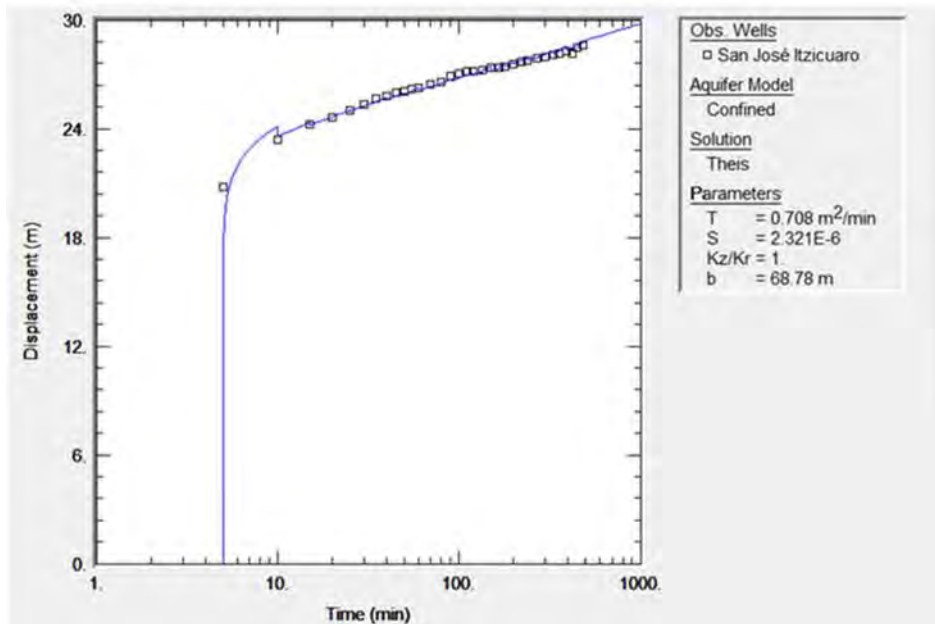


Figura 2.29 Prueba de bombeo del pozo 5 (San José Itzicuario).

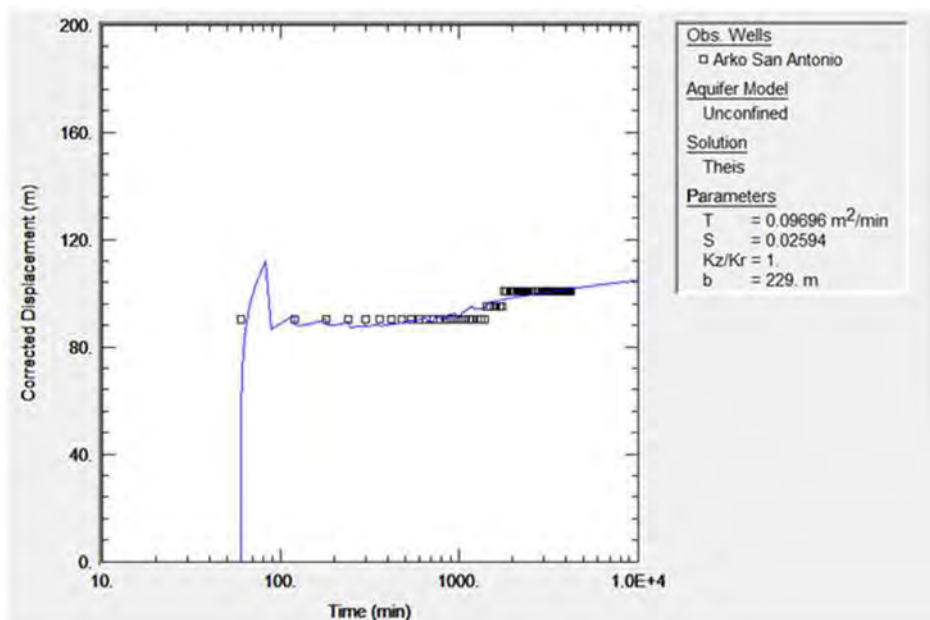


Figura 2.30 Prueba de bombeo del pozo 6 (Arko San Antonio).

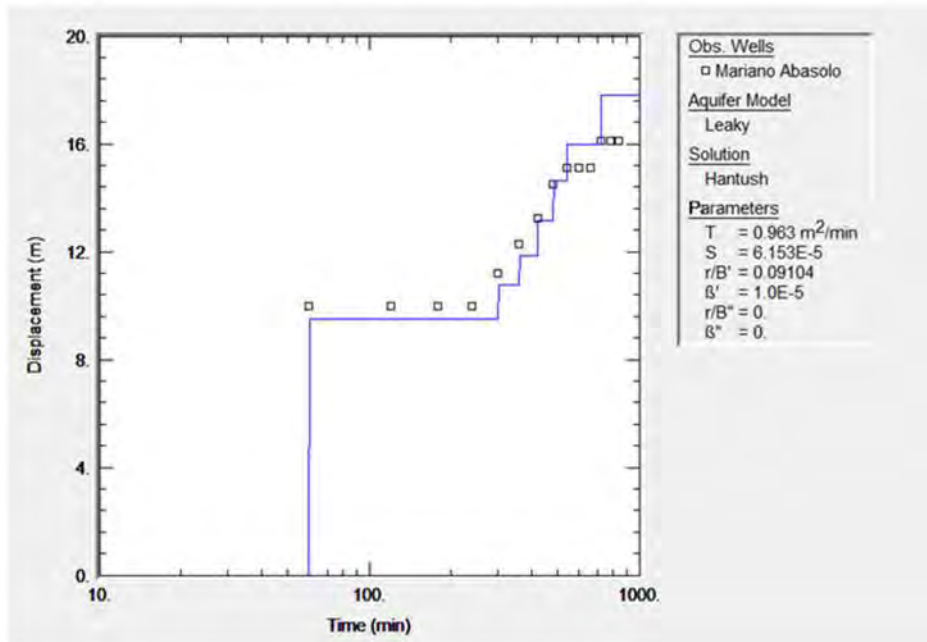


Figura 2.31. Prueba de bombeo del pozo 7 (Mariano Abasolo).

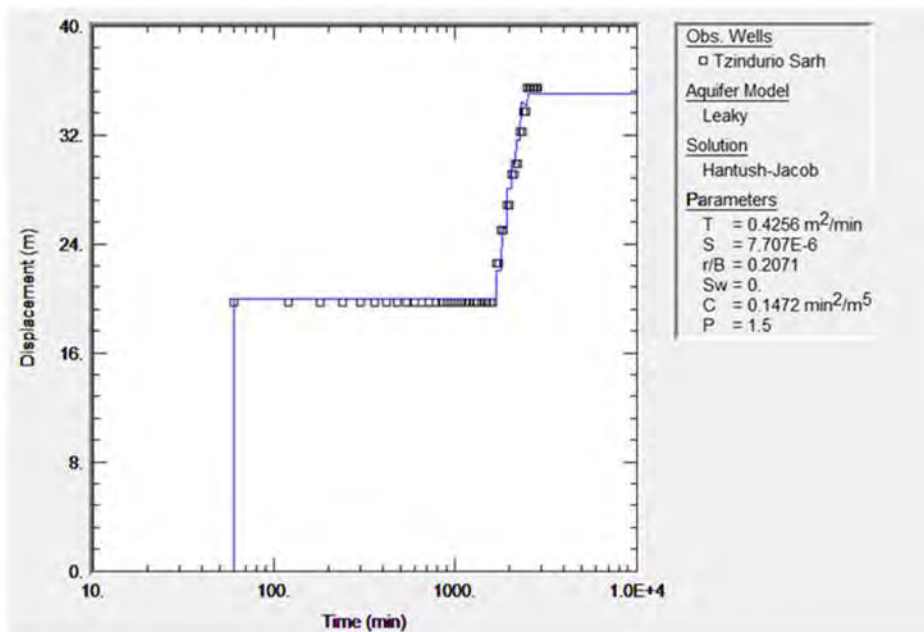


Figura 2.32 Prueba de bombeo del pozo 8 (Tzindurio Sarh).

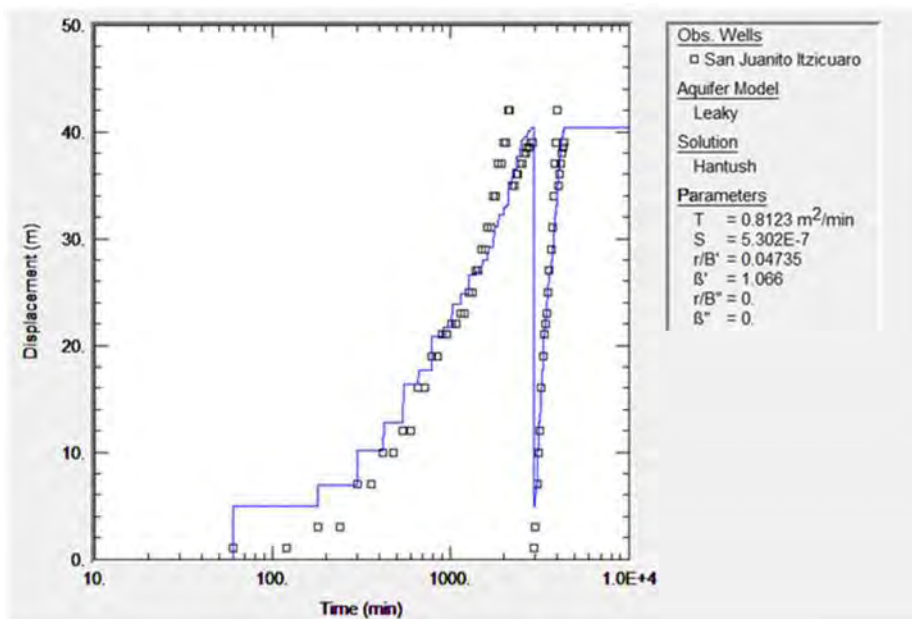


Figura 2.33 Prueba de bombeo del pozo 9 (San Juanito Itzicuaró).

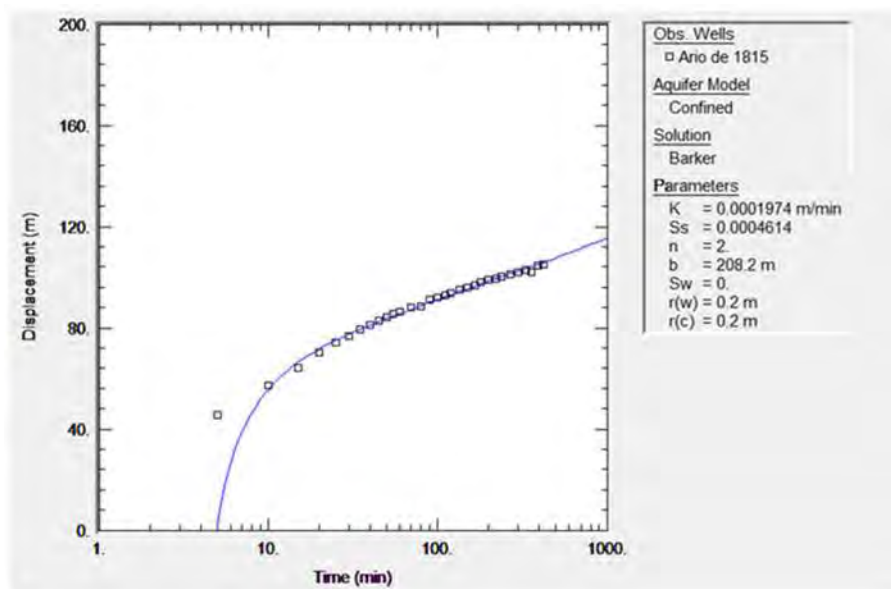


Figura 2.34 Prueba de bombeo del pozo 10 (Ario de 1815).

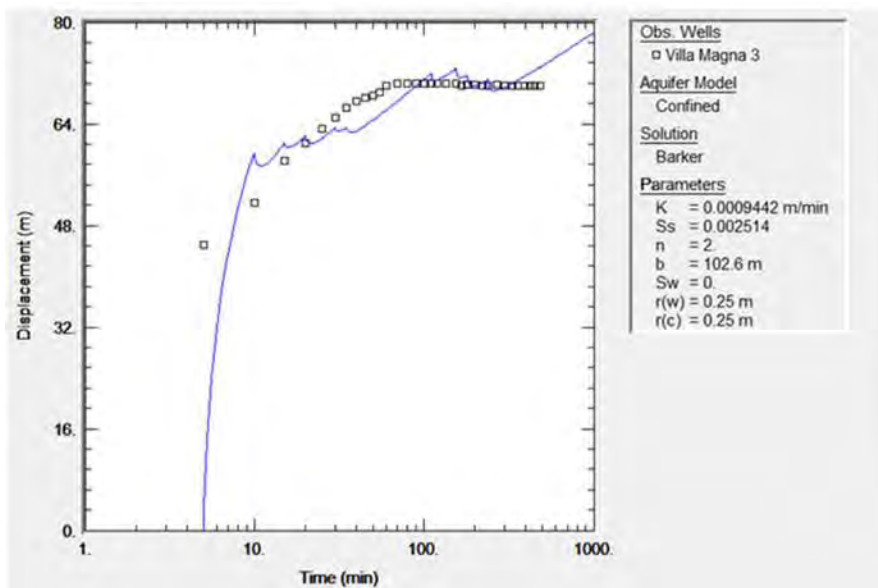


Figura 2.35 Prueba de bombeo del pozo 12 (Villa Magna 3).

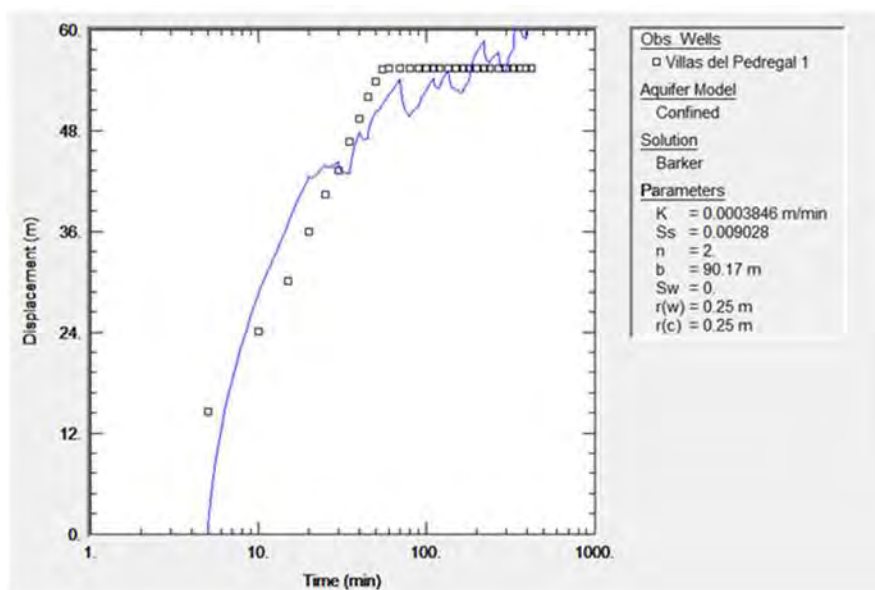


Figura 2.36 Prueba de bombeo del pozo 13 (Villas del Pedregal 1).

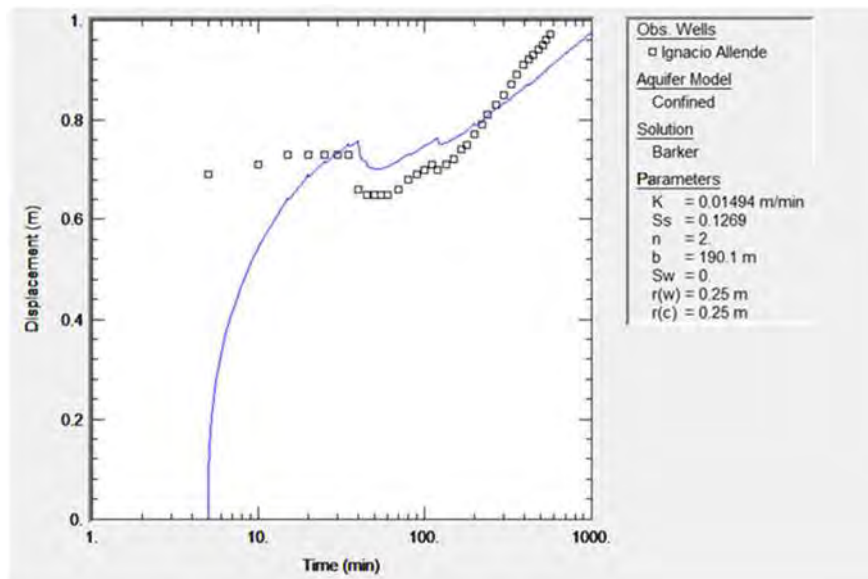


Figura 2.37 Prueba de bombeo del pozo 15 (Ignacio Allende).

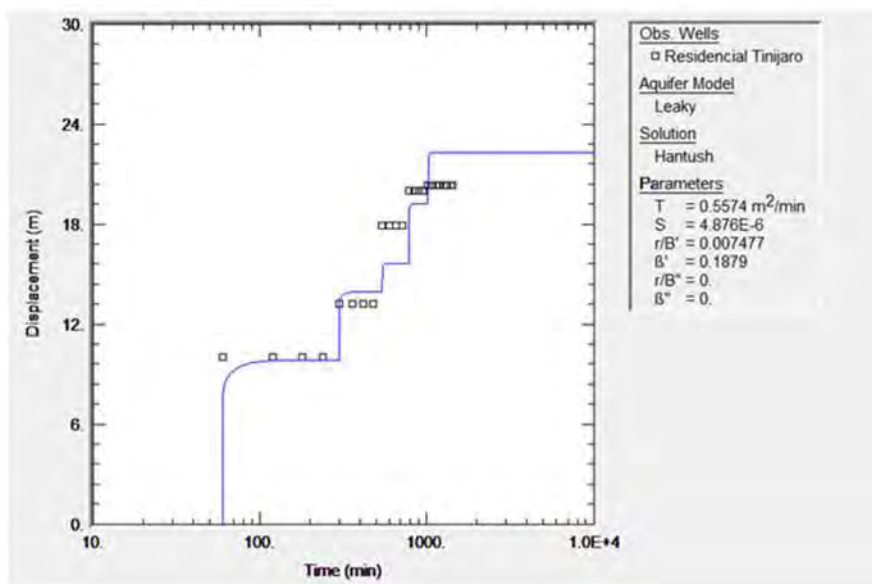


Figura 2.38 Prueba de bombeo del pozo 16 (Residencial Tinijaro).

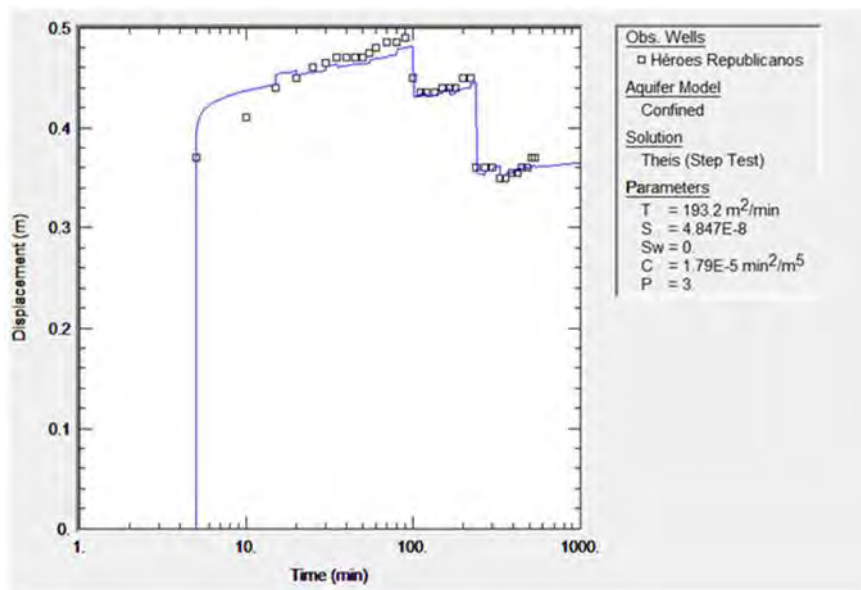


Figura 2.39 Prueba de bombeo del pozo 17 (Héroes Republicanos).

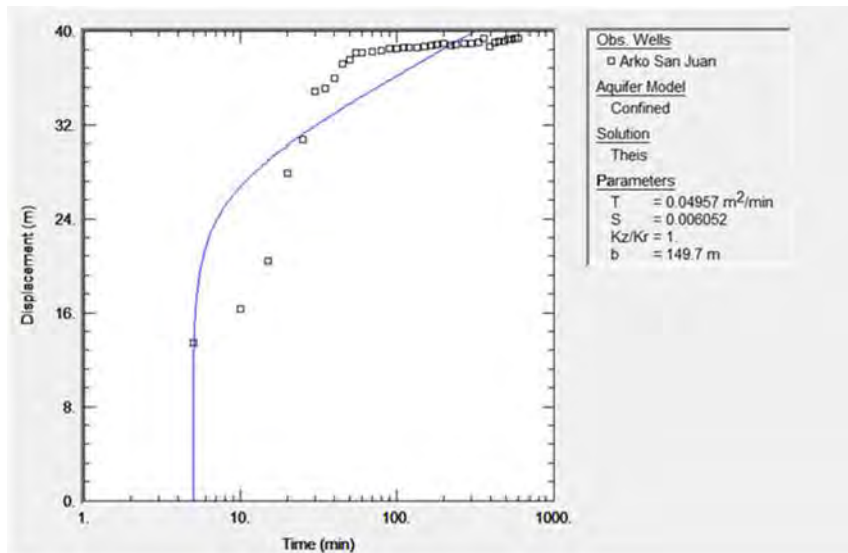


Figura 2.40 Prueba de bombeo del pozo 18 (Arko San Juan).

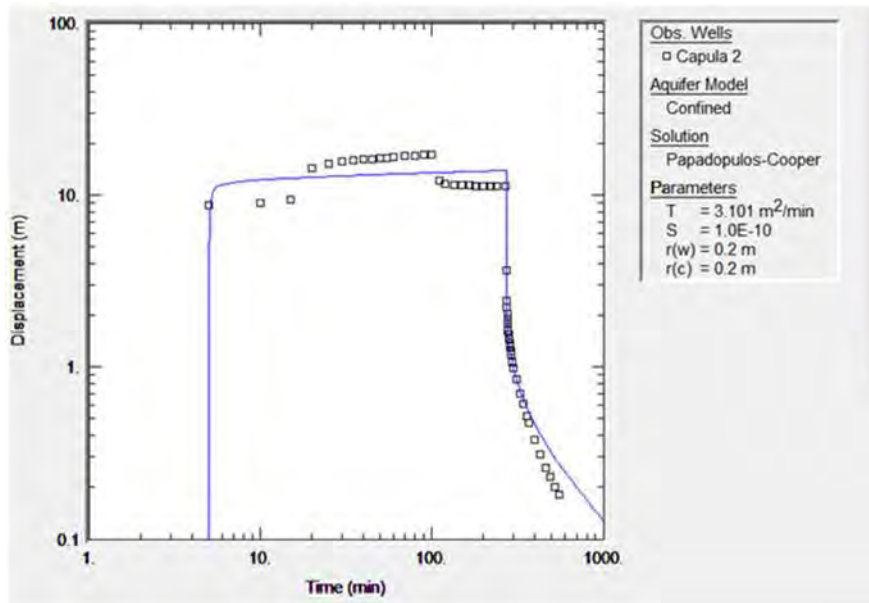


Figura 2.41 Prueba de bombeo del pozo 20 (Capula 2).

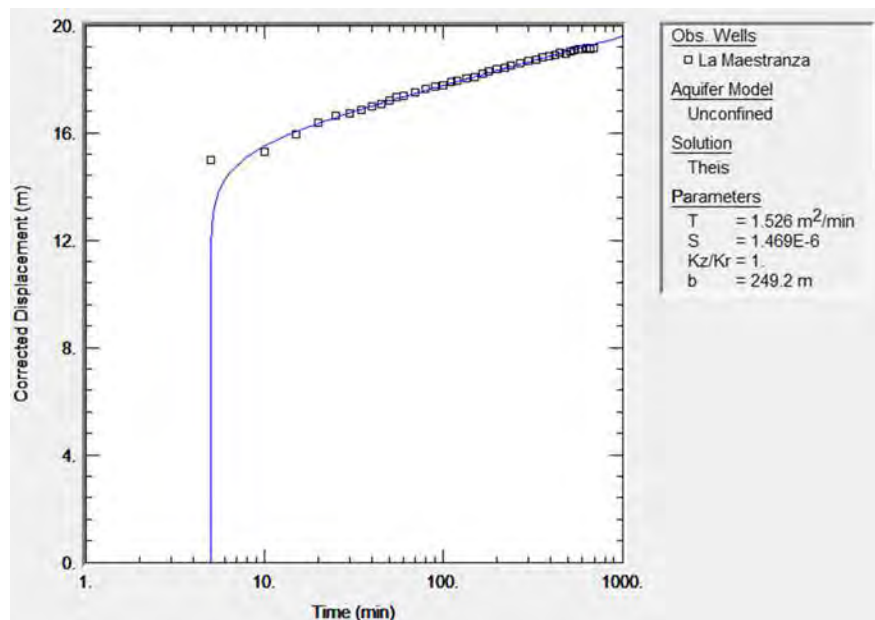


Figura 2.42 Prueba de bombeo del pozo 23 (La Maestranza).

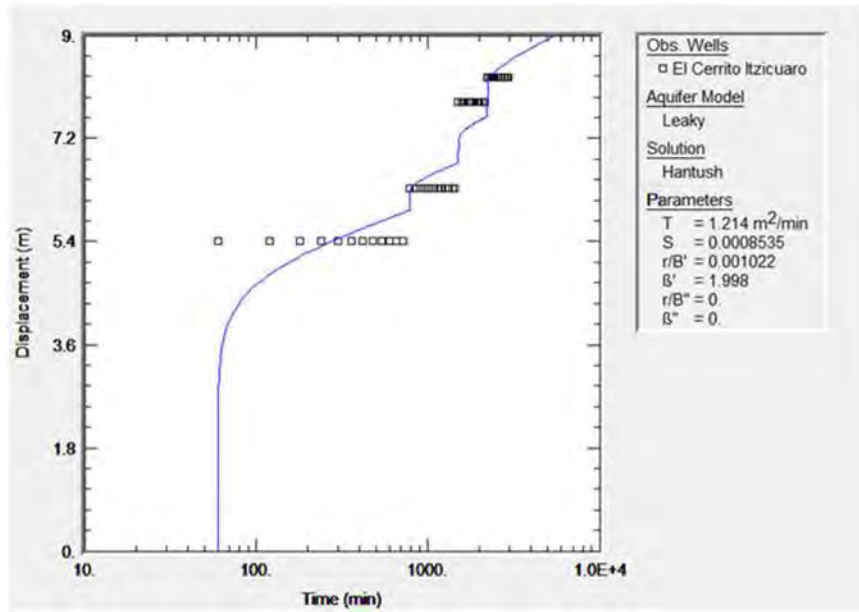


Figura 2.43 Prueba de bombeo del pozo 26 (El Cerrito Itzicuaró).

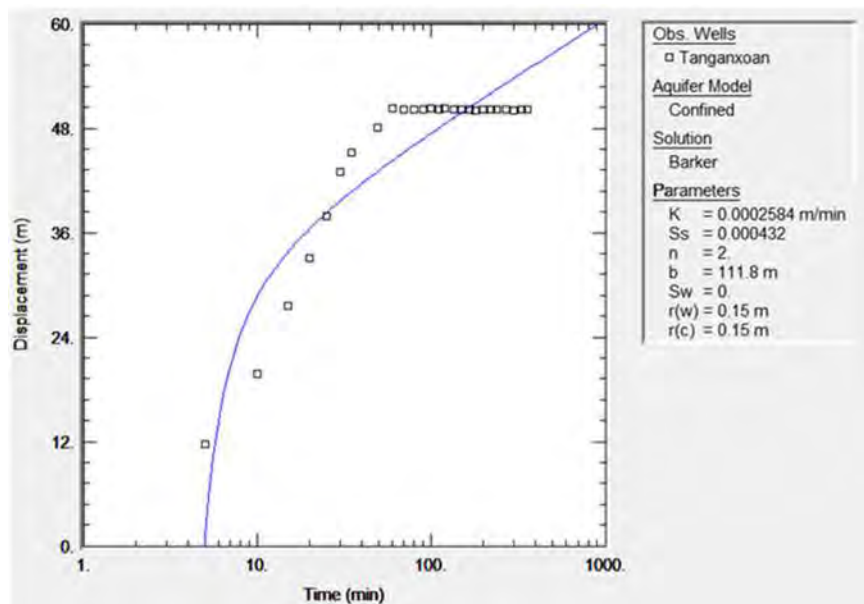


Figura 2.44 Prueba de bombeo del pozo 38 (Tanganxoan).

La síntesis de los resultados de las pruebas de bombeo se muestra en la tabla 2.6. La conductividad hidráulica presentó valores dentro de un rango de 4.3×10^{-16} a 0.025 m/s y la porosidad de 2.46×10^{-6} a 0.32. Para tener valores promedio de la conductividad hidráulica y porosidad en los medios volcánicos y fluviolacustres, se agruparon los sitios ubicados en medio volcánico (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 23, 26 y 38) y los del medio fluviolacustre (7 y 15), se excluyeron del cálculo los pozos 2 y 17 por presentar valores extremos. En el medio volcánico la conductividad hidráulica fue de 0.00007701 m/s y la porosidad de 0.02289. En el medio fluviolacustre la conductividad hidráulica fue de 0.0001677 m/s y la porosidad de 0.6348.

Tabla 2.6 Resultados de las pruebas de bombeo. Las fechas con asterisco son aproximadas.

ID	Año de construcción	Fecha de la prueba	Comportamiento del acuífero	Método	T (m ² /min)	S ó Ss	b (m)	K (m/s)
1	2001	29/09/2001	Semiconfinado	tush-Jacob	0.1451	0.0008687	170	1.422E-05
2	1994	25/02/2016	Libre	Theis	19.03	2.42E-16	104.5	0.00303509
3	1999	27/04/2016	Confinado	Theis	1.824	5.65E-17	182.8	0.0001663
4	1995	25/04/2016	Libre	Neuman	0.143	0.32	74.12	3.2155E-05
5	1994*	21/04/2016	Confinado	Theis	0.708	0.000002321	68.78	0.00017156
6	2003*	15/06/2005	Libre	Theis	0.09696	0.02594	229	7.0568E-06
7	2001	16/11/2000	Semiconfinado	Hantush	0.963	0.00006153	186	8.629E-05
8	2002*	08/05/2002	Semiconfinado	Hantush-Jacob	0.4256	0.000007707	175.2	4.0487E-05
9	1990	06/07/1990	Semiconfinado	Hantush	0.8123	5.302E-07	180	7.5213E-05
10	2002*	18/03/2016	Confinado	Barker	0.04109868	0.0004614	208.2	0.00000329
12	2008*	11/03/2016	Confinado	Barker	0.09687451	0.002514	102.6	1.5737E-05
13	2005	10/03/2016	Confinado	Barker	0.03467938	0.009028	90.17	0.00000641
15	1992*	02/03/2016	Confinado	Barker	2.840094	0.1269	190.1	0.000249
16	2002*	23/10/2001	Semiconfinado	Hantush	0.5574	0.000004879	38	0.00024447
17	2003	16/03/2016	Confinado	Theis (Time-Step)	193.2	4.847E-08	127.17	0.02532044
18	2000*	18/04/2016	Confinado	Theis	0.04957	0.006052	149.7	5.5188E-06
20	2006	07/03/2016	Confinado	Papadopulos-Cooper	3.101	1E-10	251.2	0.00020575
23	2007	08/03/2016	Libre	Theis	1.526	0.000001469	249.2	0.00010206
26	1997*	31/01/2003	Semiconfinado	Hantush	1.214	0.0008535	147	0.00013764
38	2004*	19/04/2016	Confinado	Barker	0.02888465	0.000432	111.8	4.306E-06

En la figura 2.45 se muestra el comportamiento hidrogeológico del sistema acuífero en los sitios donde se realizaron pruebas de bombeo. Se puede apreciar que los pozos ubicados al oeste tienen características de acuífero confinado, coincidiendo con lo señalado por Israde-Alcántara (2005). Los sitios con carácter libre o semiconfinado se ubicaron al este de la zona de estudio, en las cercanías a la ciudad de Morelia, donde los pozos tienen mayor tiempo de haber sido construidos. Los resultados de las pruebas de bombeo muestran que en las cercanías a Morelia el sistema acuífero pierde su característica de confinado y cambia a libre o semiconfinado (en el paleolago), el cambio a libre se puede asociar a la extracción de agua del subsuelo, lo que pondría en evidencia que los bombeos de agua subterránea están alterando la dinámica del sistema acuífero. Otra explicación puede ser que en la zona del paleolago los depósitos lacustres y fluviolacustres le confieran al acuífero el carácter de semiconfinado y (o) libre.

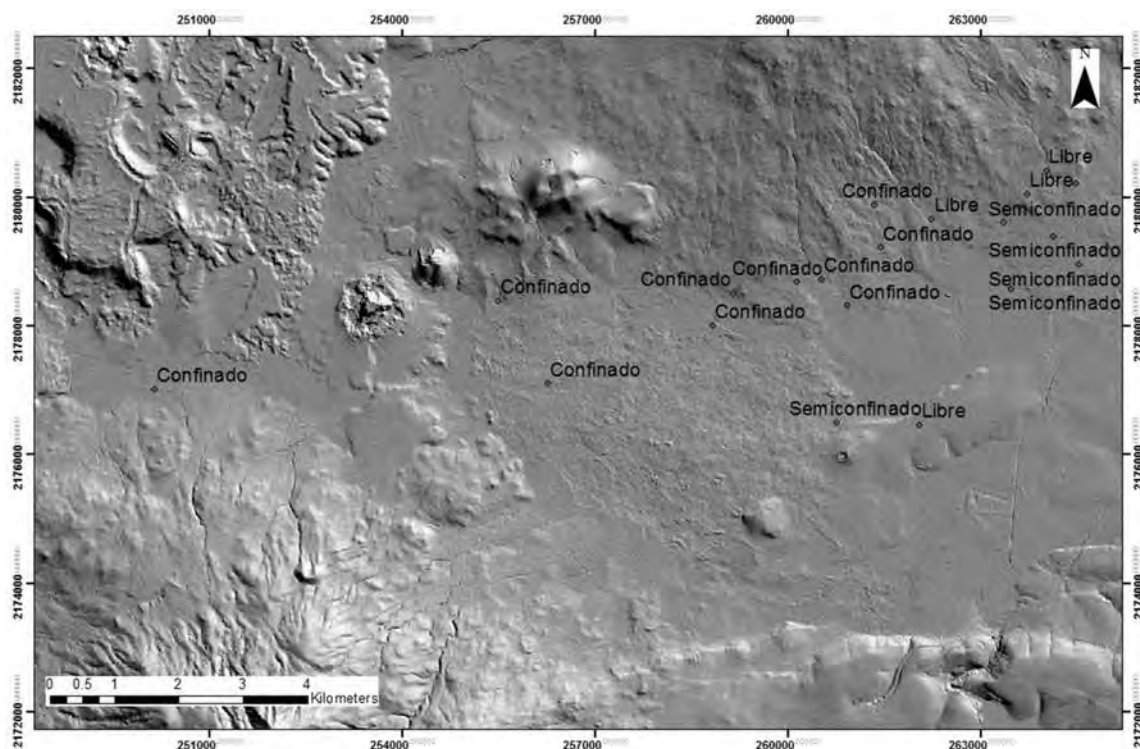


Figura 2.45 Distribución espacial del comportamiento del acuífero en base a la interpretación de las pruebas de bombeo.

La transmisividad en los sitios presenta una gran variación (figura 2.46), de hasta cinco ordenes de magnitud, evidenciando la heterogeneidad y anisotropía de la zona Morelia-Capula, lo cual es muy característico de los medio volcánicos (Santamarta 2013). En las faldas del volcán Las Tetillas es donde se presenta la mayor variabilidad de la transmisividad, esto se debe a que ahí se ubican materiales geológicos relativamente jóvenes (Garduño et al. 2014), los cuales son más heterogéneos. Los materiales geológicos viejos con el tiempo pasan por procesos de alteración y compactación que atenúan los contrastes de porosidad y, por la misma razón, la permeabilidad tiende a ser menor cuanto más antiguo es el terreno (Cruz 2008). Los cambios drásticos en las permeabilidades en medios volcánicos nos indican que estos son relativamente jóvenes (Santamarta 2013).

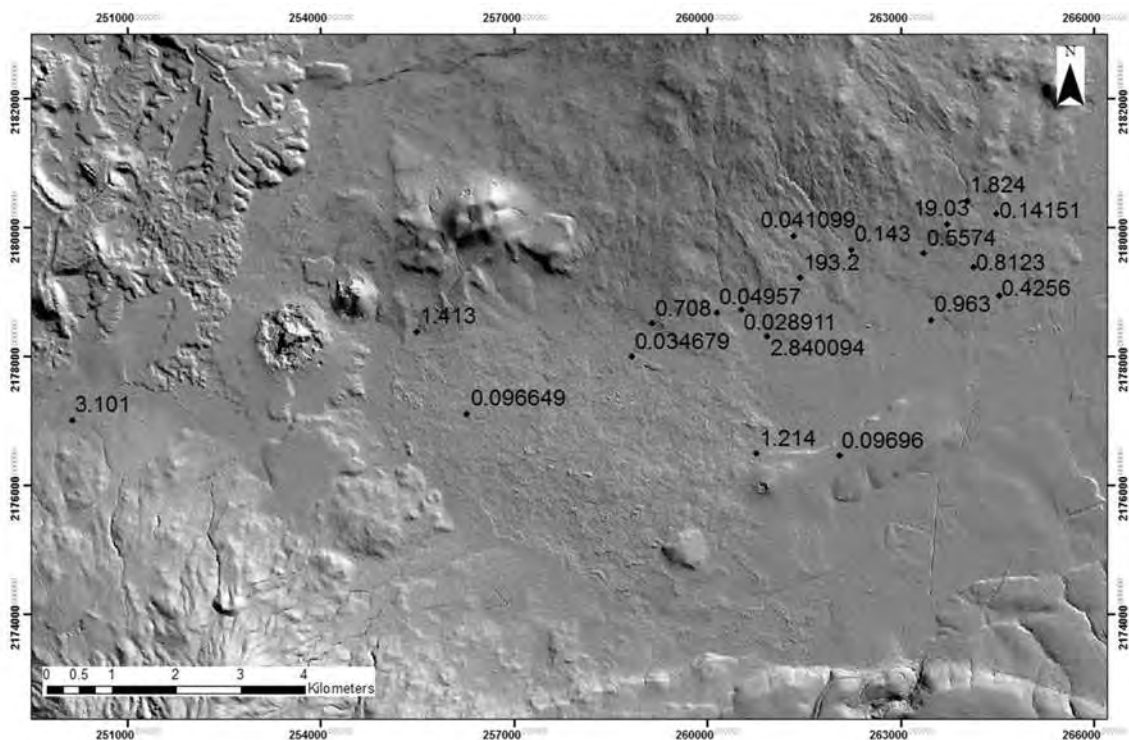


Figura 2.46 Valores de la transmisividad (m²/min) en la zona de estudio.

2.4.3 Modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio

Estudios previos (Israde-Alcántara et al. 2005; Garduño et al. 2014) consideran a la zona Morelia-Capula como un lugar de recarga para el sistema acuífero, ya que su suelo volcánico es permeable y recibe escurrimientos que provienen de Las Tetillas, El Quinceo y El Águila. Los flujos de agua subterránea van de oeste a este, siguiendo la topografía de la zona. Las direcciones de flujo se ven afectadas por las depresiones piezométricas generadas por los pozos de bombeo, los conos de abatimiento alteran los flujos naturales de agua subterránea. Las fallas geológicas favorecen la presencia de manantiales (ejemplo el manantial Balneario Cointzio), además de actuar como conductos que facilitan el ingreso de aguas profundas a estratos superficiales del sistema acuífero. En la zona existen flujos locales, intermedios y regionales. Los flujos locales se mueven en los materiales basálticos superficiales, y surgen en las zonas bajas por medio de manantiales ubicados en la periferia de la zona fluviolacustre. Los flujos intermedios se ubican en la mayor parte de la zona de estudio. Los flujos regionales se presentan en los estratos geológicos más profundos, pueden entrar en contacto con flujos intermedios por medio de las fallas geológicas, manifestándose en incrementos de la temperatura del agua subterránea.

En la figura 2.47 se presenta el modelo conceptual de la zona de estudio. La geología de la zona está compuesta por materiales volcánicos de tipo basáltico-andesítico, a excepción de un área (al este) donde se encuentran materiales fluviolacustres (con un espesor de 150 a 250 metros). En la zona Morelia-Capula se tiene un sistema acuífero, en los primeros 400 metros se identifican dos unidades hidrogeológicas, una volcánica y otra terrígena.

La unidad volcánica es producto de la actividad efusiva del corredor Tarasco, en su parte superficial se encuentran flujos locales que se mueven por materiales poco consolidados como arenas y basaltos fracturados, dando lugar a manantiales (unos perennes y otros estacionales), que surgen en la zona donde el contacto entre los materiales volcánicos y terrígenos aflora en la superficie. A mayor profundidad, la unidad volcánica presenta flujos intermedios y regionales.

La unidad ubicada en el paleolago (acuífero terrígeno), se localiza en la zona de drenaje de la subcuenca Morelia-Capula, tiene un espesor de hasta 250 metros, presenta flujos de tipo intermedio y, los materiales geológicos que la componen son en su mayoría arenas y arcillas.

El sistema acuífero varía su comportamiento hidrogeológico. Desde la localidad del Cerrito hasta Capula su carácter es confinado. De la localidad del Cerrito hacia Morelia el acuífero cambia de semiconfinado (en la zona paleolacustre) a libre (en las cercanías a Morelia).

Los pozos ubicados en la zona Morelia-Capula extraen agua subterránea de pozos perforado a una profundidad de entre 200 y 350 metros, el líquido extraído proviene de una mezcla de flujos, y su calidad disminuye al pasar de locales a regionales. El sistema acuífero se puede catalogar como sobreexplotado debido al continuo abatimiento de los niveles piezométricos el cual puede llegar en algunos sitios a los 3 metros por año.

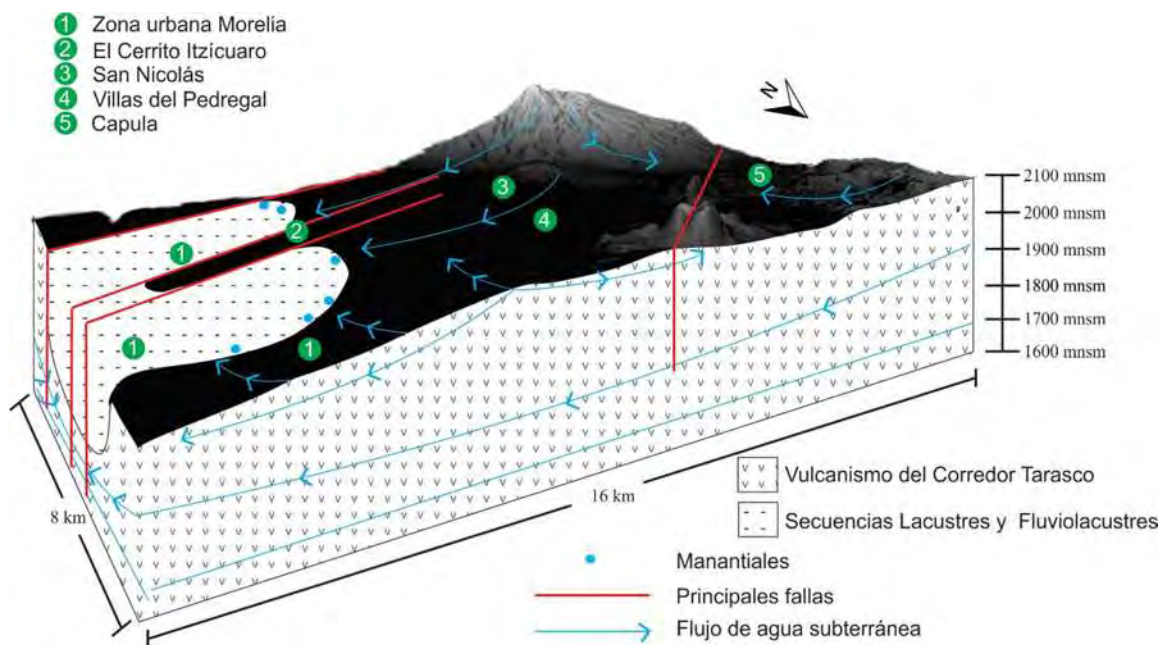


Figura 2.47 Modelo conceptual de la zona de estudio.

CAPITULO 3: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA INFILTRACIÓN DE LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL ANTIGUO TIRADERO MUNICIPAL

3.1 La problemática ambiental asociada al antiguo tiradero municipal de Morelia

El antiguo tiradero municipal de Morelia (figura 3.1) inició sus operaciones en el año 1984 y estuvo en funcionamiento por 24 años (González y Buenrostro 2012) recibiendo un aproximado de 700 toneladas diarias en un terreno de 34 hectáreas (Israde-Alcántara et al. 2009), la cantidad de residuos depositados se estima en 3 859 642 toneladas (González et al. 2011). En 2008 el antiguo tiradero fue cerrado y a un costado se construyó el actual relleno sanitario, el cual recibe los residuos municipales de Morelia y su zona conurbada. Aunque el antiguo tiradero ya no recibe residuos, sí presenta una problemática ambiental asociada a diversos factores como la presencia de fauna nociva, malos olores, emisión de gases con efecto invernadero y la más preocupante, la generación de lixiviados que escurren y se infiltran al subsuelo sin ninguna medida de control. Aun cuando un tiradero ha sido clausurado, la generación de lixiviados puede seguir por varias décadas (Tremblay et al. 2014). El antiguo tiradero de Morelia ha generado entre la población una preocupación debido a la posibilidad de que los lixiviados contaminen las aguas subterráneas. Esta preocupación se debe a la falta de control de los lixiviados, la presencia de materiales geológicos permeables (arenas y basaltos fracturados), la existencia de fallas geológicas que cruzan el tiradero, la distancia a desarrollos habitacionales (menos de 1 500 metros) y el hecho de que el agua subterránea es la fuente de abastecimiento de la zona. Estudios previos han evidenciado que la zona donde se ubica el antiguo tiradero municipal no cumple con los criterios normativos (Buenrostro e Israde 2003) ni geológicos-ambientales (Israde-Alcántara et al. 2005; Israde-Alcántara et al. 2009; Verduzco 2010) necesarios para la disposición final de residuos sólidos municipales.

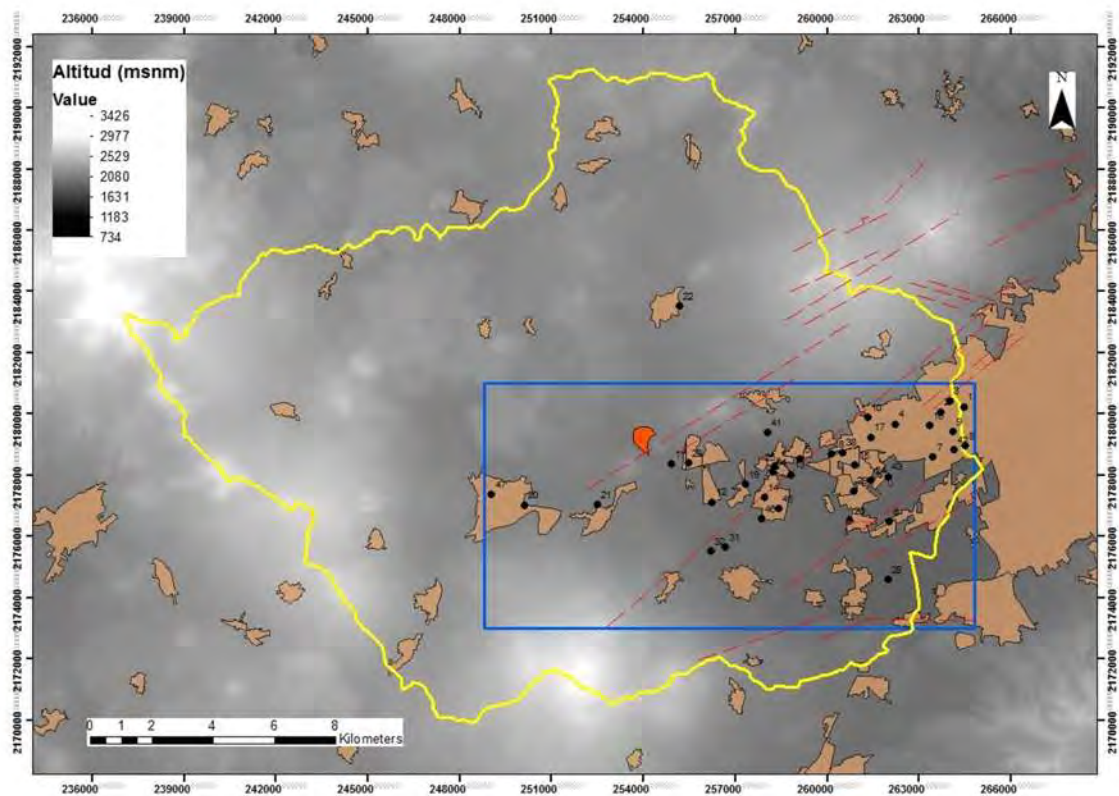


Figura 3.1 Ubicación del tiradero Municipal de Morelia (figura naranja). Subcuenca Morelia-Capula (figura amarilla), fallas geológicas (líneas rojas puntadas), zona Morelia-Capula (recuadro azul punteado), localidades (manchones salmón), pozos (puntos negros).

Imágenes fotográficas tomadas en enero de 2015 (figura 3.2) muestran que en el antiguo tiradero municipal existe una generación de lodos (figura 3.2c) y lixiviados (figura 3.2d), los cuales siguiendo la topografía del terreno escurren hacia fracturas geológicas (figura 3.2b), infiltrándose directamente en el subsuelo. Las imágenes evidencian que el antiguo tiradero municipal está emitiendo contaminantes. Es importante aclarar que la generación de lixiviados y lodos provenientes del antiguo tiradero municipal son un pasivo ambiental del cual es necesario deslindar responsabilidades.

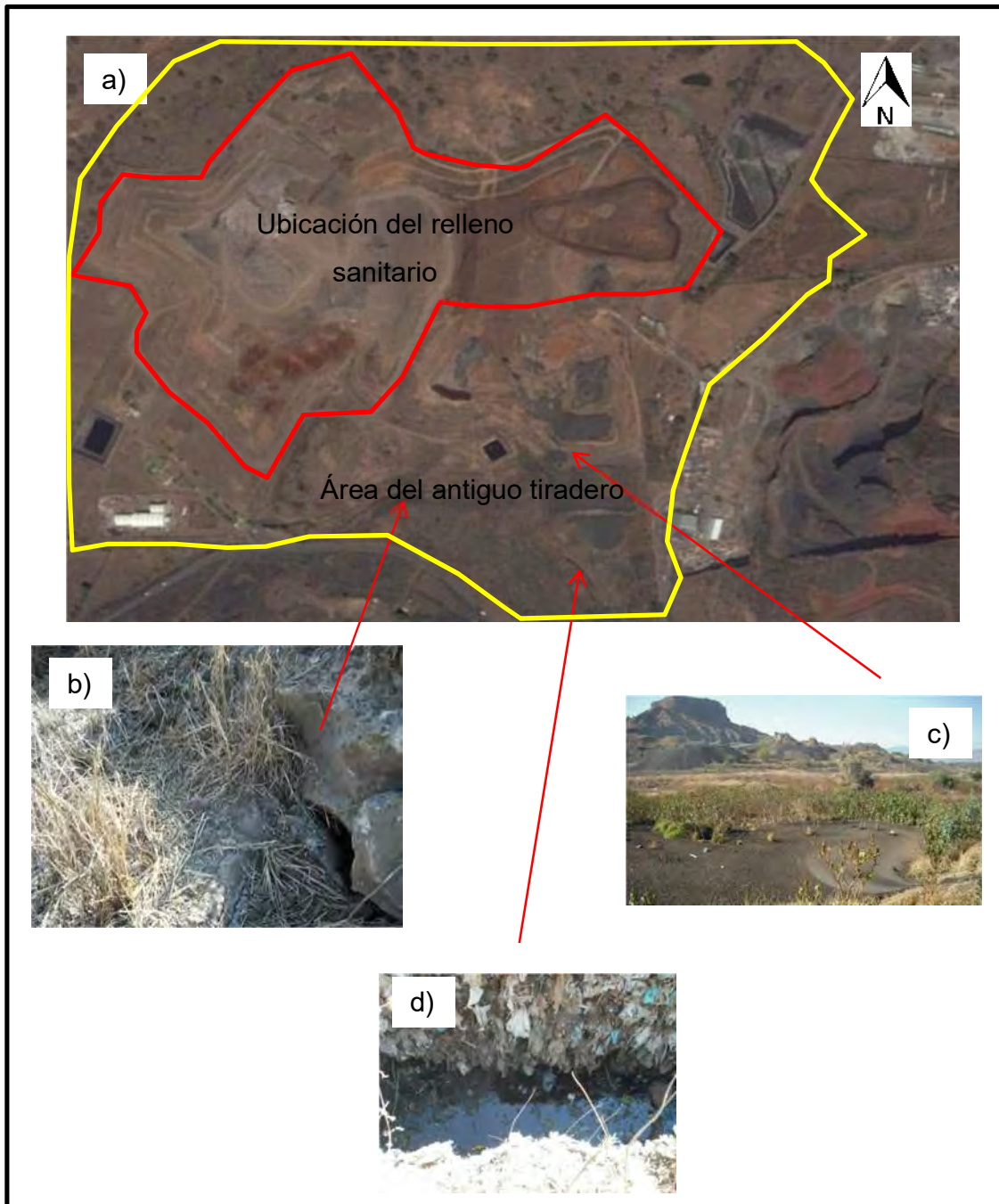


Figura 3.2 Imágenes del año 2015 (enero) del antiguo tiradero municipal de Morelia. a) Vista satelital, b) falla geológica, c) escurrimientos de lodos y d) lixiviados.

3.2 Evaluación del efecto de la infiltración de lixiviados en la calidad del agua subterránea de la zona Morelia-Capula

Para evaluar el efecto de la infiltración de lixiviados en la calidad del agua se realizaron dos muestreos durante el año 2015, uno en abril-mayo y otro en noviembre-diciembre, representando los periodos previos y posteriores a las lluvias. A los 36 sitios de estudio se les realizaron análisis fisicoquímicos y químicos.

3.2.1 Toma, transporte y almacenamiento de muestra.

En pozos las muestras se tomaron directamente de la válvula de muestreo, dejando correr el agua por 10 minutos. En manantiales la muestra se tomó en el punto más cercano a la surgencia de agua subterránea. La muestra se filtró en una membrana de celulosa de 0.45 micras marca Millipore. Posteriormente la muestra se dividió en dos partes, una para aniones y la otra para cationes. La muestra para cationes se acidificó a pH de 2 usando ácido nítrico al 65.7% grado analítico, marca J.T. Baker. Las muestras se colocaron en envases de polietileno de alta densidad, se sellaron con papel parafilm (cera) y se transportaron en una hielera hasta el laboratorio donde se almacenaron a 4°C hasta el momento de su análisis.

3.2.2 Análisis fisicoquímicos del agua subterránea

Los análisis fisicoquímicos se realizaron directamente en campo.

a) Temperatura

En los pozos la temperatura se midió directamente de la purga de agua con un termómetro de inmersión, con escala de -10 a 50°C, marca Brannan modelo LO-tox. En los manantiales la temperatura se midió en el punto más cercano a la surgencia de agua subterránea por medio de un equipo marca Hanna modelo HI 9828 con una sonda HI 769828.

b) Potencial de hidrógeno (pH)

Se midió con un potenciómetro portátil marca Hanna modelo HI 9828 con una sonda HI 769828 y un sensor HI 769828-1 que fue introducido en la muestra hasta la estabilización de la lectura.

c) Conductividad eléctrica

Se utilizó un conductímetro portátil marca Hanna modelo HI 9828 con una sonda HI 769828 y un sensor HI 769828-3 que fue introducido en la muestra hasta la estabilización de la lectura.

d) Potencial de óxido-reducción

Las lecturas fueron tomadas con un sensor portátil marca Hanna modelo HI 9828 con una sonda HI 769828 y un sensor HI 769828-1 que fue introducido en la muestra hasta la estabilización de la lectura.

e) Oxígeno disuelto

Los valores se midieron con un sensor portátil marca Hanna modelo HI 9828 con una sonda HI 769828 y un sensor HI 769828-2 que fue introducido en la muestra hasta la estabilización de la lectura.

3.2.3 Análisis químicos del agua subterránea

En el primer muestreo los análisis de cationes se realizaron en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM, mientras que los cationes se analizaron en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias de la UNAM. Para el segundo nuestros los aniones y cationes se realizaron en el Centro de Geociencias de la UNAM.

a) Análisis de aniones

Alcalinidad

Se midió en campo. Se tomó una muestra de 20 ml, a la cual se le agregaron dos gotas de solución indicadora naranja de metilo. Posteriormente se tituló la muestra con ácido sulfúrico 1.6 N por medio de un equipo de titulación portátil marca HACH.

Aniones mayores y menores.

Se analizaron bromuros, cloruros, fluoruros, fosfatos, nitratos, nitritos y sulfatos.

La cuantificación de los aniones se realizó de acuerdo al método EPA 300.1 "Determination of inorganic anions in drinking water by ion chromatography", aplicable a aguas superficiales y aguas subterráneas. El análisis químico se realizó mediante un cromatógrafo de líquidos marca Dionex LC20 con supresor ASRS-Ultra 300 4-mm, columna Ion Pac AS14A y detector electroquímico ED50. Se utilizó como fase móvil una solución binaria 8.0 mM-1.0 mM $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ para acarreo de la muestra a un flujo de 1 ml/min con un volumen de inyección de 50µl. La preparación de la curvas de calibración fue realizada con estándares marca Inorganic Ventures IF- FAS-1A, la cual constó de 7 concentraciones y para el control de la deriva del instrumento se realizó mediante una muestra de control de laboratorio preparada a partir de un estándar marca Seven Anion Standard de

Dionex la cual se analizó cada 10 muestras. Ambas soluciones usadas como estándares de referencia cuentan con trazabilidad al NIST. El coeficiente de correlación en las curvas analíticas utilizadas fue mayor de 0.9993 y los porcentajes de recuperación mayores al 90%.

b) Análisis de cationes mayores, menores y elementos traza.

Los cationes mayores analizados fueron calcio, potasio, magnesio y sodio.

Los elementos traza analizados fueron aluminio, arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, hierro, manganeso, plomo y zinc.

El análisis de cationes mayores, menores y elementos traza fue realizado de acuerdo al método EPA 200.7 "Trace elements in water, solids, and biosolids by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry". La medición se realizó mediante un equipo de espectrofotometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente marca Thermo modelo iCAP 6500 Duo, utilizando un patrón interno de itrio de 1 ppm para evaluar que la señal del instrumento se encontrara dentro de un margen de $\pm 10\%$ de error. Los estándares de calibración fueron preparados a partir de soluciones marca Inorganic Ventures de 100 ppm en 7 diferentes concentraciones, los coeficientes de correlación para las curvas de calibración fueron mayores a 0.9990, los porcentajes de recuperación fueron mayores al 90% y fueron evaluados mediante un material de referencia estándar.

3.3 Resultados y Discusión de la evaluación del efecto de la infiltración de lixiviados

3.3.1 Análisis fisicoquímicos

Tanto en el primero como en el segundo muestreo todos los parámetros cumplieron con los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad (NOM-127-SSA1-1994).

La temperatura pasó de un promedio de 24.47°C en el primer muestreo a 24.45°C en el segundo muestreo. Se observa que antes y después de lluvias la temperatura se mantiene prácticamente estable. En la figura 3.3 se observa que no existen anomalías de temperatura (incrementos) que puedan asociarse a la interacción de los lixiviados con el agua subterránea.

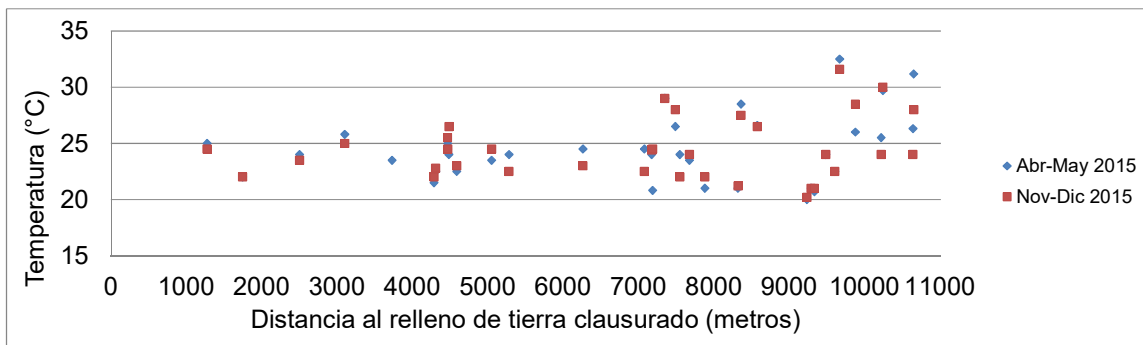


Figura 3.3 Valor de la temperatura del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.

El pH presentó una disminución entre el primer y segundo muestro pasando de 7.6 a 7.49, en los valores promedio. Los sitios cercanos al tiradero presentaron un valor de pH ligeramente alcalino (cercano a 8), aunque este valor se asocia a que las rocas presentes al poniente de la zona Morelia-Capula tienen un carácter básico (basaltos). Sitios ubicados a distancias mayores a 4 000 metros del tiradero municipal presentaron valores de pH similares a aquellos ubicados entre 1 000 y 2 000 metros (figura 3.4), por lo que no se observa un efecto de los lixiviados en el pH.

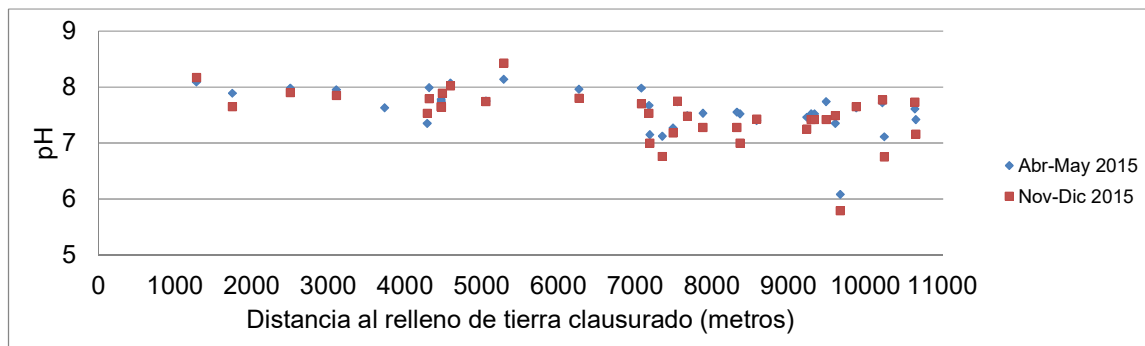


Figura 3.4 Valor del pH del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.

La conductividad eléctrica presentó un promedio de 356.81 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el primer muestreo y de 370.91 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el segundo muestreo. Se observa que los pozos cercanos al tiradero tuvieron un valor ligeramente mayor a aquellos ubicados a menos de 5 500 metros, aunque en algunos sitios más lejanos las conductividades fueron el doble del promedio (figura 3.5). No se observó una relación directa entre la distancia al tiradero y la conductividad eléctrica del agua subterránea.

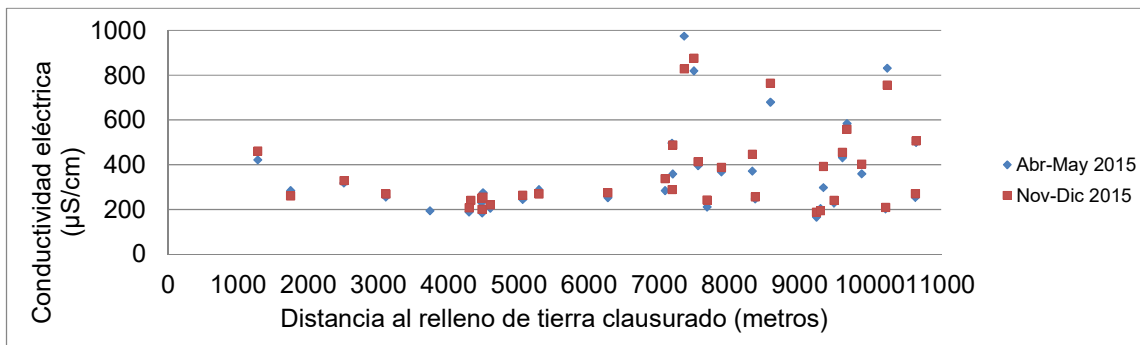


Figura 3.5 Valor de la conductividad eléctrica del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.

El potencial de óxido-reducción promedió 30.42 mV en el primer muestreo y 167.6 mV en el segundo muestreo. En este caso las variaciones se debieron a un fallo en el equipo el cual afectó los datos del primer muestreo. En el gráfico (figura 3.6) tampoco se observaron tendencias de aumento o disminución del potencial redox respecto a la distancia al tiradero.

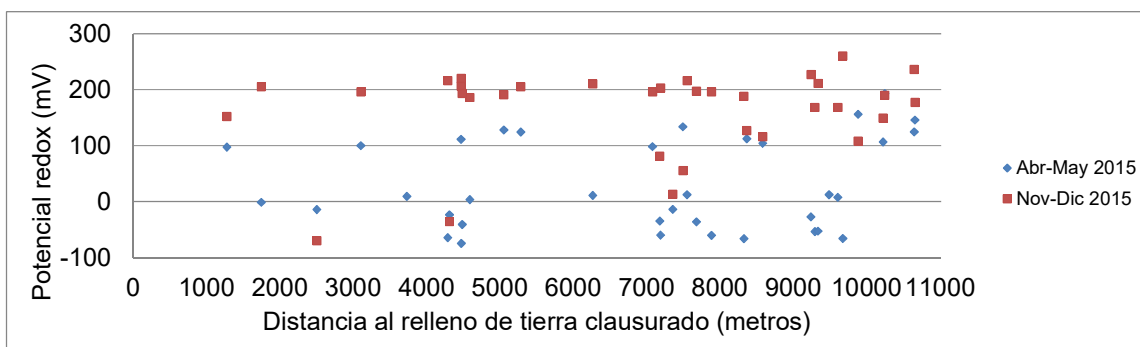


Figura 3.6 Valor del potencial de óxido-reducción del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.

El oxígeno disuelto tuvo un valor promedio de 3.59 mg/l en el primer muestreo, mientras que el segundo muestreo fue de 2.96 mg/l. El sitio más cercano al tiradero presentó valores ligeramente menores al promedio, aunque no se observa una tendencia general entre la distancia y el oxígeno disuelto, los datos se presentan en la figura 3.7.

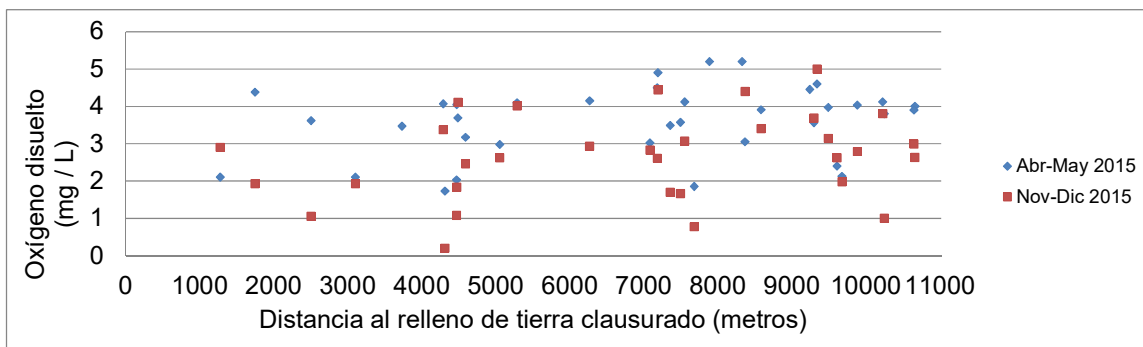


Figura 3.7 Valor del oxígeno disuelto del agua subterránea respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado.

Para identificar diferencias entre los sitios ubicados en las cercanías al relleno de tierra clausurado, Morelia y otras ubicaciones, se agruparon los sitios de estudio en tres grupos (figura 3.8):

- Grupo A: Sitios ubicados a un radio de 4.5 kilómetros de distancia del relleno de tierra clausurado. En el grupo A se agruparon los sitios 11, 12, 14, 19, 20, 21, 23, 25, 31 y 32.
- Grupo B: Sitios ubicados a un radio de 4.5 kilómetros del cruce Libramiento- Carretera Capula. En el grupo B se agruparon los sitios 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 16, 17, 24, 33, 34 y 35.
- Grupo C: Sitios fuera de los grupos A y B. En el grupo C se agruparon los sitios 5, 13, 18, 22, 26, 27, 28, 29, 30 y 36.

El parámetro del potencial redox no se consideró en el análisis estadístico debido a que el fallo en el equipo afectó los datos del primer muestreo.

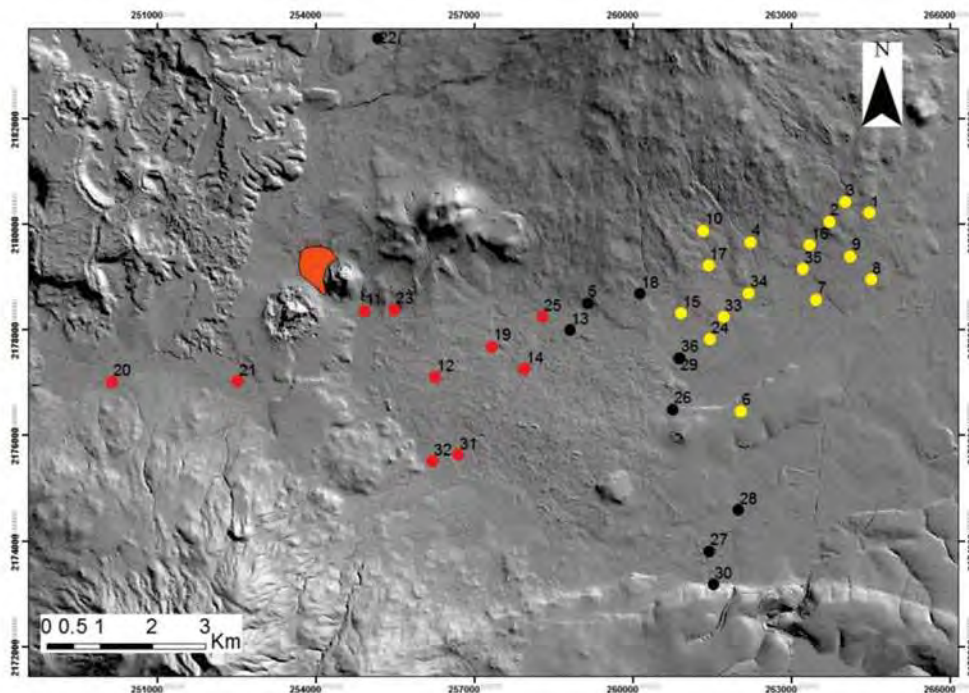


Figura 3.8 Agrupamiento de sitios respecto a la distancia al relleno de tierra clausurado grupo A (rojo), grupo B (amarillo) y grupo c (negro).

En la tabla 3.1 se presentan los resultados del análisis de varianza de un nivel para el muestreo 1 y el muestreo 2, considerando los grupos A, B y C, y un $\alpha=0.05$. Se realizó un análisis de varianza por cada parámetro (temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto). Se observa que los valores p de ambos muestreos estuvieron en todos los casos por arriba del valor p de 0.05, lo que nos indica que no existen diferencias significativas entre las medias de los parámetros medidos entre los grupos de muestras. Se deduce que ni el relleno de tierra clausurado o la mancha urbana ejercen cambios significativos entre las medias de los parámetros evaluados. Aunque en el grupo B se presentaron tres sitios (9,10 y 26) que tienen algunos de los valores más altos de temperatura y sólidos disueltos totales de toda la zona de estudio, fenómeno que se presentó en ambos muestreos.

Tabla 3.1 Análisis de varianza de parámetros fisicoquímicos de muestras de agua subterránea obtenidas durante el primer y segundo muestreo.

ANOVA	Valor p			
	Temp.	pH	C. Elec.	O. Dis
Abr-May 2015	0.523	0.091	0.171	0.173
Nov-Dic 2015	0.836	0.084	0.116	0.101

En la tabla 3.2 se presenta el análisis de varianza de un nivel donde se comparan parámetros (temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) medidos a muestras de agua subterránea obtenidas del primer y segundo muestreo. Los valores p de la temperatura, conductividad eléctrica y pH estuvieron por arriba del 0.05, por lo que las medias no presentaron diferencias significativas. El oxígeno disuelto presentó un valor p de 0.033, por lo que las diferencias entre las medias de los muestreos son significativas.

Tabla 3.2 Análisis de varianza de parámetros fisicoquímicos de muestras de agua subterránea donde se comparan el primer y segundo muestreo.

ANOVA	Valor p			
	Temp.	pH	C. Elec.	O. Dis
Entre muestreos 1 y 2	0.969	0.282	0.789	0.033

3.3.2 Análisis de iones mayores y menores

Se observa que tanto los aniones como los cationes cumplieron con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 en ambos muestreos, a excepción de los nitratos los cuales salieron elevados en 3 pozos (17, 28 y 32) y 5 manantiales (27, 33, 34, 35 y 36); en el segundo muestreo el pozo 18 también excedió la norma. La presencia de nitratos (en los manantiales) se puede asociar a la infiltración de aguas negras y a las actividades agrícolas. Se observa que el manantial del Balneario Cointzio en ninguno de los casos superó la norma en cuanto a nitratos, por lo que se puede pensar que este afloramiento proviene de un flujo más profundo. Los sitios que excedieron los límites máximos permisibles de nitratos fueron los mismos en el primero y segundo muestreo, lo que señala que es una situación que persiste tanto antes como después de las lluvias. Los nitratos excedieron la norma en ambos muestreos en todos los manantiales (a excepción del Balneario Cointzio) y en los pozos Héroes Republicanos, La Mintzita y Cuanajillo.

Para analizar la influencia del tiradero municipal en la calidad del agua subterránea se realizó una suma de los iones mayores y menores representando así los sólidos disueltos totales (SDT), con estos datos se realizó un hidromapa el cual se muestra en la figura 3.9. El promedio de los SDT en el primer muestreo fue de 260.38 ppm y en el segundo de 284.38 ppm. No se observa un incremento drástico de los SDT en la periferia del tiradero municipal, por lo cual se infiere que los lixiviados no están alterando la composición química del agua subterránea en cuanto a los iones mayores. Resalta que los mayores valores de SDT se presentaron en sitios cercanos a la mancha urbana (6, 9 y 10) o se ubican en una falla geológica (26 y 30), evidenciando que el bombeo y la geología estructural son factores que influyen en el incremento de iones mayores. La mayor concentración de iones mayores es una característica de flujos de agua subterránea más profundos.

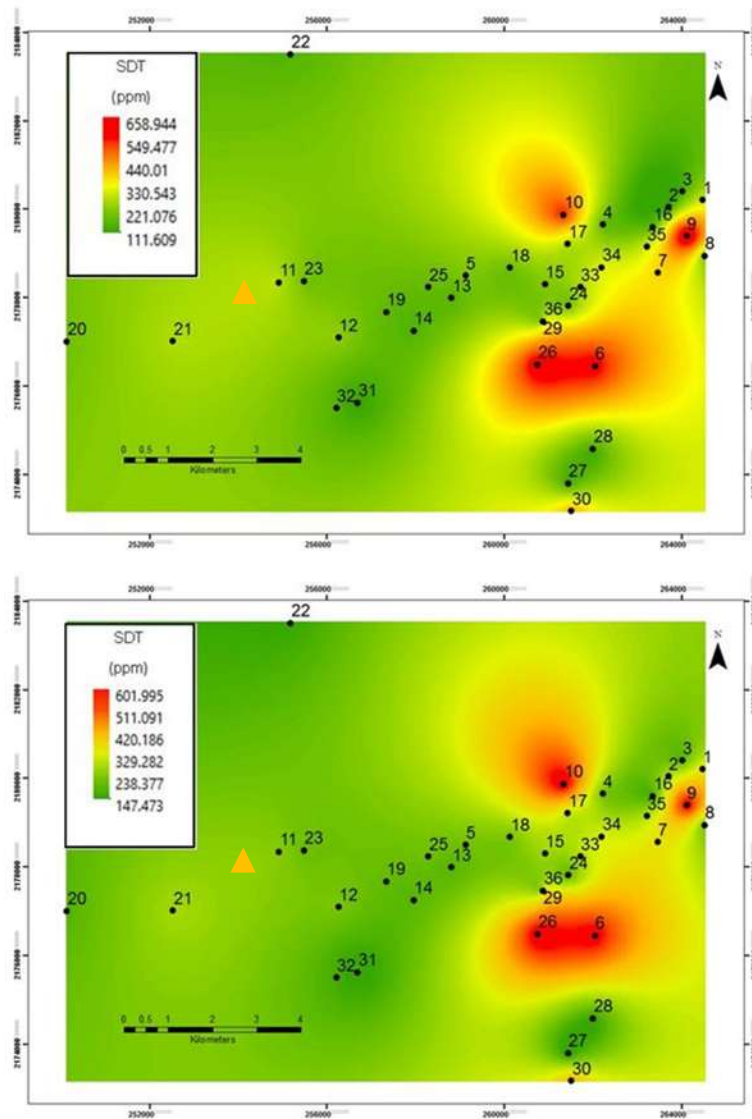


Figura 3.9 Comparativos de los valores de los sólidos disueltos totales de los dos muestreos, primero (arriba) y segundo (abajo). La ubicación del antiguo tiradero municipal se muestra en el triángulo naranja.

3.3.3 Análisis de elementos traza

En la figura 3.10 se muestra la distribución espacial de los sitios que superaron los límites máximos permisibles de elementos traza.

En el primer muestreo la mayoría de los sitios analizados cumplieron con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, aunque se presentaron valores por arriba de la norma en manganeso (21 y 26) y plomo (1, 14, 18, 19 y 20).

En el segundo muestreo dos sitios excedieron los límites máximos permisibles de aluminio (27 y 28) y dos en manganeso (21 y 26), no se encontraron valores anómalos de plomo. Se hace notar que en el primer muestreo no se analizó el aluminio.

El aluminio se presentó en dos sitios el 27 (manantial la Mintzita) y el 28 (pozo la Mintzita), ambos ubicados en las cercanías a la planta papelera.

El manganeso se encontró en los sitios 21 y 26, tanto en la época previa como en la posterior a las lluvias. La presencia de manganeso en los pozos de Tacúcuaro (21) y el Cerrito (26) ya ha sido reportada en estudio previos (Verduzco 2010).

En el primer muestreo el plomo se encontró en 5 pozos (1, 14, 18, 19 y 20), se observa un alineamiento entre estos sitios. En el segundo muestreo no se encontró plomo.

El análisis de elementos traza no muestra una pluma contaminante que pudiera asociarse a la infiltración de lixiviados provenientes del antiguo tiradero municipal.

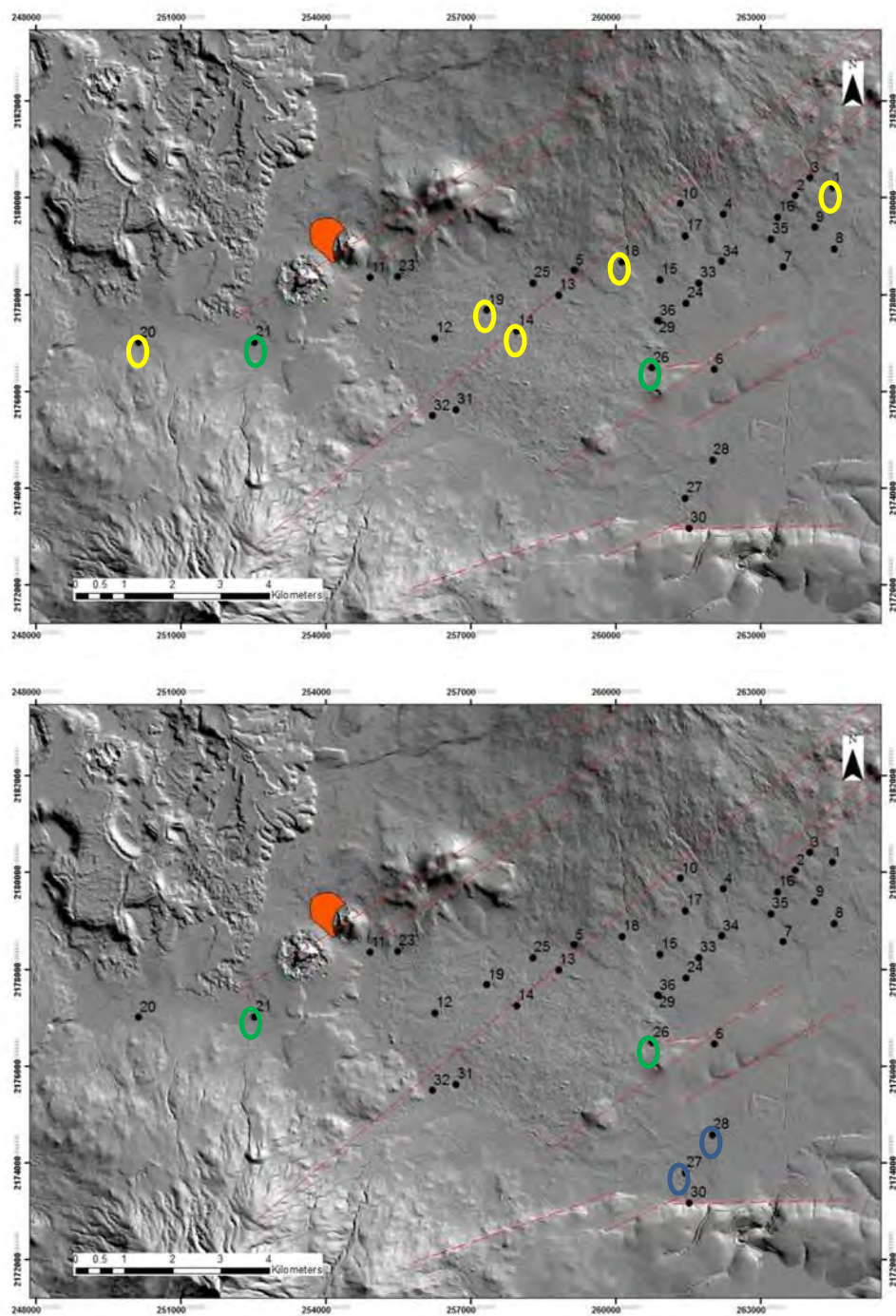


Figura 3.10 Elementos que superaron la norma, muestreo abril-mayo (arriba) y noviembre-diciembre (abajo). El aluminio (azul), manganeso (verde) y plomo (amarillo). La ubicación del antiguo tiradero municipal se representa con el polígono naranja. Las fallas se representan en líneas rojas.

El hecho de que no se encontraran anomalías respecto a los parámetros del agua subterránea en las cercanías al antiguo tiradero municipal puede deberse a dos situaciones: la dirección del flujo de agua subterránea y las características de los materiales geológicos que subyacen al sitio. En la figura 3.11 se presenta la geología a detalle del antiguo tiradero municipal, se observa que existe un paquete de materiales que contienen arcillas, las cuales tienen la capacidad de realizar intercambio iónico con el agua subterránea y retener contaminantes. Los pozos ubicados al oeste de la zona de estudio (Capula y Tacícuaro) se encuentran en la dirección contraria al flujo de agua subterránea respecto al tiradero, esto podría explicar por qué no se encontró contaminación que pudiese asociarse a los lixiviados. El hecho de que no se observara contaminación por lixiviados en las muestras obtenidas de pozos cercanos al tiradero ubicados en la dirección al flujo de agua subterránea (como Gas del Lago, La Maestranza y Villa Magna 3), se asocia a la presencia de arcillas, que parecen estar actuando como un medio que está retirando los contaminantes. Sin embargo para comprobar los argumentos anteriormente planteados sería necesario llevar una investigación a mayor detalle.

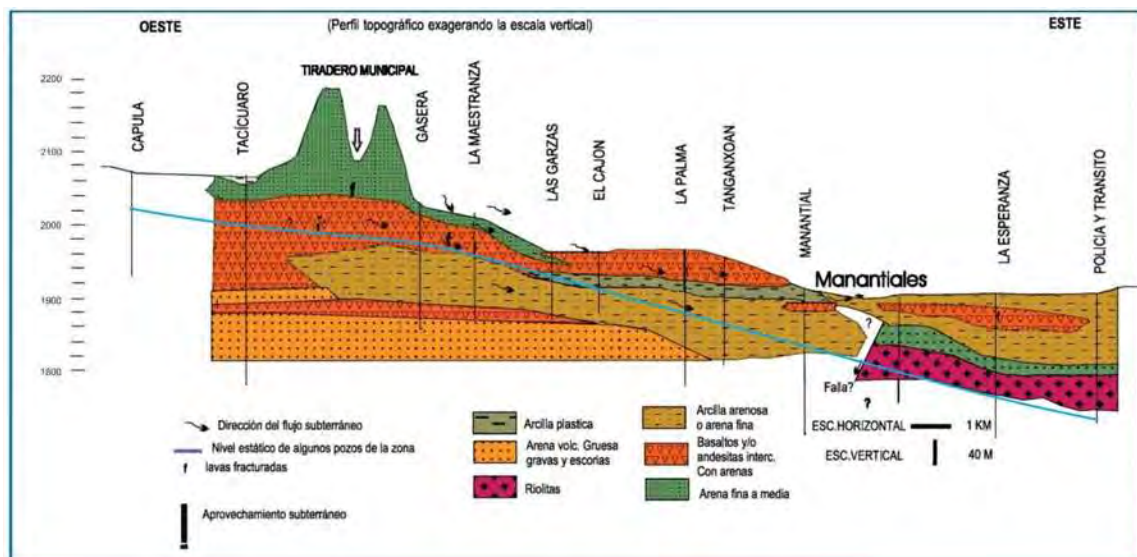


Figura 3.11 Geología a detalle del antiguo tiradero municipal y nivel piezométrico del año 2015 (modificado de Israde-Alcántara et al. 2005).

CAPITULO IV: CARACTERIZACION DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA ZONA MORELIA-CAPULA

4.1 El contexto de los sistemas de flujo de agua subterránea

El estudio del movimiento del agua subterránea tiene su origen en las investigaciones del científico francés Darcy, quien en el año 1856 publicó un trabajo (Les fontaines publiques de la Ville de Dijon) dentro del cual estudió los mecanismos que rigen el flujo del agua en medios porosos. Darcy determinó que el agua subterránea se mueve de zonas con mayor energía (potencial hidráulico) a zonas con menor energía. Para entender el concepto de sistemas de flujo se parte del concepto de redes de flujo. Una red de flujo se compone por dos elementos ortogonales entre sí, las líneas equipotenciales y las líneas de flujo. Las líneas equipotenciales representan los sitios donde el potencial hidráulico tiene el mismo valor. Las líneas de flujo marcan la dirección que sigue el agua en el subsuelo. Un sistema de flujo de agua subterránea comprende un conjunto de flujos presentes en una zona determinada. El concepto de sistemas de flujo de agua subterránea fue definido por Tóth (1963) de la siguiente manera “Un sistema de flujo es un conjunto de líneas de flujo en el cual cualquiera de dos líneas de flujo adyacentes en un punto de la región de flujo permanecen adyacentes a través de toda la región, ellas pueden ser intersectadas por una interrupción en su camino, cuando esto sucede el flujo de ambas toma lugar en una sola dirección”. Tóth hizo una aportación importante al dividir los flujos en tres categorías, los locales, los intermedios y los regionales. La clasificación propuesta por Tóth diferencia el tipo de flujo en función de la distancia que existe entre el punto de entrada y salida del sistema. Los flujos locales entran en puntos altos de una cuenca y salen en las partes bajas de la cuenca; los flujos intermedios entran en la cuenca y pasan por debajo de las irregularidades topográficas, saliendo en sitios bajos; los flujos regionales tienen la característica de poder cruzar entre una cuenca y otra (Tóth 1963). En la división de flujos propuesta por Tóth queda explícito que los flujos de menor profundidad son los locales y los de mayor profundidad los regionales. La

división de flujos propuesta por Tóth sigue siendo usada para generar modelos conceptuales, ya que ha demostrado ser útil para explicar el movimiento (dinámica) del agua subterránea en los acuíferos.

El concepto de flujos locales, intermedios y regionales ha sido adoptado por la comunidad de hidrogeólogos, quienes han asociado ciertas características a cada tipo de flujo. En base a la revisión de artículos se presenta a continuación las características que se asocian a cada tipo de flujo.

Flujos locales: Son influenciados por la recarga de las lluvias (Al-Adamat et al. 2003), por lo tanto la profundidad del agua subterránea presenta fluctuaciones entre las épocas de secas y lluvias (Fraser et al. 2001), la composición de isótopos estables del agua subterránea respecto a la línea meteórica local es similar (Genereux y Jordan 2006). Tienen tiempos de residencia en el acuífero de pocos años (Mahlknecht et al. 2006). La temperatura del agua es similar al clima local (Huizar-Álvarez et al. 2014). La salinidad es baja (Fagundo-Castillo et al. 2014) al igual que su conductividad eléctrica (Hernández-Antonio et al. 2015). El contenido de elementos traza es bajo (Carrillo-Rivera y Cardona 2012). Estos flujos se mueven cerca de la superficie (Tóth 1963).

Flujos regionales: La composición de isótopos estables del agua subterránea respecto a la línea meteórica local es diferente (Genereux y Jordan 2006). Tienen tiempos de residencia en el acuífero que pueden llegar a miles de años (Mahlknecht et al. 2006). Las temperaturas son superiores a las registradas en el clima local, incluso por decenas de grados centígrados (Huizar-Álvarez et al. 2014). El contenido salino (Fagundo-Castillo et al. 2014) y la conductividad eléctrica son altos (Hernández-Antonio et al. 2015). Pueden llegar a encontrarse algunos elementos traza propios de cada sistema (Carrillo-Rivera y Cardona 2012). Estos flujos se mueven por estratos rocosos profundos (Tóth 1963).

Flujos intermedios: Tienen características intermedias entre los flujos locales y regionales. Algunos parámetros pueden tener valores bajos y otros elevados.

En los artículos revisados se observó que solo algunos autores clasifican puntualmente el flujo de un sitio en local, intermedio o regional (Carrillo-Rivera et al. 1996; Cardona y Carrillo-Rivera 2006; Mahlkecht et al. 2006; Carrillo-Rivera et al. 2007; Fagundo-Castillo et al. 2014; Huizar-Alvarez et al. 2016). Aquellos que clasificaron los tipos de flujo lo hicieron en base a criterios propios. Al analizar la clasificación de flujo realizada por diferentes autores, se observa que no existe un criterio generalizado para caracterizar un flujo en local, intermedio o regional, por lo tanto también existen dificultades para nombrar los sistemas de flujo de agua subterránea (Monreal et al. 2011). Sin un criterio común no es posible comparar la clasificación del tipo de flujo de dos o más autores diferentes.

En la comunidad de hidrogeólogos existe un interés por clasificar los tipos de flujo que se presentan en una determinada zona de estudio. Una clasificación permite agrupar los elementos de un grupo en base a características comunes. La clasificación del tipo de flujo permite estudiar a mayor detalle el efecto de un factor (natural o antropogénico) sobre una variable de interés (como la calidad del agua o la piezometría), en un subgrupo determinado (local, intermedio o regional). En casos prácticos, la adecuada identificación del tipo de flujo presente en una zona determinada puede ser una herramienta para el manejo adecuado del acuífero (González-Abraham et al. 2012); por ejemplo, la identificación de zonas de recarga y descarga (Peñuela y Carrillo-Rivera 2013), la dinámica de la dispersión de contaminantes (Carrillo-Rivera et al. 2007), o como criterio para identificar la vulnerabilidad del acuífero (Muhammad et al. 2015).

4.2 Generación de un índice para clasificar los sistemas de flujo de agua subterránea

Debido al interés de identificar bajo un criterio los sistemas de flujo de agua subterránea fue necesario crear una clasificación.

4.2.1 Selección de los parámetros para clasificar sistemas de flujo

En la tabla 4.1 se presenta un concentrado de artículos donde se muestran los parámetros utilizados para clasificar flujos. Se observa que los parámetros más usados para clasificar los flujos de agua subterránea son la profundidad, el contenido de iones mayores y la temperatura del agua, les siguen la conductividad eléctrica y el potencial de hidrógeno. La conductividad eléctrica se descartó debido a que es una medida indirecta de la concentración de sales en el agua subterránea. El potencial de hidrógeno no se consideró ya que depende del carácter ácido-básico de las especies químicas disueltas, lo cual está en función de las condiciones particulares del medio geológico por el cual circula el agua subterránea, por lo que no se puede generalizar un valor determinado que sea característico a cada tipo de flujo.

Tabla 4.1 Parámetros utilizados para clasificar flujos de agua subterránea.

Fuente	Profundidad	Composición química				Análisis fisicoquímicos				
		Iones mayores	Iones menores	Elementos traza	Isótopos	Temperatura	Conductividad eléctrica	Potencial de hidrógeno	Potencial de óxido-reducción	Oxígeno disuelto
(Mazor y George 1992)		x								
(Cardona et al. 1993)	x	x	x	x		x	x	x		
(Carrillo-Rivera et al. 1996)	x	x	x	x		x	x	x		
(Morales-Luis et al. 2000)		x	x	x				x		
(Carrillo-Rivera et al. 2001)	x	x	x	x		x	x	x	x	
(Fraser et al. 2001)	x	x					x			
(Paces et al. 2002)					x					
(Huizar-Álvarez et al. 2003)	x	x				x				
(Carreón-Freyre et al. 2005)	x	x			x	x				
(Moral et al. 2005)		x				x	x			
(Amato y Silva 2006).	x	x								
(Cardona y Carrillo-Rivera 2006).	x	x	x	x		x	x	x		
(Genereux y Jordan 2006)	x	x			x					
(Mahlknecht et al. 2006)	x	x			x	x	x	x		
(Carrillo-Rivera et al. 2007)	x	x	x	x		x	x			
(Ramos-Leal et al. 2007)		x		x		x	x	x		
(Carrillo-Rivera y Cardona 2012)		x		x		x				
(Fagundo-Castillo et al. 2014)	x	x				x	x	x	x	x
(Garduño et al. 2014)						x				
(Huizar-Álvarez et al. 2014)		x	x		x	x		x		
(Hernández-Antonio et al. 2015)	x	x	x	x	x	x	x	x		
(Ochoa-González et al. 2015)	x					x				
(Huizar-Alvarez et al. 2016)	x	x	x	x	x	x		x		

4.2.2 Determinación de los rangos de clasificación para cada parámetro

En la tabla 4.2 se presentan los rangos de temperatura, sólidos disueltos totales y profundidad en casos de estudio donde se clasificaron los flujos. Al comparar en cada categoría (local, intermedia o regional) los valores promedio de cada parámetro, se observa que cada autor seleccionó los rangos que consideró adecuados para clasificar el flujo en su zona de estudio.

Tabla 4.2 Revisión bibliográfica de rangos de temperatura, sólidos disueltos totales (SDT) y profundidad, en diferentes casos de estudio donde se clasificó puntualmente el tipo de flujo de agua subterránea.

Flujo	Referencia	Muestras	Temperatura (°C)			SDT (ppm)			Profundidad (m)		
			Menor	Mayor	Promedio	Menor	Mayor	Promedio	Menor	Mayor	Promedio
Local	Carrillo-Rivera et al. 1996.	10	19.80	21.90	20.98	344.00	1131.00	609.10	15.00	95.00	45.00
	Mahlknecht et al. 2006.	8	16.60	32.70	24.56	158.80	1004.08	506.87	12.00	122.80	46.09
	Carrillo-Rivera et al. 2007	10	20.00	22.00	21.20	360.86	1202.71	612.06	15.00	95.00	45.00
	Huizar-Alvarez et al., 2016.	7.00	18.10	19.50	18.89	165.00	950.00	504.29	200.00	350.00	290.29
Intermedio	Carrillo-Rivera et al. 1996.	33	23.30	34.30	27.00	102.00	337.00	225.36	150.00	450.00	302.21
	Cardona y Carrillo-Rivera 2006.	20	18.70	21.70	24.95	88.10	402.30	281.19	0.00	360.00	221.00
	Mahlknecht et al. 2006.	9	22.90	38.90	29.54	378.43	708.54	511.07	61.10	114.90	97.18
	Carrillo-Rivera et al. 2007	14	23.00	27.00	25.00	146.66	273.51	206.00	150.00	330.00	208.71
	Fagundo-Castillo et al. 2014.	14	17.20	25.50	21.09	2663.00	63322.00	13253.93	0.00	0.00	0.00
	Huizar-Alvarez et al., 2016.	20.00	20.20	24.80	22.22	226.00	1390.00	696.75	80.00	250.00	194.95
Regional	Carrillo-Rivera et al. 1996.	12	33.80	40.40	36.39	237.00	300.00	272.58	200.00	350.00	268.67
	Mahlknecht et al. 2006.	1	-	-	26.6	-	-	585.3	-	-	36.1
	Carrillo-Rivera et al. 2007	12	33.80	40.40	36.39	264.54	325.27	302.01	200.00	350.00	268.67
	Huizar-Alvarez et al., 2016.	1.00	-	-	46.00	-	-	2530.00	-	-	300.00

Debido a que en la bibliografía no se encuentra un criterio general para clasificar los tipos de flujo fue necesario proponer los rangos de los parámetros seleccionados (temperatura, sólidos disueltos y profundidad). Se generó un índice (IF) para clasificar el flujo de agua subterránea (ecuación 1), considerando la temperatura, los sólidos disueltos totales y la profundidad. Para generar el IF cada parámetro se dividió entre un divisor para generar un valor adimensional, finalmente se sumó el total de los tres parámetros y se dividió entre tres. El valor de la temperatura se dividió entre 15°C (temperatura ambiental global promedio). Para los sólidos disueltos se consideró el máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (1000 ppm) y se dividió entre 3 dando un valor de 333 ppm. En los sólidos disueltos se consideró la suma de iones mayores, aniones (alcalinidad, cloruros y sulfatos) y cationes (calcio, magnesio, potasio y

sodio). Para la profundidad se buscó un divisor que generara el mayor número de similitudes de clasificación considerando el IF respecto a las clasificaciones de flujo presentadas por otros autores (Carrillo-Rivera et al. 1996; Cardona y Carrillo-Rivera 2006; Mahlknecht et al. 2006; Carrillo-Rivera et al. 2007; Fagundo-Castillo et al. 2014) llegando a un valor de 50 m. La profundidad en los pozos fue determinada en el nivel estático, para los manantiales la profundidad se consideró cero.

En la tabla 4.3 se presenta una propuesta de los rangos de temperatura, sólidos disueltos y profundidad para clasificar flujos de agua subterránea. Para cada parámetro se presenta un rango para dar cabida a la heterogeneidad de los acuíferos.

Tabla 4.3 Rangos de temperatura, sólidos disueltos totales y profundidad para clasificar flujos de agua subterránea.

Flujo	Temperatura (°C)	Sólidos disueltos (ppm)	Profundidad (m)
Local	<15	0-333	0-50
Intermedio	15-30	333-666	50-100
Regional	>30	>666	>100

4.2.3 Generación del índice para clasificar los flujos.

Una vez que se consideraron los rangos para clasificar los flujos de agua subterránea se procedió a generar una expresión matemática (ecuación 1) que integrara los diferentes parámetros, a la cual se le denominó índice de flujo (IF). A cada parámetro se le asignó un divisor para generar un valor adimensional con un rango que va de 0 a valores superiores a 2. El resultado de cada división se sumó y se dividió entre 3 (con el objetivo de asignar pesos simétricos a cada parámetro), obteniéndose un índice a partir del cual se propone una escala para clasificar el tipo de flujo de agua subterránea (tabla 4.4).

Dónde:

IF= Índice de flujo

T= Temperatura (°C)

SD= Sólidos disueltos (ppm)

P= Profundidad a la que se encuentra el agua (metros)

Ecuación 1

$$IF = \frac{\left(\frac{T}{15^{\circ}\text{C}} + \frac{SD}{333 \text{ ppm}} + \frac{P}{50 \text{ m}} \right)}{3} \quad (1)$$

Tabla 4.4 Escala para clasificar el tipo de flujo de agua subterránea a partir del IF.

Flujo	IF
Local	Menores a 1
Intermedio	1 a menores a 2
Regional	Mayores a 2

*Nota: En los casos donde se desconoce el nivel estático del pozo, y se indica su profundidad se propone dividir la profundidad del pozo entre dos y usar este dato en la ecuación 1 como sustituto del nivel estático.

4.2.4 Aplicación del IF a casos de estudio

Para evaluar la capacidad del IF se tomaron datos de diferentes investigaciones y se comparó la clasificación del autor contra la generada a partir del índice de flujo (tabla 4.5). Se resalta que en los casos en que no hubo coincidencias la variación del tipo de flujo varío solo en una categoría.

Tabla 4.5 Comparación del tipo de flujo en base al autor y al IF, local (L), intermedio (I) y regional (R). Las siglas Vol y Sed se refieren a medios Volcánico y Sedimentario.

Fuente	Tipo de acuífero	ID	T (°C)	SDT (ppm)	P (m)	Flujo (autor)	IF	Flujo (IF)
(Carrillo-Rivera et al. 1996)	Vol-Sed	4	34.20	283.94	314.00	R	2.091	R
(Carrillo-Rivera et al. 1996)	Vol-Sed	6	38.50	250.14	350.00	R	2.273	R
(Carrillo-Rivera et al. 1996)	Vol-Sed	9	36.50	270.08	200.00	R	1.748	I
(Carrillo-Rivera et al. 1996)	Vol-Sed	21	26.80	182.06	150.00	I	1.278	I
(Carrillo-Rivera et al. 1996)	Vol-Sed	60	19.80	315.08	25.00	L	0.839	L
(Cardona y Carrillo-Rivera 2006)	Vol-Sed	7	26.8	233.50	300	I	1.829	I
(Cardona y Carrillo-Rivera 2006)	Vol-Sed	9	26.3	353.50	200	I	1.605	I
(Cardona y Carrillo-Rivera 2006)	Vol-Sed	5 (18)	26.2	109.80	330	I	1.792	I
(Cardona y Carrillo-Rivera 2006)	Vol-Sed	14	25.2	402.30	200	I	1.629	I
(Cardona y Carrillo-Rivera 2006)	Vol-Sed	18	18.7	141.10	0	I	0.557	L
(Mahlknecht et al. 2006)	Sed	RL-1	16.60	515.76	12	L	0.965	L
(Mahlknecht et al. 2006)	Sed	RL-6	26.60	571.40	36.1	R	1.404	I
(Mahlknecht et al. 2006)	Sed	RL-11	21.10	979.45	61.1	L	1.857	I
(Mahlknecht et al. 2006)	Sed	RL-34	23.70	366.25	28	L	1.080	I
(Mahlknecht et al. 2006)	Sed	RL-43	23.90	467.02	101.6	I	1.676	I
(Carrillo-Rivera et al. 2007)	Vol-Sed	R1	36.8	280.13	220	R	1.832	I
(Carrillo-Rivera et al. 2007)	Vol-Sed	I14	23	145.07	180	I	1.256	I
(Carrillo-Rivera et al. 2007)	Vol-Sed	L28	22	392.39	30	L	0.982	L
(Carrillo-Rivera et al. 2007)	Vol-Sed	L32	21	418.76	95	L	1.203	I
(Carrillo-Rivera et al. 2007)	Vol-Sed	L37	20	315.03	25	L	0.843	L
(Fagundo-Castillo et al. 2014)	Sed	27	25.20	2663.00	0.00	I	3.226	R
(Fagundo-Castillo et al. 2014)	Sed	31	21.00	5478.00	0.00	I	5.950	R
(Fagundo-Castillo et al. 2014)	Sed	34	23.00	12653.00	0.00	I	13.177	R
(Fagundo-Castillo et al. 2014)	Sed	37	21.40	6884.00	0.00	I	7.366	R
(Fagundo-Castillo et al. 2014)	Sed	40	17.20	3512.00	0.00	I	3.898	R
(Huizar-Alvarez et al. 2016)	Vol-Sed	Tetelpan	18.1	151.20	350	L	1.720	I
(Huizar-Alvarez et al. 2016)	Vol-Sed	R.Tlah 23	19	880.00	200	L	1.970	I
(Huizar-Alvarez et al. 2016)	Vol-Sed	M. Alemán	20.5	331.80	230	I	1.554	I
(Huizar-Alvarez et al. 2016)	Vol-Sed	S. Popular	23	439.90	210	I	1.651	I
(Huizar-Alvarez et al. 2016)	Vol-Sed	P. Baños	46	3079.20	300	R	5.105	R

Para contrastar la clasificación se comparó el número de muestras totales, respecto a las que fueron clasificadas en el mismo tipo de flujo respecto a la fuente y al IF, los datos se presentan en la tabla 4.6. Se observa que en la mayoría de los casos la similitud fue superior al 53.57%, salvo un caso donde no hubo coincidencias.

Tabla 4.6 Porcentaje de similitud del tipo de flujo respecto al autor y al IF.

Fuente	Muestras	Coincidencias	% Similitud
(Carrillo-Rivera et al. 1996)	55	42	76.36
(Cardona y Carrillo-Rivera 2006)	20	18	90.00
(Mahlknecht et al. 2006)	18	11	61.11
(Carrillo-Rivera et al. 2007)	36	24	66.67
(Fagundo-Castillo et al. 2014)	14	0	0.00
(Huizar-Alvarez et al. 2016)	28	15	53.57
Total=	171	110	64.33

Se observa que el IF fue capaz de clasificar flujos bajo un mismo criterio, y que los resultados de la clasificación tuvieron un promedio de 64.33% de similitud respecto a la clasificación propuesta originalmente por el autor.

4.2.5 Aplicación del IF en diferentes medios geológicos

En la tabla 4.7 se presenta la clasificación de flujos en diferentes tipos de acuíferos. Se debe tener en cuenta que en los acuíferos perturbados por la actividad humana (particularmente en los sitios donde se extrae agua por medio de pozos profundos) existe una mezcla de flujos locales, intermedios y regionales (Carrillo-Rivera et al. 1996; Carrillo-Rivera et al. 2001; Huizar-Alvarez et al. 2004; Ramos-Leal et al. 2007), sin embargo un flujo será el predominante permitiendo su clasificación. En las tablas 4.5 y 4.7 se observa que fue posible aplicar el IF en diferentes medios geológicos como los volcánicos, volcánicos-sedimentarios, sedimentarios y kársticos. Por lo que se propone el IF como un criterio común para clasificar flujos de agua subterránea en diferentes medios geológicos.

Tabla 4.7 Aplicación del IF a diferentes tipos de acuíferos.

Fuente	Tipo de acuífero	ID	T (°C)	SDT (ppm)	P (m)	IF	Flujo (IF)
(Edmunds y Smedley 2000)	Sedimentario	1-Budby 2	9.6	542.5	67.4	0.98	L
(Edmunds y Smedley 2000)	Sedimentario	14-Everton 3	11.4	519.5	138.1	1.23	I
(Edmunds y Smedley 2000)	Sedimentario	18-Grove 4	13.1	318	335.3	1.73	I
(Edmunds y Smedley 2000)	Sedimentario	26-Newton 2	17	370.5	430.7	2.18	R
(Edmunds y Smedley 2000)	Sedimentario	35-Yawthorpe	21.6	1984.2	406.0	3.82	R
(Azzaz et al. 2008)	Kárstico	11	22.5	539	0	1.04	I
(Azzaz et al. 2008)	Kárstico	12	26.9	944	0	1.54	I
(Azzaz et al. 2008)	Kárstico	16	17.3	409	0	0.79	L
(Azzaz et al. 2008)	Kárstico	22	16.8	384	0	0.76	L
(Azzaz et al. 2008)	Kárstico	24	29	552	0	1.20	I
(Xiao-Dong et al. 2010)	Kárstico	S1 2007	16.2	511.1	0	0.87	L
(Xiao-Dong et al. 2010)	Kárstico	S4 2007	15.9	247.9	0	0.60	L
(Xiao-Dong et al. 2010)	Kárstico	S16 2007	17	381.6	0	0.76	L
(Xiao-Dong et al. 2010)	Kárstico	W1 2007	16.8	398.9	127	1.20	I
(Xiao-Dong et al. 2010)	Kárstico	W3 2006	16	889.4	14	1.29	I
(Morán-Ramírez et al. 2013)	Kárstico	1a	36	708.6	0	1.51	I
(Morán-Ramírez et al. 2013)	Kárstico	9	20.7	195.6	0	0.66	L
(Morán-Ramírez et al. 2013)	Kárstico	20	25.6	1283.3	0	1.85	I
(Morán-Ramírez et al. 2013)	Kárstico	25	30.7	1532.1	0	2.22	R
(Morán-Ramírez et al. 2013)	Kárstico	1b	31.19	503.06	0	1.20	I
(Hernández-Antonio et al. 2015)	Volcánico	AT1	25	246.5	300	1.80	I
(Hernández-Antonio et al. 2015)	Volcánico	AT5	36.4	1356.1	230	2.93	R
(Hernández-Antonio et al. 2015)	Volcánico	AT22	27.5	735.2	150	1.85	I
(Hernández-Antonio et al. 2015)	Volcánico	AT34	26.6	148.5	55	0.92	L
(Hernández-Antonio et al. 2015)	Volcánico	AT40	31.6	107.9	62	1.02	I

4.3 Resultados y discusión de la identificación de los sistemas de flujo de agua subterránea en el poniente de Morelia

A partir del IF se procedió a clasificar los flujos de agua subterránea de la zona Morelia-Capula. Los datos de temperatura, sólidos disueltos y profundidad se presentan en la tabla 4.8, la información corresponde al muestreo abril-mayo de 2015, ya que en ese periodo se logró tomar la mayor cantidad de muestras. Los pozos presentaron valores promedio de temperatura de 24.84°C, con un valor mínimo de 21°C y un máximo de 31.17°C, mientras que los sólidos disueltos tuvieron una media de 252.19 ppm, con un mínimo de 125.38 ppm y un máximo de 673.31 ppm. Los manantiales tuvieron una temperatura promedio de 22.67°C, siendo el valor mínimo de 20°C y el máximo de 32.5°C, la media de SDT fue de 259.53 ppm, con un valor mínimo de 134.4 ppm y un máximo de 411.27 ppm. El análisis de varianza de un factor demostró que la temperatura (valor $p=0.10$) y los sólidos disueltos (valor $p=0.87$) no presentan diferencias significativas entre pozos y manantiales. Considerando que en el año 1994 el agua subterránea se encontraba a una profundidad promedio de 30 metros y en el año 2015 el promedio del abatimiento de los pozos muestreados fue de 74.98 m se observa un abatimiento de 44.98 m que puede asociarse a los bombeos, considerando el periodo de tiempo (21 años) se tiene un abatimiento promedio de 2.14 m/año, dato similar al de 2.46 m/año reportado por Ávila y Garduño (2007) en la ciudad de Morelia. Los abatimientos medidos en el año 2015 presentaron valores diversos, algunos sitios se encuentran en valores similares a los reportados en el año 1994 (7, 8, 24, 29) mientras que otros superan los 100 m (1, 2, 3, 4, 10, 12, 13, 14) lo que da una idea de la heterogeneidad de las propiedades hidrogeológicas y de los esquemas de explotación de aguas subterráneas de la zona. El caso de Morelia-Capula pone en evidencia que la extracción de agua subterránea puede generar importantes cambios en los niveles piezométricos y con ello en la dinámica de los sistemas de flujo, en periodos de tiempo relativamente cortos, considerando que la recarga natural de un acuífero pueden tardar décadas o siglos (Gleeson et al. 2010). Además el abatimiento de los niveles piezométricos pueden implicar un riesgo para la calidad del agua, estudios previos (Huizar-

Alvarez et al. 2004; Cardona y Carrillo-Rivera 2006), han demostrado que a mayor profundidad del agua subterránea existe un incremento de las especies químicas indeseables.

Tabla 4.8 Índices de flujo de la zona de estudio.

Sitio	ID	T (°C)	SDT (ppm)	P (m)	IF	Flujo
23 de Marzo	1	31.17	285.91	123.00	1.80	I
La Esperanza	2	26.00	125.38	137.90	1.62	I
Ricardo Flores Magon	3	25.50	149.44	116.40	1.49	I
San Isidro Itzicuario	4	28.50	172.69	123.50	1.63	I
San José Itzicuario	5	24.00	205.10	83.28	1.29	I
Arko San Antonio	6	26.60	573.81	58.73	1.56	I
Mariano Abasolo	7	22.50	365.41	31.00	1.07	I
Tzindurio Sarch	8	26.30	211.83	39.21	1.06	I
San Juanito Itzicuario	9	29.70	673.31	83.28	1.89	I
Ario de 1815	10	26.50	542.82	141.03	2.07	R
Gas del Lago	11	25.00	260.25	51.7	1.16	I
Villa Magna 3	12	25.80	223.50	135	1.70	I
Villas del Pedregal 1	13	23.50	162.71	103.1	1.37	I
Villas del Pedregal 3	14	24.50	160.22	100.00	1.37	I
Ignacio Allende	15	24.50	213.24	59.67	1.16	I
Residencial Tinijaro	16	24.00	168.06	69.27	1.16	I
Heroes Republicanos	17	24.00	239.89	42.38	1.06	I
Arko San Juan	18	24.50	184.33	98.83	1.39	I
La Hacienda 1	19	23.50	170.60	63	1.11	I
Capula 2	20	22.50	191.67	49.33	1.02	I
Tacicuario	21	24.00	259.23	68.00	1.25	I
Cuto de la Esperanza	22	22.50	161.14	85.00	1.23	I
La Maestranza	23	22.00	187.24	49.71	1.01	I
Río Florido	24	23.50	191.97	22.15	0.86	L
Rancho Nuevo	25	24.00	178.90	69.75	1.18	I
El Cerrito Itzicuario	26	29.00	604.16	61.8	1.66	I
Manantial La Mintzita	27	20.00	134.40	0.00	0.58	L
Pozo La Mintzita	28	21.00	133.85	5.00	0.63	L
Hacienda Itzicuario	29	24.00	203.67	38.38	0.99	L
Manantial Balneario Cointzio	30	32.50	411.27	0.00	1.13	I
San Nicolás Obispo	31	25.00	127.30	72.00	1.16	I
Cuanajillo	32	21.50	147.00	68.00	1.08	I
Manantial Sn. Lorenzo Itzicuario	33	21.00	240.81	0.00	0.71	L
Manantial El Parial	34	21.00	275.94	0.00	0.74	L
Manantial Tinijaro	35	20.70	232.05	0.00	0.69	L
Manantial Hacienda Itzicuario	36	20.82	262.73	0.00	0.73	L

La ubicación espacial de los sitios de estudio y sus respectivos IF se muestran en la figura 4.1. Mediante el IF 8 sitios se clasificaron como locales, 27 como intermedios y 1 como regional. Los pozos presentaron un IF promedio de 1.30 y los manantiales de 0.76. De los manantiales 5 se clasificaron como locales y 1 como intermedio. Los flujos en los pozos se clasificaron 3 como locales, 26 como intermedios y 1 como regional. El hecho de que en los pozos se hayan encontrado tanto flujos locales, como intermedios y regionales se debe a que estos fueron construidos a diferentes profundidades sin considerar criterios hidrogeológicos. Además cuando los pozos fueron construidos se ranuraron desde su extremo inferior hasta la profundidad donde se encontró agua subterránea, con lo cual se permitió la mezcla de flujos de diferentes profundidades. Se observa que en sitios con mayor demanda de agua subterránea los IF son más altos que el promedio (IF=1.3), situación que se evidencia en los grandes desarrollos habitacionales (6, 12) o en la zona que colinda con la ciudad de Morelia al noreste de la zona de estudio (1, 2, 3, 4, 9, 10). Se observa una tendencia espacial en el IF, el cual aumenta de oeste a este, coincidiendo con las trayectorias de flujo de aguas subterráneas propuestas en investigaciones previas realizadas en la zona de estudio (Israde-Alcántara et al. 2005). Los pozos ubicados en la periferia del cerro del Águila (20, 21, 31 y 32) muestran índices de flujo menores al promedio, evidencia de que el cerro del Águila actúa como zona de recarga coincidiendo con lo señalado por Garduño y colaboradores (2014).

Se observó que las fallas geológicas pueden actuar como canales de flujo conectando zonas profundas del sistema acuífero con estratos superficiales, ocasionando mezcla de aguas subterráneas provenientes de diferentes sistemas de flujo, esta situación fue evidente en dos sitios ubicados directamente sobre fallas geológicas el pozo 26 (IF= 1.66) y el manantial 30 (IF= 1.13), los cuales presentaron valores de IF mayores a los promedio de pozos (IF= 1.30) y manantiales (0.77) respectivamente. Ambos sitios el 26 (pozo) y el 30 (manantial) tienen temperaturas mayores a 28.5 °C y pH < 7.12, lo que nos indica que en

estratos profundos del sistema acuíferos el agua presenta temperaturas altas y pH con tendencia ácida

La dirección de flujo establecida por la superficie piezométrica coincide con la tendencia de aumento del IF, lo cual indica que el IF es una herramienta que aporta información para identificar la dinámica de un sistema acuífero.

Los diagramas de Stiff indican que el agua subterránea es carbonatada-sódica en su mayoría, y en algunos casos carbonatada-magnésica (particularmente en los manantiales). Los diagramas de Stiff muestran que los mayores contenidos iónicos se presentan en los sitios con los IF más altos (9, 6, 10, 26), asociados a flujos intermedios y regionales. Los menores contenidos iónicos asociados a aguas más jóvenes se encuentran hacia las faldas de los cerros el Quinceo-Las Tetillas y el Águila, evidencia de que dichos cuerpos volcánicos actúan como áreas de infiltración para el sistema acuífero.

Se observa que en varios sitios se presentan concentraciones de nitratos por arriba de la norma (10 mg/l), situación que se evidencia en todos los manantiales (menos en el sitio 30) y en algunos pozos asociados a flujos mezcla de locales con intermedios (17, 28 y 32). Es importante resaltar que los nitratos solo se presentaron en sitios donde el índice de flujo es bajo (menor a 1.08). También resalta que los nitratos no se presentaron en los sitios con temperaturas altas (iguales o mayores a 28.5 °C). Por lo tanto la presencia de nitratos se asocia a flujos locales y (o) locales-intermedios. Además el manantial Balneario Cointzio (sitio 30) presentó baja concentración de nitratos, por lo cual este manantial se asocia a un flujo profundo de tipo regional, el cual se mezcla con el sistema local e intermedio. Se encontró que los nitratos actúan como un indicador de la presencia de flujos locales, los cuales se ven afectados por contaminación antrópica asociada a la descarga e infiltración de compuestos nitrogenados provenientes de drenajes en mal estado y a la percolación de agroquímicos. Como la actividad agrícola es poca, la principal fuente de nitratos se asocia a la infiltración de aguas residuales provenientes del sistema de drenajes. Las concentraciones de nitratos

por arriba de la norma se presentaron tanto en el medio volcánico como en el fluvioacustre (sedimentario).

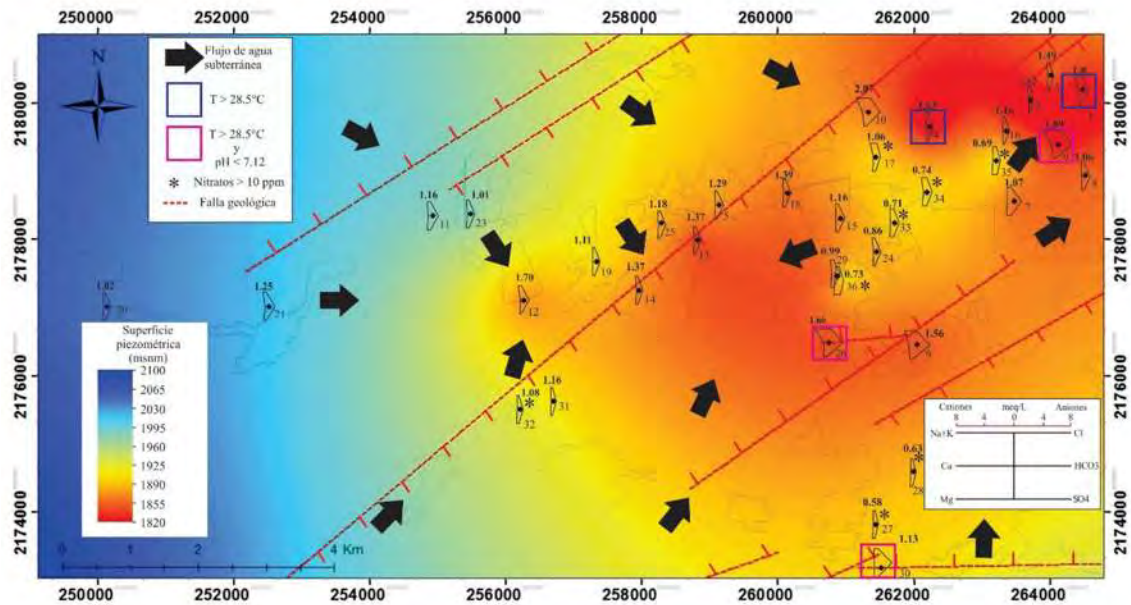


Figura 4.1 Índices de flujo de la zona Morelia-Capula (en negritas).

El diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea de la zona Morelia-Capula se presenta en la figura 4.2. Los sitios 17 y 32 aunque están clasificados como intermedios en función al IF (1.06 y 1.08 respectivamente), presentan contenidos por arriba de la norma en nitratos, evidencia de mezcla de flujos entre locales e intermedios, predominando el local. Los sitios 24 y 29 también tienen características de ser mezcla de aguas de flujos local e intermedio (predominando el intermedio), ambos tienen IF cercanos a 1 (0.86 y 0.99 respectivamente), pero su contenido de nitratos está por debajo de la norma. En el diagrama de Piper se observan agrupamientos característicos a cada tipo de flujo, donde se observa una evolución conforme los flujos evolucionan de un carácter local (agrupamiento verde) a intermedios (agrupamiento amarillo) y posteriormente a regional (agrupamiento rojo), pasando de bicarbonatadas cálcico-magnésicas a bicarbonatadas sódicas. Se observa que en el agrupamiento rojo todas las muestras presentaron IF iguales o superiores a 1.49.

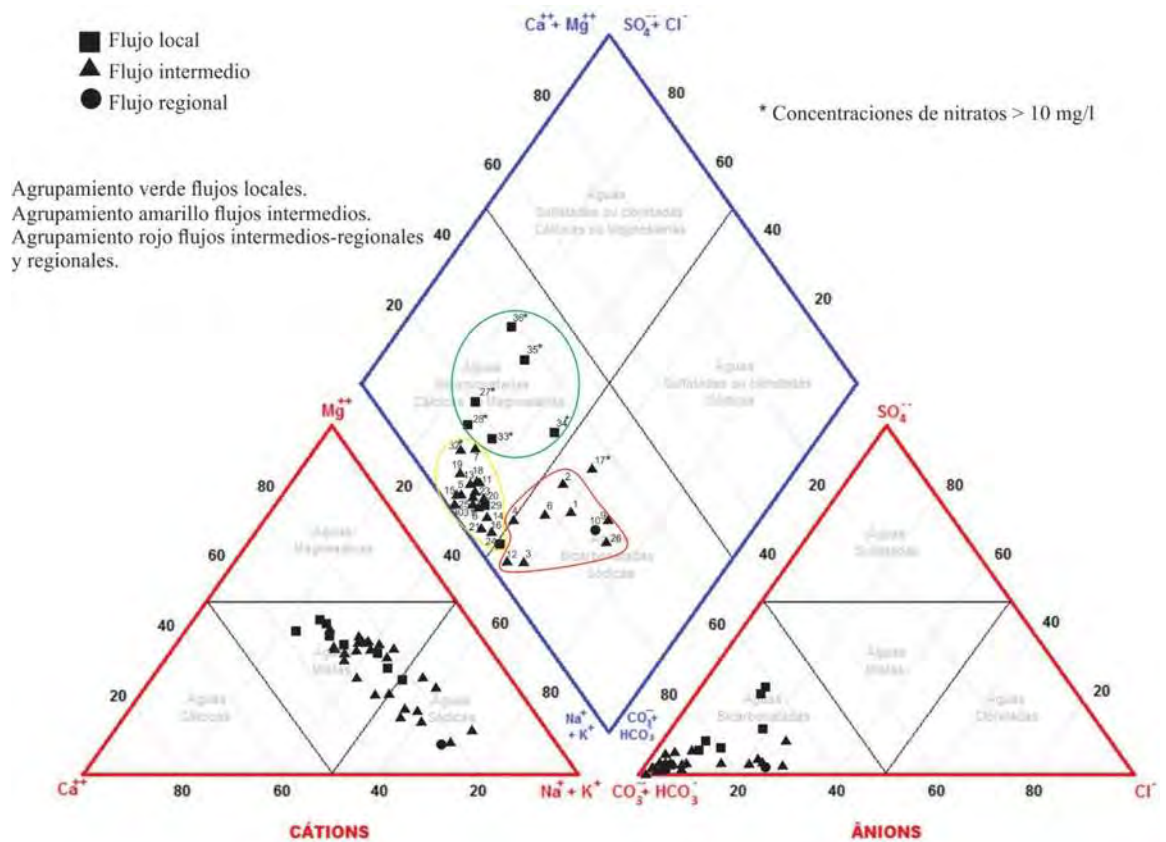


Figura 4.2 Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea.

La información generada permite conceptualizar la zona Morelia-Capula como un sistema acuífero con flujos locales, intermedios y regionales. La clasificación de los flujos de la zona Morelia-Capula muestra que en la zona existen varios sistemas de flujo interactuando en el acuífero. En la figura 4.3 se presenta un modelo conceptual del sistema de flujos presentes en la zona Morelia-Capula.

Sistema de flujo local

Los sitios de estudio pertenecientes al sistema de flujo local se caracterizan por una temperatura promedio de 21.5°C, SDT de 209.43 ppm y un abatimiento de 8.19 metros, con un IF de 0.74. Los sistemas de flujo locales se mueven en los estratos superiores del sistema acuífero tanto en la unidad volcánica como en la fluviolacustre. Los sistemas de flujo locales generan manantiales los cuales brotan en los puntos de contacto entre materiales volcánicos y fluviolacustres (conformados por estratos interdigitados de arcillas y arenas). La presencia de manantiales en las fronteras de los materiales fluviolacustres se asocia a que esta unidad hidrogeológica se ubica en la parte más baja de la zona de estudio permitiendo el drenaje de los flujos locales. Los flujos locales son susceptibles a la contaminación antropogénica debido a que en la zona existen descargas de aguas residuales, además puede haber percolación de agroquímicos en las zona de cultivo (de temporal).

Sistema de flujo intermedio

Los sitios pertenecientes al sistema de flujo intermedio presentan una temperatura promedio de 25.28°C, sólidos disueltos de 252.36 ppm y una profundidad (nivel estático) de 75.66 metros, con un IF de 1.32. Los sistemas de flujos intermedios se encuentran por toda la zona de estudio, subyaciendo a los locales. Los sistemas de flujo intermedio se encuentran tanto en la unidad volcánica como en la fluviolacustre. En algunos pozos (con IF cercanos a 1) los sistemas de flujo intermedios entran en contacto con los sistemas locales. El manantial Balneario Cointzio muestra evidencia de contacto entre flujos locales e intermedios-regionales, ya que presenta alto contenido salino y mayor temperatura que el promedio en los manantiales. La mayoría de los aprovechamientos subterráneos de la zona están extrayendo agua de flujos intermedios, es de esperar que en los años venideros el descenso de los niveles piezométricos ocasione que los pozos se construyan a más de 350 metros de profundidad y se recurra a flujos regionales para satisfacer la demanda hídrica de la zona.

Sistema de flujo regional

La presencia de flujos regionales se evidencia en el pozo Ario de 1815, el cual está construido a una profundidad de 350 metros, además de estar sujeto a un régimen de operación de 20 horas diarias, por lo cual se infiere que estos factores (profundidad y horas de bombeo) han ocasionado que el sitio los flujos locales e intermedios se hayan agotado y se estén explotando flujos profundos. El sistema de flujo regional se encuentra en la unidad volcánica, la cual subyace a la fluviolacustre. En algunos sitios (como el pozo 9) el sistema regional entra en contacto con flujos intermedios, lo que se evidencia en aumentos de los sólidos disueltos y la temperatura del agua subterránea.

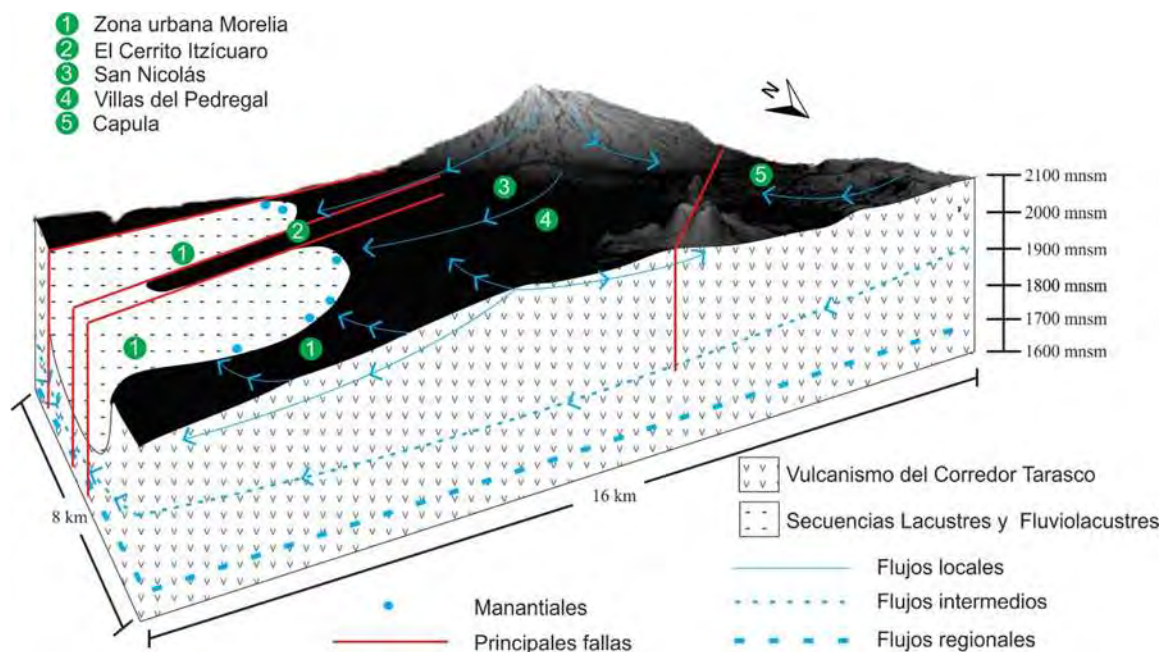


Figura 4.3 Modelo conceptual de los sistemas de flujo de la zona Morelia-Capula.

El análisis de los sistemas de flujo muestra que en la zona Morelia-Capula el agua subterránea sigue la dinámica establecida por la topografía del terreno, aunque existen afectaciones puntuales (sitios 1, 2, 4, 12, 14) donde los flujos han invertido sus direcciones debido a los conos de abatimiento.

El estudio hidrogeológico de la zona Morelia-Capula presenta un interesante caso de un acuífero alterado por la actividad humana, donde es posible ver los efectos de la extracción de agua subterránea sobre la dinámica de los sistemas de flujo. En el caso de la zona Morelia-Capula la alteración de los sistemas de flujo se produjo bajo unas circunstancias muy particulares, como lo son un periodo de tiempo relativamente corto que comprende 21 años (1994-2015) donde los aprovechamientos pasaron de menos de 11 a más de 40, y la población se quintuplicó (de un aproximado de 20 000 habitantes a más de 100 000), lo cual implicó que la extracción se incrementara de 2 182 869.36 a 8 869 184.64 m³/año, en un contexto donde el agua subterránea es la única fuente de líquido. Es posible tener una idea de los cambios de la dinámica del agua subterránea ya que los sitios ubicados al oeste de la zona Morelia-Capula conservan las características que pudieron haber tenido los flujos que se han visto alterados por la extracción. El presente trabajo sienta las bases para realizar estudios que permitan cuantificar los cambios en los sistemas de flujo mediante el IF si este es evaluado respecto a un periodo de tiempo, lo que da pie a la propuesta de esquemas de extracción enfocados a optimizar el aprovechamiento de los acuíferos, lo cual puede realizarse mediante la implementación de medidas enfocadas a mantener o disminuir los IF de los puntos de extracción de agua. El caso de Morelia-Capula pone en evidencia que la extracción de agua subterránea puede generar importantes cambios en los sistemas de flujo en periodos de tiempo relativamente cortos (si consideramos que los tiempos de recarga natural de un acuífero pueden tardar décadas o siglos).

Los datos muestran que la zona Morelia-Capula es de tránsito y descarga de agua subterránea, más que de recarga. La zona de tránsito se asocia al sistema de flujo intermedio y la de descarga a los manantiales que afloran en la parte topográficamente baja.

A manera de reflexión sobre el manejo de las aguas subterráneas se tiene que tener en cuenta que los acuíferos deben ser solamente un recurso provisional para el suministro de agua, y que con el tiempo debemos de migrar a otras fuentes renovables que permitan abastecer las necesidades humanas sin comprometer el buen funcionamiento hídrico de los ecosistemas. A modo de cierre se cita una frase de Koichiro Matsuura “El agua no se agota cuando se extrae del pozo de la sabiduría humana”.

CAPITULO 5: MODELACION MATEMÁTICA DEL SISTEMA ACUÍFERO UBICADO AL PONIENTE DE MORELIA

5.1 Bases teóricas para la modelación matemática de acuíferos

5.1.1 Introducción a la modelación matemática de acuíferos

La modelación matemática de acuíferos es un tema que abarca una amplia gama de conceptos que van desde temas puramente matemáticos hasta hidrogeológicos e informáticos. Para entender la modelación matemática es necesario empezar por definir que es un modelo. Un modelo es una representación simplificada de la realidad (SEA 2012). La importancia de los modelos radica en el hecho de que representar a totalidad la realidad, sería prácticamente imposible debido al alto grado de complejidad de un sistema real. Por lo tanto un modelo simplifica la realidad representando los elementos más importantes que permiten entender un fenómeno. El objetivo de un modelo es representar uno o más fenómenos de interés. El grado de complejidad de un modelo dependerá principalmente de la complejidad del fenómeno de interés, de la información disponible del sistema en estudio y, de los recursos informáticos y computacionales de los que se disponga, así como del nivel de habilidad de la persona encargada de la modelación (modelista) (La Vigna et al. 2014). En el contexto hidrogeológico a la representación simplificada de un acuífero (o sistema acuífero) se le define como modelo conceptual. Cuando el modelo conceptual de una zona de estudio se traduce a valores numéricos y ecuaciones que permiten obtener datos cualitativos se obtiene un modelo matemático (también llamado modelo numérico) (SEA 2012). La resolución del modelo matemático permite obtener el valor de un parámetro de interés en una zona del modelo, por ejemplo el valor del potencial hidráulico o la concentración de una sustancia. Los modelos matemáticos pueden ser resueltos por diferentes métodos, entre los más difundidos están las diferencias finitas, los elementos finitos y los volúmenes finitos. Usualmente los modelos matemáticos hidrogeológicos se resuelven por diferencias finitas o elementos finitos. La resolución de modelos matemáticos por

método de diferencias finitas (MDF) requiere que la zona de estudio sea discretizada en una malla con celdas rectangulares, cuenta con la desventaja de que no representa a exactitud la geometría de la zona de estudio, pero tiene la ventaja de que es el método más sencillo de resolver. El método de elementos finitos (MEF) genera un mallado donde las celdas pueden tener diferente forma, generalmente por simplicidad se eligen triángulos, permitiendo una representación más exacta de la geometría de la zona de estudio. En la figura 5.1 se muestra un ejemplo del tipo de mallado que se genera por diferencias finitas y elementos finitos (Molina et al. 2014). La diferencia más evidente entre el método de diferencias finitas y el método de elementos finitos es la forma de las celdas, pero en el fondo existen implicaciones de cálculo que son mucho más profundas las cuales han generado que exista una amplia gama de algoritmos de resolución de modelos matemáticos. La descripción de las características y aplicaciones de los algoritmos (softwares) más utilizados en la modelación hidrogeológica puede ser consultada en bibliografía especializada (IHOBE 2006; SEA 2012).

Análogamente al ámbito espacial, el período modelizado se discretiza y en los modelos hidrogeológicos el método usual es el de la diferencias finitas. La zona y el período de estudio conforman los dominios espacial y temporal del modelo, respectivamente.

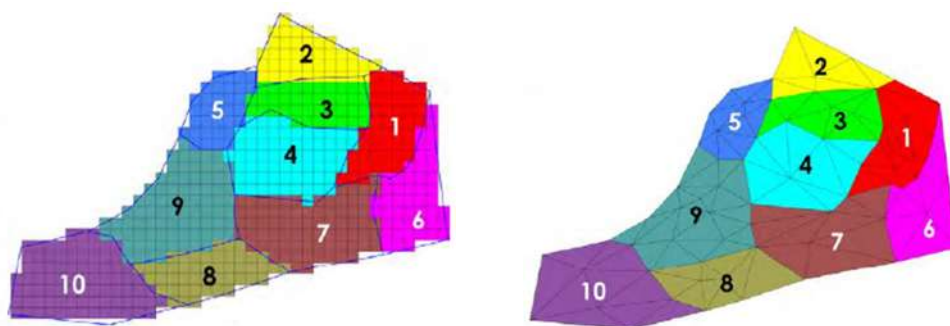


Figura 5.1 Ejemplo de mallado por diferencias finitas (izquierda) y mallado por elementos finitos (derecha), los colores representan diferentes valores de conductividad hidráulica (modificado de Molina et al. 2014).

La elección del software para el desarrollo del modelo matemático se basa en función al objetivo que se desea alcanzar mediante la modelación. En este caso interesó reconocer la dinámica del sistema acuífero. La dinámica del sistema acuífero está determinada por la evolución de la superficie piezométrica. Por lo tanto fue necesario recurrir a un software que permitiera modelar la evolución de la superficie piezométrica. El software seleccionado fue MODFLOW con su interfaz Modelmuse por las siguientes razones:

- Permite modelar la evolución de la superficie piezométrica respecto al tiempo.
- MODFLOW es el código más difundido a nivel mundial para modelar acuíferos y utiliza el método de diferencias finitas.
- Es un software gratuito.
- Es uno de los softwares que utilizan en el lugar donde se realizó la estancia académica.
- MODEL MUSE trabaja bajo programación basada en objetos lo que facilita su manejo.

El nivel de complejidad de un modelo depende de las características particulares del fenómeno a modelar, tanto modelos sencillos como complejos ofrecen resultados en los que la incertidumbre les es un rasgo inherente. Lo importante es que independientemente de la complejidad, el modelo cumpla con el objetivo para el cual fue creado (Voss 2011b). El modelo es una herramienta que ayuda a entender el comportamiento de un sistema o fenómeno (Voss 2011a). El proceso mediante el cual se realiza la modelación (figura 5.2) es iterativo (IHOBE 2006), por lo cual durante el desarrollo del modelo matemático es común que tenga que ser necesario replantear el modelo conceptual, hasta alcanzar el objetivo de la modelación (La Vigna et al. 2014). Los modelos matemáticos son perfectibles, el avance del conocimiento hidrogeológico de una zona de estudio implica la actualización de los modelos (Dutton y Mace 2002; Bredehoeft 2005).

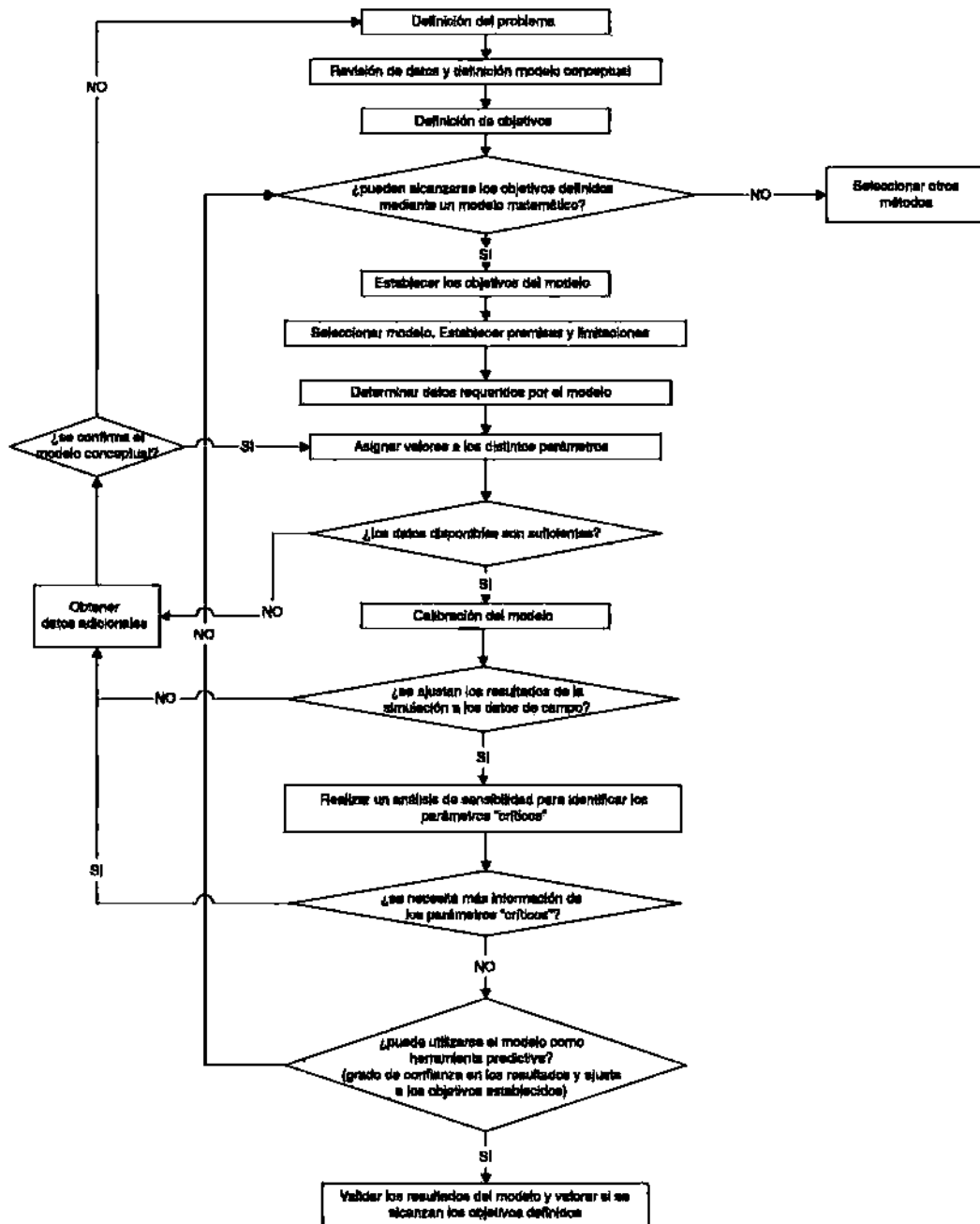


Figura 5.2 Diagrama general del proceso de modelación (modificado de IHOBE 2006).

5.1.2 Principios matemáticos que rigen el flujo del agua subterránea

Las bases para el entendimiento de los mecanismos que rigen el movimiento de agua en el subsuelo fueron asentadas por el Ingeniero Hidráulico Henry Darcy quien estableció la ley que lleva su nombre. Darcy estudió el movimiento del agua en los medios porosos y determinó que el flujo que pasa por una sección es directamente proporcional a la diferencia de presión entre dos puntos respecto a la distancia entre ellos (gradiente hidráulico), multiplicado por una constante (conductividad hidráulica). Sus descubrimientos quedaron plasmados en el documento "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon" en el año de 1856 (Freeze 1994).

La ecuación de Darcy queda establecida de la siguiente forma:

$$Q = qA = K \frac{\Delta h}{\Delta l} A \quad (2)$$

Dónde:

Q = Volumen de agua que pasa por segundo (m^3/s).

q = Velocidad de Darcy o flujo específico (m/s).

K = Conductividad hidráulica (m/s).

$\frac{\Delta h}{\Delta l}$ = Gradiente hidráulico (adimensional).

A = Sección transversal perpendicular al flujo (m^2).

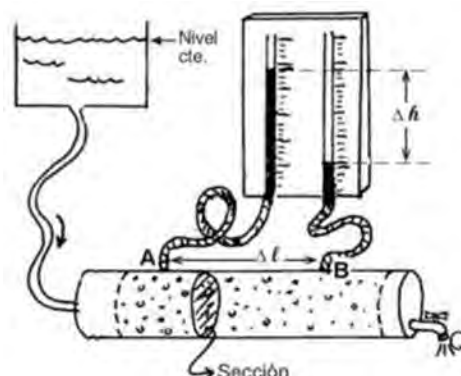


Figura 5.3 Diagrama esquemático de los elementos de la ecuación de Darcy.

La ecuación de Darcy puede ser expresada en función de la velocidad (v):

$$v = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (3)$$

La velocidad de Darcy (v) puede ser expresada en función del eje x, eje y, eje z para indicar las tres componentes principales en el espacio. Quedando de la siguiente forma:

$$\vec{v}_x = K_x \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (4)$$

$$\vec{v}_y = K_y \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (5)$$

$$\vec{v}_z = K_z \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (6)$$

En forma análoga, el movimiento del agua subterránea puede ser analizado en los tres ejes. En un cubo, cada eje tiene dos caras por las cuales se da el flujo de agua subterránea en el eje (figura 5.4).

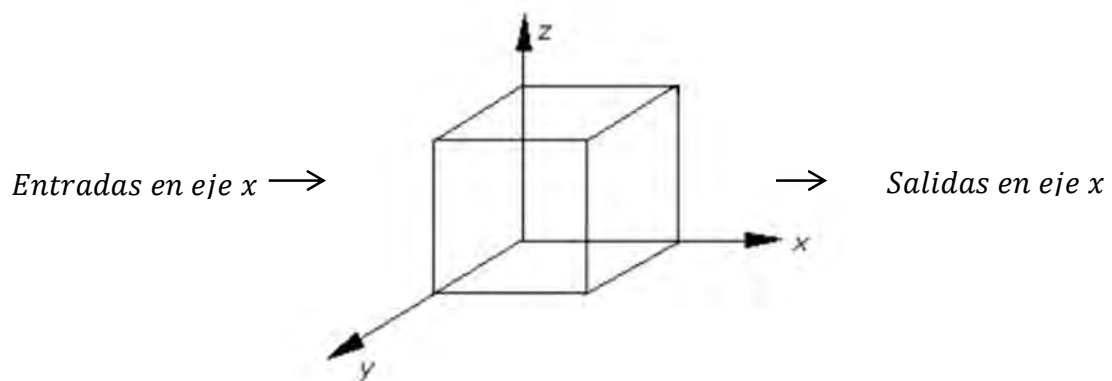


Figura 5.4 Diagrama esquemático del movimiento del agua subterránea en una unidad acuífera de forma cúbica.

Considerando un cubo de volumen unitario, y un tiempo unitario, en el eje x la diferencia de cantidad de líquido almacenado (ΔV_x) viene dado por:

$$\Delta V_x = \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} = \frac{\partial \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial x} = K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (7)$$

Respectivamente para cada eje se tendrá:

$$\Delta V_y = \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} = \frac{\partial \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right)}{\partial y} = K \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (8)$$

$$\Delta V_z = \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial z} = \frac{\partial \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right)}{\partial z} = K \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad (9)$$

La diferencia total de cantidad de líquido almacenado (ΔV) en el cubo considerando un volumen y tiempo unitario será:

$$\Delta V = \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) K \quad (10)$$

Para generalizar la ecuación se incorpora el coeficiente de almacenamiento específico (S^*) y un término (W) que simboliza ingresos o extracciones de líquido, obteniéndose así la ecuación general de flujo:

$$\Delta V = \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) K + W = S^* \frac{\partial h}{\partial t} \quad (11)$$

La ecuación general de flujo para un medio homogéneo (las propiedades hidrogeológicas son iguales en diferentes lugares) e isótropo (las propiedades hidrogeológicas son iguales en todas las direcciones), en régimen permanente (no hay cambios respecto al almacenamiento de líquido) es:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right)K + W = 0 \quad (12)$$

La ecuación general de flujo para un medio homogéneo e isótropo, en régimen transitorio (hay cambios en el almacenamiento de líquido) es:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right)K + W = S^* \frac{\partial h}{\partial t} \quad (13)$$

La ecuación general de flujo para un medio heterogéneo (las propiedades hidrogeológicas son distintas en diferentes lugares) y anisótropo (las propiedades hidrogeológicas varían en una o más direcciones), en régimen permanente es:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + W = 0 \quad (14)$$

La ecuación general de flujo para un medio heterogéneo y anisótropo, en régimen transitorio es:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + W = S^* \frac{\partial h}{\partial t} \quad (15)$$

Es importante tener en cuenta que los acuíferos son heterogéneos y anisótropos, aunque al modelarlos su heterogeneidad se representa de forma simplificada y la anisotropía determinada a escala poder ser, eventualmente obviada.

Para modelar un acuífero éste es dividido en una malla con una o más capas, generando celdas. En cada celda se resuelve la ecuación de flujo para régimen permanente (ecuación 14) o transitorio (ecuación 15). El conjunto de

ecuaciones de todas las celdas forma un sistema de ecuaciones que al ser resuelto permiten la resolución del modelo matemático.

Para resolver un sistema de ecuaciones generales de flujo se deben establecer las condiciones de frontera del sistema y, si el régimen representado es transitorio, además se deben imponer las condiciones iniciales. Las condiciones iniciales se refieren al nivel piezométrico en el momento inicial. Las condiciones de frontera indican la relación del flujo con el medio que le rodea. No obstante, se debe tener presente que no siempre un sistema tiene solución, esta puede no existir o el sistema puede tener más de una solución. Si el problema tiene solución y esta es única se dice que éste está bien condicionado. Los problemas no lineales, como es el caso de los acuíferos libres usualmente no tiene una solución única, para resolverlos se utilizan métodos iterativos que resuelven el sistema tratando al problema como lineal. Los sistemas lineales sí tienen una solución única.

Las condiciones de frontera se clasifican en tres grupos:

- 1) Potencial impuesto: Llamado también condición de Dirichlet o condición de primera clase. Esta condición indica que el potencial hidráulico, H es el impuesto en un punto dado del dominio del modelo. Lo que indica que el flujo que entra o sale del sistema en ese punto depende de la diferencia de potencial entre el calculado por el modelo y el impuesto.
- 2) Flujo impuesto: Condición de Neumann o condición de segunda clase. Implica que un caudal, Q que se impone que entre o salga del sistema, en un punto dado de su dominio.
- 3) Condición mixta: Condición de Cauchy o de tercera clase. El flujo que entra o sale del acuífero en un punto, $\alpha_h (H-h)$, depende de la diferencia de potencial hidráulico entre el nivel calculado por el modelo, h , y un nivel impuesto, H , en ese punto y la conductancia igualmente impuesta en ese punto, α_h .

5.1.3 Funcionamiento del algoritmo MODFLOW

MODFLOW es un código desarrollado por el USGS para modelación (tridimensional) hidrogeológica. La primera versión de MODFLOW fue presentada en el año de 1984, desde entonces se han generado varias versiones siendo la última MODFLOW-2005 de la cual periódicamente hay actualizaciones. MODFLOW fue desarrollado como un sistema modular (de ahí deriva su nombre) que permite que el usuario solo incorpore las herramientas (módulos) que necesita para su caso de estudio (McDonald y Harbaugh 2003).

Las ecuaciones que conforman el sistema se definen para cada celda en que se discretizó el dominio espacial del modelo (zona de estudio). Las ecuaciones en cada celda se resuelven de forma conjunta con las celdas vecinas y, eventualmente, acorde a las condiciones de contorno e iniciales impuestas en dicha celda y las vecinas. Espacialmente, en MODFLOW las celdas se definen a partir de los nodos situados en sus respectivos centros. El sistema de ecuaciones se resuelve en cada periodo de tiempo. Al final de cada periodo de tiempo MODFLOW impone a cada celda un balance de masa, donde los flujos que entran y salen determinan el almacenamiento en la celda. El caudal de una celda dependerá de los flujos con sus celdas vecinas. Como se muestra en la figura 5.5 (Harbaugh 2005) cada celda podrá tener hasta 6 celdas vecinas en función a su ubicación en la malla.

MODFLOW cuenta con varios algoritmos (basados en el método de diferencias finitas) para resolver por aproximaciones numéricas las ecuaciones de flujo. Los algoritmos para resolver las ecuaciones de flujo presentan características particulares. La elección de uno u otro algoritmo dependerá de las condiciones particulares del sistema a modelar. Se trabaja por periodos de tiempo, al final de cada periodo se realiza el cálculo del nivel piezométrico, para lo cual el programa realiza iteraciones (previamente especificadas) hasta cumplir los criterios de convergencia. Cuando no se cumplen los criterios de convergencia el proceso de resolución de la ecuación general de flujo se detiene y el programa indica un error. La resolución de los problemas de convergencia a veces demanda

la modificación misma de la estructura del modelo o, en otras circunstancias, basta sólo con la elección de otro algoritmo de resolución o, eventualmente, podría alcanzar con relajar los criterios de convergencia o el número de máximo de iteraciones. La acción a tomar dependerá de la naturaleza de la dificultad numérica.

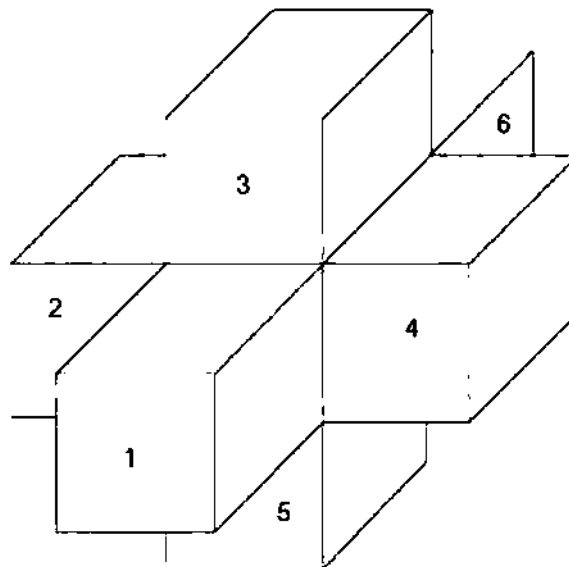


Figura 5.5 Celdas que rodean una celda central (modificado de Harbaugh 2005).

La descripción completa de los elementos y características del programa MODFLOW se encuentra en los manuales de su manejo que fueron elaborados por el USGS, se recomienda la lectura del libro –MODFLOW 2005- escrito por Harbough en el año 2005.

5.1.4 Características del software Modelmuse

Modelmuse es una interfaz gráfica del software MODFLOW (versión 2005). Modelmuse fue desarrollado en el año 2006 por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), originalmente fue llamado GoPhast y en el año 2009 fue renombrado con su nombre actual.

Modelmuse al igual que MODFLOW trabaja por módulos (paquetes computacionales) que permiten al usuario incorporar los elementos que se necesiten para resolver el modelo.

Modelmuse fue diseñado con la intención de ser un programa de fácil manejo por lo cual su programación es orientada a objetos. La programación orientada a objetos quiere decir que las variables necesarias para realizar la modelación se introducen al programa mediante objetos que se asignan a las celdas que conforman el mallado de la zona de interés, con lo cual el entendimiento del modelo matemático se vuelve más intuitivo. Al programar mediante objetos no es necesario escribir los comandos de MODFLOW, con lo cual se reduce el tiempo necesario para aprender su manejo.

Modelmuse permite visualizar los elementos del modelo conceptual mediante mapas 2D y 3D. Con Modelmuse los resultados de la modelación se presentan mediante documentos de texto y mapas, con lo cual se facilita la interpretación de los datos.

Debido a su sencillez (comparado con otros softwares de modelación hidrogeológica) Modelmuse permite realizar modelos a usuarios con conocimientos de hidrogeología, actividad que antes solo era posible para especialistas en la rama de la modelación.

Una de las principales ventajas respecto a los softwares comerciales es que Modelmuse es gratuito, y sus actualizaciones no tienen ningún costo, además cuenta con guías y soporte técnico por parte del USGS. Modelmuse ha sido

diseñado para trabajar con el sistema operativo Windows, pero su código puede ser modificado para trabajar con Linux.

Los detalles sobre el manejo del software Modelmuse pueden ser consultados en las guías que ofrece el USGS (Winston 2009).

5.2 Desarrollo del modelo matemático del sistema acuífero ubicado al poniente de Morelia

Para integrar el modelo matemático se utilizó la versión 3.8.1 de Modelmuse.

La secuencia de actividades para desarrollar el modelo matemático fueron las siguientes:

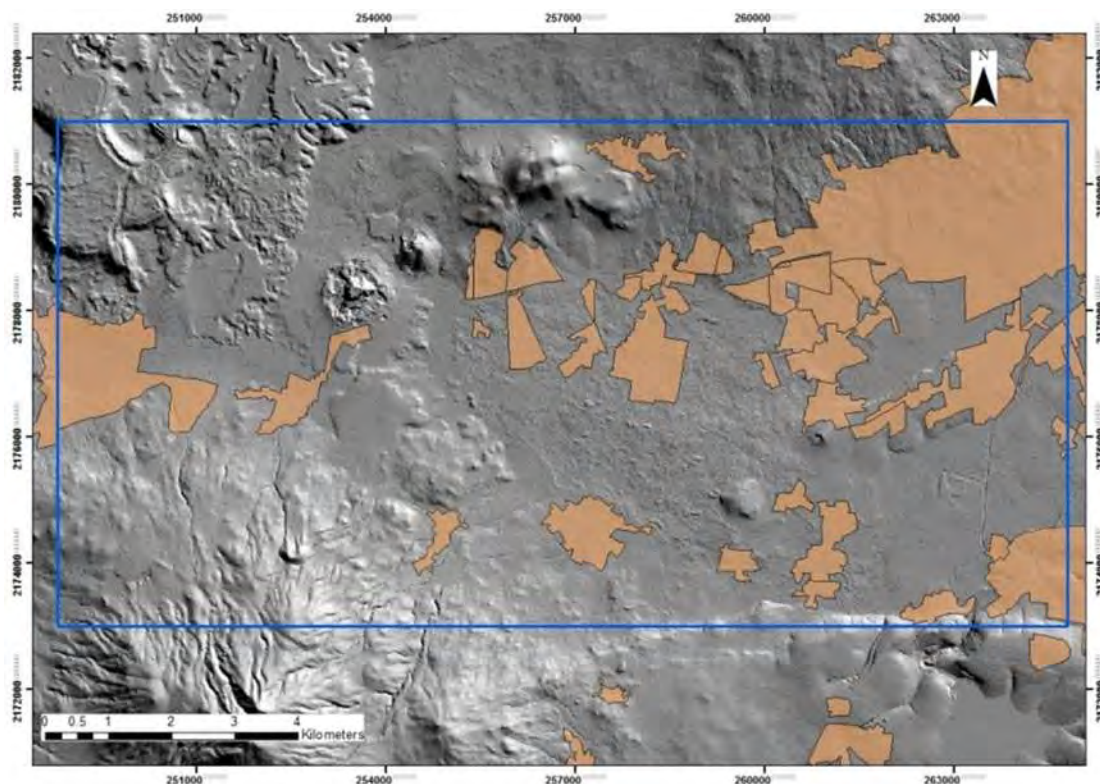
1. Identificar el objetivo del modelo, el cual es reconocer la dinámica del sistema acuífero ubicado al poniente de Morelia.
2. Generar el modelo conceptual del acuífero, tema que se trató durante el capítulo segundo de la presente tesis.
3. Discretizar espacial y temporalmente la zona de estudio.
4. Cargar los elementos a representar en el modelo.
5. Calibrar el modelo.
6. Modelar la dinámica del sistema acuífero en el periodo de tiempo de interés.

Del listado anterior los puntos 1 y 2 ya se trataron en capítulos anteriores, por lo cual se procederá a explicar los puntos 3 al 5, el punto 6 se tratará en los resultados de la modelación.

5.2.1 Discretización espacial y temporal del modelo matemático

Discretización espacial

El área de estudio que se estableció para el modelo matemático abarcó desde el municipio de Capula hasta el libramiento poniente de Morelia, es una zona de 16 km de largo por 8 km de ancho, con un total de 128 km² de superficie. El área de modelación se estableció en base a dos consideraciones, la primera es que es donde se encuentran los pozos de extracción ubicados en la zona Morelia-Capula, y segundo debido a que esa es la zona donde se tiene información litológica, la cual se generó durante los procesos de exploración y perforación de pozos para el abastecimiento de agua subterránea.



67**Figura 5.6** Zona donde se realizó la modelación matemática, en color salmón se muestran los asentamientos humanos.

La zona fue discretizada en celdas de 200 metros de largo, 200 metros de ancho y 400 metros de profundidad (figura 5.7). La profundidad de la celda fue establecida en base a la profundidad máxima en la cual se tiene conocimiento de la geología del subsuelo. En total el modelo está conformado por 3 200 celdas, ubicadas en una capa.

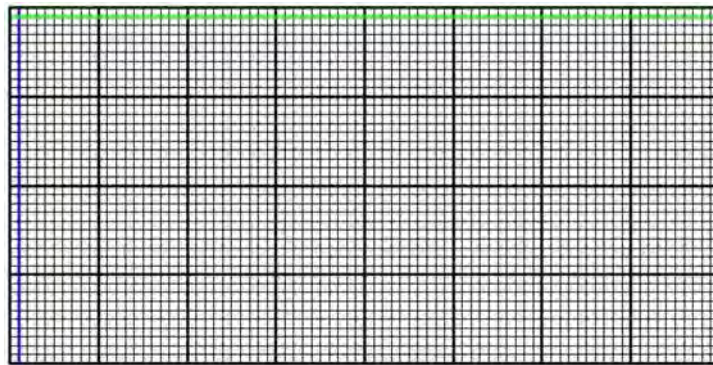


Figura 5.7 Vista en planta del modelo matemático.

Discretización temporal

El periodo de modelización del modelo matemático (discretización temporal) inició en el año de 1994 y comprendió hasta el año 2038.

Se eligió el año 1994 como periodo de inicio debido a las siguientes razones:

- La mayor cantidad de información (datos poblacionales, piezométricos, precipitación, temperatura) inician a partir del año 1994.
- Del año 1994 al presente se tiene un periodo de crecimiento poblacional que implicó la construcción de nuevos pozos, y con ello un incremento en las extracciones de agua subterránea. Este es el periodo donde se han presentado los cambios más drásticos en los niveles piezométricos del sistema acuífero, y por lo tanto de su dinámica de flujo.

El periodo de modelación se concluye en el año 2038, ya que se decidió modelar un periodo de tiempo igual al periodo de tiempo en el cual se tienen registros de los niveles piezométricos (1994-2016).

5.2.2 Elementos representados en la modelación

En base a la compilación y generación de información hidrogeológica de la zona Morelia-Capula se consideraron los siguientes elementos:

- Modelo digital de elevación.
- Nivel piezométrico inicial.
- Recarga en el sistema acuífero.
- Pozos de extracción.
- Geología de la zona.
- Propiedades hidrogeológicas del sistema acuífero.

Modelo digital de elevación

A partir de las bases de datos del INEGI se descargaron los archivos para conformar el modelo digital de elevaciones (resolución de 5 metros) de la zona de estudio. Los archivos fueron integrados en un solo archivo (ascii) usando el software Global Mapper versión 12.

Nivel piezométrico inicial

La revisión de los datos de piezometría de la zona de estudio mostraron que para el año 1994 el nivel piezométrico de la zona Morelia-Capula se ubicaba a una profundidad de 30 metros. A partir de la profundidad de 30 metros se estableció el nivel piezométrico inicial de la modelación.

Recarga del sistema acuífero

Mediante los datos históricos (años 1994 al 2014) de precipitación y temperatura se estimó la infiltración mediante el método de Thornthwaite, el dato estimado fue 202.2 mm/año. Sin embargo para la modelación se consideró que el total de la infiltración se drena por medio de los manantiales presentes en la zona. Para la modelación no se consideraron los manantiales, por lo cual la recarga se fijó en cero.

Pozos de extracción

Durante la presente tesis se realizó un censo de pozos. Se ubicaron un total de 38 pozos activos. El listado de pozos activos y sus volúmenes de operación se encuentran en los anexos (tabla A.8). Solo se incluyeron en el modelo los pozos activos.

Geología de la zona

Por medio de la información litológica y la interpretación de sondeos eléctricos verticales se generaron secciones geológicas. Con las secciones geológicas y el modelo digital de elevaciones se establecieron las geometrías de las unidades geológicas presentes en la zona de estudio. A partir de las geometrías de las unidades geológicas se establecieron las geometrías de las unidades hidrogeológicas. Las unidades hidrogeológicas fueron delimitadas mediante un sistema de información geográfica (ArcGIS versión 13.3) y transformadas a formato shape para poder ser cargados en el programa Modelmuse. En la figura 5.8 se presentan las unidades hidrogeológicas representadas en el modelo matemático visualizado en el entorno de Modelmuse.

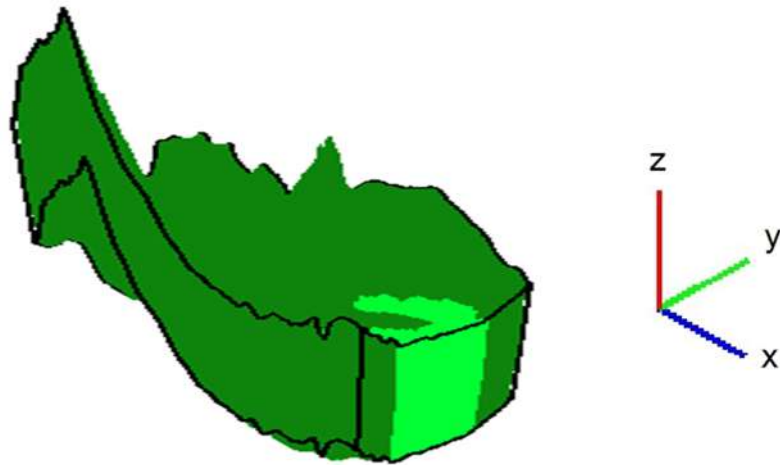


Figura 5.8 Representación tridimensional (eje z con exageración) de las unidades hidrogeológicas de la zona Morelia-Capula. En verde oscuro los materiales volcánicos (acuífero volcánico) y en verde claro los materiales terrígenos (acuífero terrígeno).

Propiedades hidrogeológicas del sistema acuífero

Las propiedades hidrogeológicas fueron obtenidas a partir de las pruebas de bombeo.

La conductividad hidráulica del acuífero volcánico fue 0.00007701 m/s, y en el acuífero terrígeno 0.0001677 m/s.

La porosidad del acuífero tarasco fue de 0.02289 mientras que en el acuífero terrígeno de 0.6348.

Durante el proceso de calibración se ajustaron los valores de conductividad hidráulica y porosidad para que los pozos coincidieran con los abatimientos registrados.

5.2.3 Calibración del modelo

Para realizar la calibración se instalaron piezómetros en el modelo matemático. Los piezómetros fueron colocados en los sitios donde se contaba con datos históricos de los abatimientos (tabla 2.5). Se ajustaron los valores de los caudales de los pozos de extracción hasta reproducir los niveles piezométricos reales.

5.3 Resultados y discusión de la modelación matemática

La modelación fue configurada para generar la superficie piezométrica de la zona Morelia-Capula en intervalos de un año. Las imágenes que muestran la superficie piezométrica (en intervalos de 4 años) se presentan en la figura 5.9.

Al primer año de la modelación (1995) se observa que hacia Capula el nivel piezométrico se ubica en los 2020 metros sobre el nivel del mar (msnm), mientras que hacia la zona de los Itzícuaros y cercanías a Morelia los niveles piezométricos rondan los 1900 msnm. Para el año 1998 se observan una disminución de los niveles piezométricos, la cual en las zonas con mayor densidad de pozos empieza a generar conos de abatimiento con niveles de 1870 msnm. Para el año 2002 las zonas con niveles de 1870 msnm presentan una expansión, mientras nuevos conos de abatimientos (como San Nicolás Obispo) son observables. En el año 2006 se presenta un notable avance de la depresión piezométrica hacia el poniente de la zona Morelia-Capula, mientras que en la periferia a Morelia se observa un incremento de la profundidad (zonas a 1850 msnm). Durante los años 2010 y 2014 las tendencias de aumento de la profundidad son similares al año 2006. En el año 2018 se observa la aparición de celdas donde el nivel piezométrico ronda los 1800 msnm, estas celdas se ubican al noreste de la zona de estudio, donde hay varios pozos cercanos entre sí, los cuales están operando desde el inicio del periodo de modelación. Para el año 2022 el modelo determina la aparición de celdas con niveles piezométricos de 1800 msnm en la zona de Villa Magna-Villas del Pedregal.

Para los años 2026 al 2030 el modelo distingue que se incrementa la cantidad de celdas con valores de piezometría de 1800 msnm. Para los años 2034 y 2038 los niveles piezométricos en las zonas con mayor demanda de agua subterránea rondarían los 1700 msnm.

Al final del periodo de modelación los abatimientos alcanzaron valores entre 150 y 250 m, esto implicará que para el año 2038 los pozos tendrán que ser construidos a profundidades cercanas a los 400 m. Además un gran número de pozos actuales (perforados a 200 m) requerirán aumentar su profundidad.

Lo modelación muestra que se generarán conos de abatimiento en las zonas con mayor demanda de agua y en los pozos con más tiempo de operación y en aquellas zonas con mayor densidad de aprovechamientos subterráneos, como es el caso de Villa Magna-Villas del Pedregal y el noreste de la zona de estudio.

Los conos de abatimiento implicaran una alteración de los flujos naturales de agua subterránea.

Los resultados de la modelación apuntan a que la zona que comprende de Capula hasta Tacícuaro las depresiones piezométricas serán mucho menores que en el resto, con abatimientos alrededor de los 40 metros. En términos de disponibilidad, la zona Capula-Tacícuaro tendrá más agua subterránea en comparación con las demás áreas modeladas.

El modelo contempla una proyección a partir de las circunstancias actuales de explotación. Hay que tener en cuenta que en el futuro continuará el crecimiento poblacional de la zona Morelia-Capula, y con ello la demanda de agua subterránea se incrementará, por lo que es de esperarse que el abatimiento de la superficie piezométrica sea aún mayor que el mostrado en la modelación. Por lo cual será necesario actualizar el modelo conforme se avance en el conocimiento del sistema acuífero y se incorporen nuevos pozos a la zona Morelia-Capula. Aun así, el modelo provee información valiosa que ayuda a pronosticar el nivel piezométrico

del sistema acuífero en el periodo que comprende desde el año 2016 hasta el año 2038.

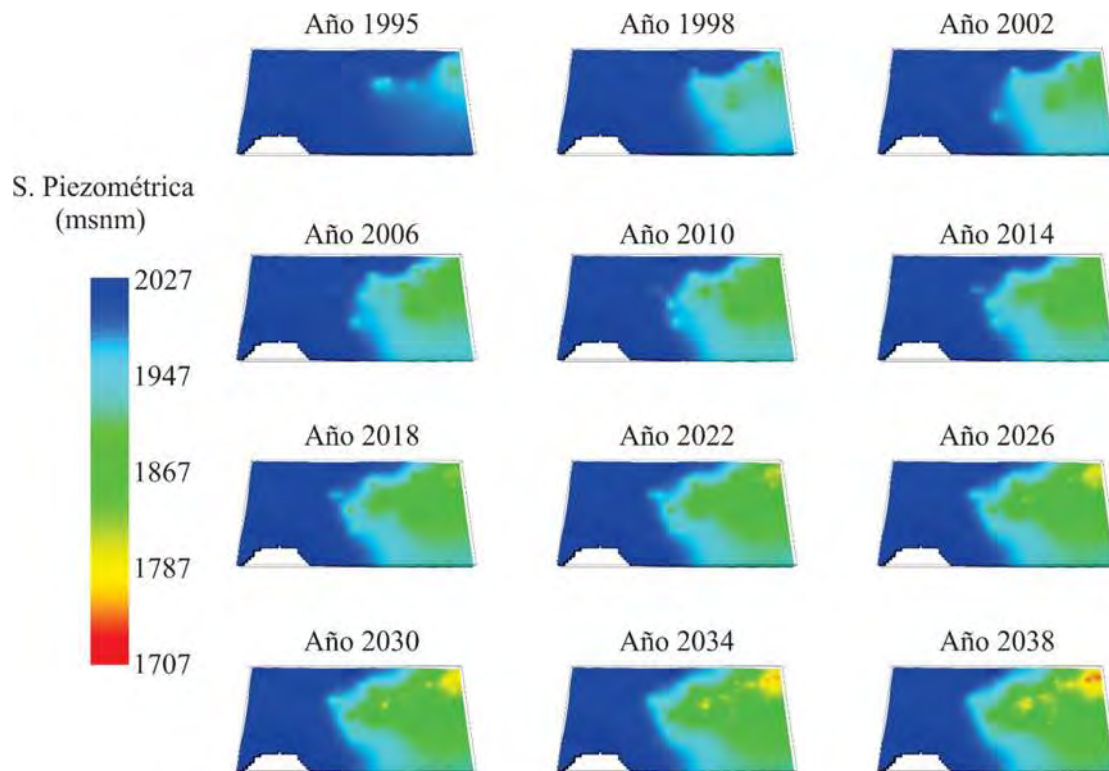


Figura 5.9 Evolución de la superficie piezométrica del año 1995 al 2038.

CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados de los análisis a las muestras de agua subterránea apuntan a que no existe una alteración evidente en cuanto a los parámetros fisicoquímicos, análisis de iones mayores y menores así como de elementos traza que pueda asociarse directamente a la infiltración de lixiviados provenientes del antiguo tiradero municipal. Sin embargo, el efecto de la infiltración de lixiviados sobre la calidad del agua subterránea podría ser observable si se construyeran pozos más cercanos al tiradero, ya que para el presente estudio solo se trabajó con los pozos existentes y no se construyeron pozos especiales de monitoreo. Cabe mencionar que no existe un consenso internacional sobre que parámetros medir para evaluar la afectación de la calidad del agua subterránea por lixiviados provenientes de tiraderos (Tremblay et al. 2014). Se desconocen las causas exactas por las cuales no se observaron afectaciones al agua subterránea por parte de los lixiviados, ya que debido al medio geológico (arenas y basaltos fracturados) y a la presencia de fallas, era de esperarse que en la dirección de flujo los sitios cercanos mostraran alteraciones, como había sido documentado en estudio previos (Israde-Alcántara et al. 2005; Verduzco 2010). La explicación apunta a que las arcillas ubicadas bajo el tiradero y en su periferia están reteniendo y con ello retardando el impacto de los contaminantes sobre el agua subterránea.

La revisión bibliográfica mostró que los parámetros más usados para clasificar los flujos son la temperatura, los sólidos disueltos totales y la profundidad. En los trabajos donde se clasificó puntualmente el tipo de flujo se mostró que variaban los rangos de temperatura, sólidos disueltos totales y profundidad. Por lo cual se propusieron rangos para caracterizar los flujos. Estos rangos fueron la base para generar un índice de flujo que permite una clasificación. En la mayoría de los casos se obtuvieron resultados similares al comparar la clasificación de flujo de los diferentes autores respecto al IF. Los

resultados obtenidos en la presente investigación demostraron que el IF puede ser usado como un criterio general para clasificar los flujos en cualquier tipo de acuífero partiendo de parámetros que son comúnmente medidos (temperatura, sólidos disueltos totales y profundidad). En la zona Morelia-Capula los IF muestran una tendencia de incremento del oeste y sur hacia el noreste, lo cual concuerda con las suposiciones de estudios previos que señalan al cerro del Águila y los volcanes Las Tetillas y El Quinceo como zonas de recarga. En la zona ubicada en el paleolago se presentan manantiales con flujos locales, los cuales coexisten con pozos profundos que extraen líquido de flujos intermedios, tal es el caso de los sitios 29 (pozo) y 36 (manantial), ubicados a unos cuantos metros uno del otro. La coexistencia de flujos locales e intermedios es un argumento que fortalece el modelo conceptual de la zona Morelia-Capula en el cual se contemplan dos acuíferos, donde el contacto entre ambos favorece la presencia de manantiales. La caracterización hidrogeológica, vista desde la perspectiva de los sistemas de flujo, muestra que la zona de estudio es de tránsito y descarga. Se observó que en los sitios donde los pozos son más antiguos u operan más horas al día, los IF tienden a ser mayores, tal es el caso de las cercanías a Morelia y de las zonas altamente pobladas (como Villa Magna y Villas del Pedregal) respectivamente.

En la zona de estudio la profundidad del agua ha pasado de un aproximado de 30 m en el año 1994 a un promedio de 74.63 m en el año 2015, presentando un abatimiento promedio de 2.13 m/año. El abatimiento es diferencial, en algunos pozos puede alcanzar más de 10 m/año. El rápido abatimiento de la superficie piezométrica pone a la zona de estudio en una potencial inseguridad hídrica en los próximos años.

La modelación matemática del sistema acuífero de la zona Morelia-Capula muestra que existe una tendencia de abatimiento de los niveles piezométricos. El descenso de los niveles piezométricos inicia en las zonas con mayor densidad de pozos (Villas del Pedregal y cercanías a Morelia) y posteriormente tiende a extenderse hacia el oeste. Entre Capula y Tacícuaro se observa que la zona presenta poco abatimiento de la superficie piezométrica en comparación con el resto de la zona de estudio. La modelación muestra que entre el año 2022 y 2030 en algunos sitios la superficie piezométrica se ubicará a 1800 msnm, quedando por debajo de la profundidad de perforación de ciertos pozos (200 m). Para el final de periodo de modelación (del año 2034 al 2038), en los sitios con mayor demanda de agua subterránea (Villas del Pedregal y cercanías a Morelia), el nivel piezométrico se ubicará hasta en 1700 msnm (a 250 m de profundidad), por lo que se recomienda que los nuevos pozos sean construidos a profundidades de 400 m. Es importante tener en cuenta que la zona Morelia-Capula continuará presentando un crecimiento demográfico, por lo que la demanda de agua subterránea seguirá en aumento, y los nuevos pozos ocasionarán mayores abatimientos de la superficie piezométrica.

La clasificación de los sitios mediante el IF y la modelación matemática del año 2015 fueron congruentes, ya que en los sitios con mayores abatimientos de la superficie piezométrica los IF fueron más altos.

El análisis químico y fisicoquímico del agua subterránea, en conjunto con el estudio hidrogeológico (interpretación de piezometría, pruebas de bombeo, definición de unidades hidrogeológicas) y la modelación, permitieron identificar la dinámica del sistema acuífero ubicado al poniente de Morelia. Mostrando que la tendencia de flujo va de Capula a Morelia, con alteraciones puntuales asociadas a conos de abatimiento en los sitios con alta demanda de agua subterránea.

RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos de investigación en la zona Morelia-Capula se recomienda:

- Continuar con el monitoreo de lixiviados en los pozos de abastecimiento ubicados en las cercanías del antiguo tiradero municipal, para asegurarse de que no haya riesgo para la población por el consumo de aguas subterráneas contaminadas.
- Construir piezómetros para el monitoreo de lixiviados en puntos cercanos al antiguo tiradero municipal (a menos de 500 m), buscando un mayor control del monitoreo de la potencial pluma contaminante.
- Profundizar en el estudio de la geología estructural, para caracterizar a detalle las fallas y fracturas y mejorar el entendimiento de su interacción con el sistema acuífero.
- Realizar sondeos geofísicos para profundizar en el conocimiento de la geología del subsuelo, y definir a mayor detalle la geometría de las unidades hidrogeológicas.
- Hacer pruebas de bombeo en los sitios donde no se tienen datos, buscando caracterizar la distribución espacial de las propiedades hidrogeológicas del acuífero.
- Hacer estudios hidrológicos que permitan cuantificar la infiltración de agua de lluvia en la zona de estudio.
- Hacer actualizaciones del modelo matemático cuando se tengan avances considerables en el conocimiento hidrogeológico del sistema acuífero.

REFERENCIAS

- Aderemi, A.O. et al., 2011. Assessment of groundwater contamination by leachate near a municipal solid waste landfill. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5(11), pp.933–940.
- Al-Adamat, R.A.N., Foster, I.D.L. & Baban, S.M.J., 2003. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. *Applied Geography*, 23(4), pp.303–324.
- Amato, S.D. & Silva Busso, A., 2006. Stratigraphy and hydrochemistry of Pampeano and Puelches aquifers in northeastern Buenos Aires Province. Relaciones estratigráficas e hidroquímicas de los acuíferos Pampeano y Puelches en el noreste de la provincia de Buenos Aires. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales (1999)*, 8(1), pp.9–26.
- Ávila, O.J.A. & Garduño, M.V.H., 2007. Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuífero de Morelia. *Ciencia Nicolaita*, 46, pp.105–122.
- Azzaz, H. et al., 2008. The use of environmental isotopic and hydrochemical tracers to characterize the functioning of karst systems in the Tlemcen Mountains, northwest Algeria. *Hydrogeology Journal*, 16(3), pp.531–546.
- Bernache, P.G., 2012. Riesgo de contaminación por disposición final de residuos. Un estudio de la región Centro Occidente de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), pp.97–105.
- Bredehoeft, J., 2005. The conceptualization model problem - Surprise. *Hydrogeology Journal*, 13(1), pp.37–46.
- Buenrostro, D.O., 2004. Los tiraderos municipales y el impacto ambiental de los residuos sólidos en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. In V. H. Garduño Monroy, ed. *Contribuciones a la geología e impacto ambiental de Morelia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 89–105.

-
- Buenrostro, O. & Israde, I., 2003. La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(4), pp.161–169.
- Cardona, A. & Carrillo-Rivera, J.J., 2006. Hidrogeoquímica de sistemas de flujo intermedio que circulan por sedimentos continentales derivados de rocas riolíticas. *Ingeniería Hidráulica en México*, 21(3), pp.69–86.
- Cardona, B.A., Carrillo, R.J.J. & Armienta, H.M.A., 1993. Elemento traza: contaminación y valores de fondo en aguas subterráneas de San Luis Potosí, SLP, México. *Geofísica Internacional*, 32(2), pp.277–286. Available at: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/view/39516>.
- Carlón, A.T. & Mendoza, M.E., 2007. Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo. *Investigaciones Geográficas*, 63, pp.56–76.
- Carreón-Freyre, D. et al., 2005. Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(1), pp.1–18.
- Carreón Nieto, M. del C., 2014. *Valladolid/Morelia y sus ríos. Historia de un vínculo.*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carrillo-Rivera, J., Cardona, A. & Hergt, T., 2001. Inducción de agua termal profunda a zonas someras: Aguascalientes, México. *Hidrología*, 1(1), pp.41–53.
- Carrillo-Rivera, J.J. et al., 2007. Tracing groundwater flow systems with hydrogeochemistry in contrasting geological environments. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184(1–4), pp.77–103.
- Carrillo-Rivera, J.J. & Cardona, A., 2012. Groundwater Flow Systems and Their Response to Climate Change : A Need for a Water-System View Approach. *American Journal of Environmental Sciences*, 8(3), pp.220–235.

-
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A. & Moss, D., 1996. Importance of the vertical component of groundwater flow: A hydrogeochemical approach in the valley of San Luis Potosí, Mexico. *Journal of Hydrology*, 185(1–4), pp.23–44.
- Corona-Chávez, P. et al., 2006. Asimilación de xenolitos graníticos en el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato: el caso de Arócutin Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(2), pp.233–245.
- Cruz, F.T., 2008. *Contribución de la modelación numérica e hidroquímica al conocimiento de acuífero de la Aldea (Gran Canaria, Islas Canarias)*. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Tesis Doctoral.
- Dutton, A.R. & Mace, R.E., 2002. Evolución de los modelos numéricos de flujo de agua subterránea en el acuífero de Ogallala en Texas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(2), pp.107–120.
- Edmunds, W.M. & Smedley, P.L., 2000. Residence time indicators in groundwater: The East Midlands Triassic sandstone aquifer. *Applied Geochemistry*, 15(6), pp.737–752.
- Espinosa, L.M. del C. et al., 2010. Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de La Habana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(4), pp.313–325.
- Estrada, M.A.M., 2015. *Análisis hidroquímico, modelación de flujo e interpretación del comportamiento del agua subterránea que abastece a la zona de Morelia, Michoacán, México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Maestría.
- Fagundo-Castillo, J.R. et al., 2014. Caracterización de los flujos de agua subterránea a partir de su salinidad. *Ciencias del Agua*, 5(3), pp.63–80.
- Fernández, D.S., Puchulu, M.E. & Georgieff, S.M., 2014. Identification and assessment of water pollution as a consequence of a leachate plume

migration from a municipal landfill site (Tucumán, Argentina). *Environmental Geochemistry and Health*, 36(3), pp.489–503.

Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), pp.84–92.

Ferrari, L. et al., 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, pp.122–149. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>.

Filini, A., 2012. La cuenca de Cuitzeo , Michoacán : patrimonio arqueológico y ordenamiento territorial. In M. Bravo Espinosa et al., eds. *Contribuciones para el desarrollo sostenible dela cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán*. CIGA-UNAM, pp. 297–317.

Fraser, C., Roulet, N. & Lafleur, M., 2001. Groundwater flow patterns in a large peatland. *Journal of Hydrology*, 246, pp.142–154. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169401003626>.

Freeze, R.A., 1994. Henry Darcy and the Fountains of Dijon. *Groundwater*, 32(1), pp.23–30.

Garduño-Monroy, V.H. et al., 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(1), pp.37–54.

Garduño-Monroy, V.H. et al., 2009. Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica Internacional*, 48(3), pp.319–335.

Garduño-Monroy, V.H. et al., 2010. Unidades Geohidrológicas de la Región de Morelia-Cuitzeo. In *Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socio ambiental*. UNAM, pp. 66–69.

-
- Garduño, M.V.H. et al., 2014. Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio. In A. Vieyra & LarrazábalAlejandra, eds. *Urbanización, sociedad y medio ambiente. Experiencias en ciudades medias*. UNAM, pp. 197–222.
- Genereux, D.P. & Jordan, M., 2006. Interbasin groundwater flow and groundwater interaction with surface water in a lowland rainforest, Costa Rica: A review. *Journal of Hydrology*, 320(3–4), pp.385–399.
- Gleeson, T. et al., 2010. Groundwater sustainability strategies. *Nature Geoscience*, 3(6), pp.378–379. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo881>.
- Gómez-Puentes, F.J. et al., 2014. Geochemical processes controlling the groundwater transport of contaminants released by a dump in an arid region of México. *Environmental Earth Sciences*, 71(2), pp.609–621.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T. & Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), pp.227–283. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Petrog?nesis+?gnea+de+la+Faja+Volc?nica+Transmexicana#0>.
- Gomez, M.L. et al., 2009. Caracterización hidrogeoquímica e identificación de procesos de mezcla en un acuífero afectado por un vertedero municipal no controlado. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(3), pp.437–450.
- González-Abraham, A. et al., 2012. Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto , BCS , México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), pp.319–333.
- González, C. et al., 2011. Effect of Solid Wastes Composition and Confinement Time on Methane Production in a Dump. *Journal of Environmental Protection*, 2(10), pp.1310–1316. Available at: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/jep.2011.210>

González, H.R., Rodríguez, C.R. & Coronado, P.V., 2007. Atenuación natural en el acuífero Yucateco. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 23(1), pp.5–15.

González, R.C.A. & Buenrostro, D.O., 2012. Composición de residuos sólidos urbanos en dos sitios de disposición final. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), pp.13–18.

Harbaugh, A.W., 2005. *MODFLOW-2005, The U . S . Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process*, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6- A16,.

Hernández-Antonio, A. et al., 2015. Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: The case of Guadalajara (Mexico). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(9), pp.3937–3950.

Huizar-Alvarez, R. et al., 2004. Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City. *Hydrogeology Journal*, 12(4), pp.436–450.

Huizar-Alvarez, R. et al., 2016. The effects of water use on Tothian flow systems in the Mexico City conurbation determined from the geochemical and isotopic characteristics of groundwater. *Environmental Earth Sciences*, 75(13).

Huizar-Álvarez, R. et al., 2003. Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca – Zumpango sub-basin, central Mexico. *Environmental Geology*, 43, pp.385–399.

Huizar-Álvarez, R., Varela-González, G.G. & Jaramillo, M.E., 2014. Sistemas de flujo subterráneo y contenido de fluoruro en el agua de Tenextepango, Morelos, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(2), pp.238–247.

IHOBE, 2006. *Guía técnica para la aplicación de modelos informáticos para el*

transporte y el flujo de contaminantes en el agua subterránea, Sociedad Pública de Gestión Ambiental IHOBE. Gobierno Vasco.

Israde-Alcántara, I. et al., 2004. Caracterización geológico-ambiental del tiradero de Morelia y su relación con las poblaciones del entorno. In V. H. Garduño Monroy, ed. *Contribuciones a la geología e impacto ambiental de Morelia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 137–155.

Israde-Alcántara, I. et al., 2009. Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(2), pp.203–211.

Israde-Alcántara, I., Buenrostro, D.O. & Carrillo, C.A., 2005. Geological characterization and environmental implications of the placement of the Morelia dump, Michoacan, central Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(6), pp.755–764.

Kanmani, S. & Gandhimathi, R., 2013. Assessment of heavy metal contamination in soil due to leachate migration from an open dumping site. *Appl Water Sci*, 3, pp.193–205.

Madrigal Equihua, P., 2005. *Calidad del agua de los pozos de abastecimiento de la ciudad de Morelia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Licenciatura.

Mahlknecht, J. et al., 2006. Geochemical and isotopic investigations on groundwater residence time and flow in the Independence Basin, Mexico. *Journal of Hydrology*, 324(1–4), pp.283–300.

Masoner, J.R. & Cozzarelli, I.M., 2015. Spatial and temporal migration of a landfill leachate plume in alluvium. *Water, Air, and Soil Pollution*, 226(2), pp.1–15.

Mazor, E. & George, R., 1992. Marine airborne salts applied to trace evapotranspiration, local recharge and lateral groundwater flow in Western Australia. *Journal of Hydrology*, 139(1–4), pp.63–77.

-
- McDonald, M.G. & Harbaugh, A.W., 2003. The history of MODFLOW. *Ground Water*, 41(2), pp.280–283.
- Medina, V.V.H., 2008. *Estudio geológico, geofísico e hidroquímico para generar un modelo conceptual del acuífero de Cuitzeo, Michoacán, México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Maestría.
- Milosevic, N. et al., 2012. Identification of discharge zones and quantification of contaminant mass discharges into a local stream from a landfill in a heterogeneous geologic setting. *Journal of Hydrology*, 446–447, pp.13–23. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.012>.
- Molina, P.D., Cabrera, E.E. & Ramos, A.L.C., 2014. MODFLOW y AQÜIMPE: dos aproximaciones a la realidad. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 35(2), pp.107–122.
- Monreal, R. et al., 2011. Metodología para la definición de unidades hidroestratigráficas: caso del acuífero del valle del Río Yaqui, Sonora, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), pp.119–135.
- Moral Martos, F., Cruz San Julián, J.J. & Rodríguez Rodríguez, M., 2005. Sierra de Segura (Cordillera Bética). *Geogaceta*, 37, pp.83–86.
- Morales-Luis, R. et al., 2000. Dirección de flujo y clasificación del agua subterránea, en monte alegre, sierra del Ajusco, México. *Agrociencia*, 34, pp.677–687.
- Morán-Ramírez, J. et al., 2013. Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, aplicando modelación inversa: Caso huasteca potosina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), pp.71–82.
- Muhammad, A.M. et al., 2015. Evaluation of local groundwater vulnerability based on DRASTIC index method in Lahore, Pakistan. *Geofísica Internacional*, 54(1), pp.67–81. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gi.2015.04.003>.

Navarrete, L.R.E., 2004. *Riesgo por cadmio en un tiradero abandonado en el municipio de Sahuayo, Michoacán*. Universidad de Guadalajara. Tesis de Maestría. Available at: <http://148.202.105.18/websecgral/sites/archivos/acuerdo/2007acuerdorg01.pdf>

Nolan, J., Watts, S. & Proctor, B., 2014. A Case Study in the Use of 3-Dimensional Ground Water Modeling and Solute Transport Engines as a Tool in Site Assessment. *Environment and Pollution*, 3(2), pp.55–64. Available at: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/ep/article/view/33286>.

Ochoa-González, G.H. et al., 2015. Assessment of groundwater flow in volcanic faulted areas. A study case in Queretaro, Mexico. *Geofísica Internacional*, 54(3), pp.199–220. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016716915000197>.

Organista, M.R., 2017. *Estudio de calidad de agua subterránea y su relación con la salud pública de la región Capula-Cointzio*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Maestría.

Paces, J.B. et al., 2002. 234U/238U evidence for local recharge and patterns of groundwater flow in the vicinity of Yucca Mountain, Nevada, USA. *Applied Geochemistry*, 17(6), pp.751–779.

Peñuela, A.L.A. & Carrilo, R.J.J., 2013. Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geograficas*, 81, pp.18–32. Available at: <http://dx.doi.org/10.14350/rig.30518>.

Pérez, L.M.E. et al., 2002. Influencia del basurero municipal en la calidad del agua del acuífero de la ciudad de Durango, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 18(3), pp.111–116.

Polo, M. & Guevara, E., 2001. Contaminación de acuíferos por efecto de los

lixiviados en el área adyacente al vertedero de desechos sólidos la Guásima, Municipio Libertador, Estado Carabobo. *INGENIERÍA UC*, 8(2).

Ramos-Leal, J.A. et al., 2007. Evidencias hidrogeológicas de mezcla de flujos regionales en el acuífero de La Muralla, Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(3), pp.293–305.

Reyes-Gutiérrez, L.R. et al., 2013. Estudio geoelectrico e hidroquímico para mapear la pluma de lixiviados derivados de un basurero a cielo abierto en Mexicaltzingo, Estado de México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(3), pp.107–114.

Rodríguez-Pascua, M.A. et al., 2010. Estimation of the paleoepicentral area from the spatial gradient of deformation in lacustrine seismites (Tierras Blancas Basin, Mexico). *Quaternary International*, 219(1–2), pp.66–78.

Salazar, A.A. & Pineda, P.N., 2010. Factores que afectan la demanda de agua para uso doméstico en México. *Región y sociedad*, 22(49), pp.3–16.

Sánchez-Núñez, J.M. et al., 2008. Criterios ambientales y geológicos básicos para la propuesta de un relleno sanitario en Zinapécuaro, Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(3), pp.305–324.

Sánchez, S.H.U. & Urquijo, T.P.S., 2014. La expansión urbana en el suroriente de Morelia. Una revisión histórico-ambiental, 1885-2010. In A. Vieyra & L. Alejandra, eds. *Urbanización, Sociedad y Ambiente: Experiencias en Ciudades Medias*. UNAM, pp. 13–46.

Santamarta, T.J.C., 2013. *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos*. J. C. Santamarta Terezal, ed., Colegio de Ingenieros de Montes.

SEA, 2012. *Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA*, Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Gobierno de Chile.

Sunye-Puchol, I. et al., 2015. La Falla San Mateo: nuevas evidencias

paleosismológicas de fallamiento activo en el Graben de Acambay, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(3), pp.361–376.

Syafalni, S., Zawawi, M.H. & Abustan, I., 2014. Isotopic and hydrochemistry fingerprinting of leachate migration in shallow groundwater at controlled and uncontrolled landfill sites. *World Applied Sciences Journal*, 31(6), pp.1198–1206.

Tóth, J., 1963. A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins. *J.Geophys. Res.*, 68(16), pp.4785–4812.

Tremblay, L. et al., 2014. Conceptual model of leachate migration in a granular aquifer derived from the integration of multi-source characterization data (St-Lambert, Canada). *Hydrogeology Journal*, 22(3), pp.587–608. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-013-1065-1>.

Vaverková, M. & Adamcová, D., 2014. Evaluation of landfill pollution with special emphasis on heavy metals. *Journal of Ecological Engineering*, 15(2), pp.1–6.

Verduzco, C.L.A., 2010. *Evaluación de a contaminación al acuífero en la región Morelia-Capula causada por el impacto de la infiltracion de lixiviados generados por el basurero municipal de la ciudad de Morelia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Maestría.

La Vigna, F., Demiray, Z. & Mazza, R., 2014. Exploring the use of alternative groundwater models to understand the hydrogeological flow processes in an alluvial context (Tiber River, Rome, Italy). *Environmental Earth Sciences*, 71(3), pp.1115–1121.

Voss, C.I., 2011a. Editor's message: Groundwater modeling fantasies-part 2, down to earth. *Hydrogeology Journal*, 19(8), pp.1455–1458.

Voss, C.I., 2011b. Editor's message: Groundwater modeling fantasies -part 1, adrift in the details. *Hydrogeology Journal*, 19(7), pp.1281–1284.

Wang, Y. et al., 2013. Prediction on contaminant migration in aquifer of fractured granite substrata of landfill. *Journal of Central South University*, 20(11), pp.3193–3201. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11771-013-1844-9>.

Winston, R.B., 2009. Modelmuse-A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST. In *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A29*. United States Geological Survey (USGS), p. 52.

Xiao-Dong, L. et al., 2010. The use of environmental isotopic (C, Sr, S) and hydrochemical tracers to characterize anthropogenic effects on karst groundwater quality: A case study of the Shuicheng Basin, SW China. *Applied Geochemistry*, 25(12), pp.1924–1936. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.10.008>.

ANEXOS

Coordenadas de los sitios de estudio

Tabla A.1 Coordenadas de los sitios de estudio.

Sitio	ID	ID CONAGUA	Coordenadas		
			x	y	z
23 de Marzo	1	CNA-02-053-099	264484	2180210	1948
La Esperanza	2	CNA-02-053-102	263721	2180049	1956
Ricardo Flores Magon	3	CNA 02-053-100	264024	2180412	1967
San Isidro Itzicuaró	4	CNA 02-053-104	262234	2179657	1944
San José Itzicuaró	5	CNA 02-053-107	259141	2178505	1958
Arko San Antonio	6	CNA 02-053-090	262047	2176457	1908
Mariano Abasolo	7	CNA 02-053-089	263476	2178569	1888
Tzindurio Sarh	8	CNA 02-053-088	264527	2178950	1894
San Juanito Itzicuaró	9	CNA 02-053-087	264126	2179396	1915
Ario de 1815	10	CNA-02-053-105	261341	2179876	2004
Gas del Lago	11		254926	2178350	2031
Villa Magna 3	12		256265	2177106	2007
Villas del Pedregal 1	13	CNA-02-078-156	258819	2177995	1948
Villas del Pedregal 3	14	CNA-02-078-155	257959	2177257	1970
Ignacio Allende	15	CNA 02-053-091	260923	2178311	1927
Residencial Tinijaro	16	CNA 02-053-103	263359	2179601	1919
Heroes Republicanos	17	CNA 02-053-106	261437	2179218	1940
Arko San Juan	18		260140	2178681	1958
La Hacienda 1	19	CNA-02-078-157	257340	2177682	1968
Capula 2	20	CNA-02-053-177	250134	2177013	2090
Tacícuaró	21	CNA-02-078-139	252520	2177020	2082
Cuto de la Esperanza	22	CNA 02-053-135	255177	2183510	2136
La Maestranza	23	CNA 02-053-150	255484	2178381	2026
Río Florido	24	CNA-02-078-131	261456	2177821	1902
Rancho Nuevo	25		258294	2178246	1952
El Cerrito Itzicuaró	26	CNA 02-053-154	260759	2176490	1909
Manantial La Mintzita	27		261445	2173803	1893
Pozo La Mintzita	28		262003	2174586	1891

Hacienda Itzicuario	29		260875	2177467	1897
Manantial Balneario Cointzio	30		261524	2173179	1898
San Nicolás Obispo	31	CNA 02-053-138	256696	2175626	1981
Cuanajillo	32	CNA-02-078-137	256216	2175506	1995
Manantial Sn. Lorenzo Itzicuario	33		261723	2178245	1899
Manantial El Parial	34		262200	2178689	1902
Manantial Tinijaro	35		263221	2179153	1907
Manantial Hacienda Itzicuario	36		260886	2177465	1903
Lixiviados relleno sanitario	L1		253408	2179155	2068
Lixiviados tiradero	L2		253898	2179107	2070
CRISOBA	37		262165	2173824	1986
Tanganxoan	38		260519	2178725	1945
Las Garzas	39		257794	2178331	1967
Pozo de monitoreo	40		254800	2178250	2030
La Concepción	41		258056	2179364	2028
INIRENA	42		264154	2178807	1958
El potrero	43		262011	2177933	1896
Villas del pedregal 2	44		<u>258241</u>	<u>2178080</u>	<u>1954</u>
Villas del pedregal 4	45		<u>258440</u>	<u>2176891</u>	<u>1960</u>
Villas del pedregal 5	46		<u>257874</u>	<u>2176558</u>	<u>1979</u>
Capula 1	47		<u>249057</u>	<u>2177362</u>	<u>2101</u>

Análisis fisicoquímicos y químicos de las muestras de agua subterránea

Tabla A.2 Análisis fisicoquímicos del primer muestreo.

ID	OD	pH	Temperatura	Conductividad	P. redox	SDT
	mg/L		°C	µS/cm	mV	ppm
1	4.00	7.42	31.17	500.00	201.30	288.42
2	4.03	7.63	26.00	360.00	97.60	128.55
3	4.12	7.72	25.50	203.00	122.00	153.94
4	3.05	7.52	28.50	247.00	134.20	176.99
5	4.10	8.14	24.00	289.00	176.90	209.74
6	3.91	7.40	26.60	680.00	439.20	574.98
7	2.40	7.35	22.50	431.00	292.80	367.74
8	3.90	7.61	26.30	254.00	176.90	214.69
9	3.80	7.11	29.70	832.00	457.50	676.01
10	3.57	7.27	26.50	820.00	378.20	544.13
11	2.10	8.09	25.00	422.00	213.50	268.96
12	2.10	7.95	25.80	256.00	195.20	226.08
13	2.98	7.75	23.50	245.00	128.10	168.60
14	2.03	7.78	24.50	230.00	128.10	164.21
15	3.02	7.98	24.50	285.00	176.90	216.45
16	3.97	7.74	24.00	228.00	140.30	174.34
17	4.12	7.74	24.00	396.00	140.30	257.78
18	4.15	7.96	24.50	253.00	146.40	192.35
19	3.47	7.63	23.50	194.00	140.30	178.71
20	1.73	7.99	22.50	228.00	158.60	193.43
21	3.62	7.98	24.00	318.00	219.60	259.44
22	3.17	8.07	22.50	206.00	134.20	165.46
23	4.38	7.89	22.00	285.00	152.50	194.04
24	1.85	7.49	23.50	211.00	164.70	193.79
25	3.69	7.84	24.00	275.00	146.40	184.26
26	3.49	7.12	29.00	975.00	414.80	604.40
27	4.45	7.46	20.00	166.00	97.60	147.28
28	3.56	7.52	21.00	204.00	97.60	147.04
29	4.50	7.67	24.00	497.00	164.70	203.87
30	2.12	6.08	32.50	584.00	353.80	411.27
31	4.05	7.75	25.00	185.00	103.70	130.99
32	4.07	7.35	21.50	189.00	115.90	163.72
33	5.20	7.53	21.00	368.00	164.70	261.76
34	5.20	7.55	21.00	372.00	170.80	309.04
35	4.60	7.52	20.70	298.00	134.20	292.49
36	4.90	7.15	20.82	359.00	146.40	328.62
LMP	-	6.5-8.5	-	-	-	1000.00

Tabla A.3 Iones mayores y menores del primer muestreo.

ID	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na	Balance
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%
1	0.21	31.43	0.41	<LC	1.90	<LC	6.56	181.17	15.68	5.98	0.58	44.50	-11.27
2	0.23	16.89	<LC	<LC	2.94	<LC	4.38	87.84	4.16	1.86	0.29	9.96	-44.14
3	0.34	3.50	<LC	<LC	4.16	<LC	2.58	109.80	7.76	3.65	0.50	21.65	-10.74
4	0.23	6.78	<LC	<LC	4.08	<LC	3.73	120.78	11.24	5.89	0.69	23.58	-5.38
5	0.24	2.69	<LC	<LC	4.40	<LC	1.98	159.21	11.39	10.91	0.80	18.12	-10.53
6	0.28	46.52	0.41	<LC	0.49	<LC	13.55	395.28	32.35	11.73	0.90	73.48	-16.59
7	0.22	13.37	<LC	<LC	2.10	<LC	18.98	263.52	23.87	17.25	1.18	27.24	-14.64
8	0.15	2.83	<LC	<LC	2.71	<LC	4.49	159.21	14.72	8.02	0.81	21.74	-9.13
9	0.16	104.76	0.71	<LC	1.83	<LC	14.16	411.75	28.59	7.63	0.83	105.60	-20.24
10	0.15	67.78	0.63	<LC	0.53	<LC	13.41	340.38	26.37	5.91	0.72	88.25	-15.92
11	0.16	9.83	<LC	<LC	8.55	<LC	3.85	192.15	14.34	13.82	0.87	25.39	-10.16
12	0.28	3.72	<LC	<LC	1.84	0.47	1.31	175.68	7.72	7.43	0.97	26.67	-16.94
13	0.25	3.88	<LC	<LC	5.64	<LC	2.68	115.29	11.48	10.41	0.85	18.13	1.84
14	0.27	3.20	<LC	<LC	3.72	<LC	1.98	115.29	9.30	8.64	0.82	20.98	0.30
15	0.20	1.75	<LC	<LC	3.02	<LC	2.10	159.21	16.37	11.61	0.80	21.40	-0.70
16	0.27	2.34	<LC	<LC	6.02	<LC	2.36	126.27	11.21	5.26	0.75	19.87	-10.08
17	0.22	30.68	0.39	<LC	17.28	<LC	15.69	126.27	11.25	10.25	0.52	45.24	-2.52
18	0.24	5.27	<LC	<LC	7.78	<LC	4.49	131.76	12.58	10.10	0.92	19.21	-4.58
19	0.27	3.14	<LC	<LC	7.84	<LC	3.64	126.27	12.97	9.04	0.76	14.79	-7.26
20	0.33	2.17	<LC	<LC	0.94	0.48	7.89	142.74	9.21	9.62	0.68	19.37	-10.64
21	0.21	2.31	<LC	<LC	<l.c.	<LC	2.71	197.64	11.87	13.29	0.85	30.56	-5.23
22	0.21	1.34	<LC	<LC	4.11	<LC	2.63	120.78	14.28	8.19	0.56	13.36	-4.06
23	0.23	4.28	<LC	<LC	6.57	<LC	3.24	137.25	11.49	10.45	0.89	19.65	-5.05
24	0.27	3.49	<LC	<LC	1.56	<LC	1.98	148.23	8.63	6.58	0.76	22.30	-14.16
25	0.19	4.11	<LC	<LC	5.17	<LC	1.78	131.76	10.56	10.50	0.84	19.35	-3.27
26	0.24	75.99	<LC	<LC	<l.c.	<LC	14.95	373.32	20.24	10.22	0.74	108.70	-13.10
27	0.14	8.83	<LC	<LC	12.74	<LC	7.20	87.84	10.59	9.55	0.45	9.93	-7.71
28	0.10	5.53	<LC	<LC	13.09	<LC	6.34	87.84	11.55	10.35	0.53	11.72	0.18
29	0.20	4.31	<LC	<LC	<l.c.	<LC	4.81	148.23	11.66	10.61	0.74	23.31	-3.38
30	<LC	1.90	<LC	<LC	<l.c.	<LC	0.91	318.42	30.11	19.78	0.73	39.42	-4.22
31	0.23	2.22	<LC	<LC	3.46	<LC	1.30	93.33	7.96	7.30	0.52	14.66	-1.15
32	0.18	2.83	<LC	<LC	16.54	<LC	6.52	104.31	11.17	9.42	0.47	12.27	-7.92
33	0.15	9.64	<LC	<LC	20.81	<LC	15.71	148.23	21.68	16.45	0.71	28.38	4.48
34	0.21	26.63	<LC	<LC	32.89	<LC	26.08	153.72	17.24	13.61	0.54	38.13	-8.78
35	0.18	15.41	<LC	<LC	60.26	<LC	38.50	120.78	19.58	15.86	0.58	21.33	-13.11
36	0.18	17.76	<LC	<LC	65.70	<LC	46.89	131.76	27.83	19.03	0.83	18.63	-10.84
LC	0.05	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	0.25	6.10	0.17	0.29	0.80	1.16	-
LMP	1.50	250.00	1.00	-	10.00	-	400.00	-	-	-	-	200.00	-

Tabla A.4 Elementos traza del primer muestreo.

ID	Al	As	Ba	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	-	<LC	-	<LC	<LC	0.014	<LC	0.011	<LC
2	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
3	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
4	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
5	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
6	-	0.020	-	<LC	<LC	0.029	0.004	<LC	<LC
7	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	0.003	<LC	<LC
8	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
9	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	0.007	<LC	<LC
10	-	<LC	-	<LC	<LC	0.050	0.005	<LC	<LC
11	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
12	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	0.046	<LC	<LC
13	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
14	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	0.020	0.014	<LC
15	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
16	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
17	-	<LC	-	<LC	<LC	0.027	<LC	<LC	<LC
18	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	0.015	<LC
19	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	0.010	<LC
20	-	0.038	-	<LC	<LC	0.046	0.048	0.011	<LC
21	-	<LC	-	<LC	<LC	0.113	0.181	<LC	<LC
22	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
23	-	<LC	-	<LC	<LC	0.015	<LC	<LC	<LC
24	-	<LC	-	<LC	<LC	0.011	0.005	<LC	<LC
25	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
26	-	<LC	-	<LC	<LC	0.243	0.220	<LC	<LC
27	-	<LC	-	<LC	<LC	0.038	<LC	<LC	<LC
28	-	<LC	-	<LC	<LC	0.033	<LC	<LC	<LC
29	-	<LC	-	<LC	<LC	0.064	0.092	<LC	<LC
30	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
31	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
32	-	<LC	-	<LC	<LC	0.054	<LC	<LC	<LC
33	-	<LC	-	<LC	<LC	0.019	<LC	<LC	<LC
34	-	<LC	-	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC
35	-	<LC	-	<LC	<LC	0.017	<LC	<LC	<LC
36	-	<LC	-	<LC	<LC	0.026	0.004	<LC	<LC
LC	-	0.017	-	0.010	0.010	0.010	0.003	0.010	0.010
LMP	0.020	0.050	0.700	0.005	2.000	0.300	0.150	0.010	5.000

Tabla A.5 Análisis fisicoquímicos del segundo muestreo.

ID	OD	pH	Temperatura	Conductividad	P. redox	SDT
	mg/L		°C	µS/cm	mV	Ppm
1	2.63	7.16	28	506	177	349.41
2	2.79	7.65	28.5	402	108	294.74
3	3.8	7.77	24	209	149	196.19
4	4.4	7	27.5	256	127	223.19
5	4.01	8.43	22.5	268	205	223.20
6	3.4	7.43	26.5	763	116	584.35
7	2.62	7.49	22.5	455	168	359.09
8	2.99	7.73	24	270	236	219.42
9	1	6.75	30	756	190	598.45
10	1.66	7.18	28	875	55	607.90
11	2.9	8.17	24.5	460	152	244.98
12	1.93	7.85	25	268	196	232.60
13	2.62	7.74	24.5	263	191	194.77
14	1.08	7.65	25.5	250	206	197.04
15	2.83	7.7	22.5	337	196	274.06
16	3.14	7.42	24	240	310	180.24
17	3.07	7.75	22	413	216	299.61
18	2.93	7.8	23	274	210	230.56
19	-	-	-	-	-	-
20	0.2	7.79	22.8	240	-36	193.06
21	1.05	7.9	23.5	328	-70	273.62
22	2.46	8.02	23	220	186	166.41
23	1.93	7.65	22	260	205	214.55
24	0.77	7.48	24	242	197	199.83
25	4.11	7.89	26.5	255	193	220.05
26	1.7	6.76	29	827	13	598.45
27	6.24	7.25	20.2	187	227	144.84
28	3.69	7.42	21	193	168	159.38
29	2.61	7.53	24.4	288	81	231.01
30	1.98	5.79	31.6	558	260	424.96
31	1.83	7.64	24.5	200	220	148.15
32	3.37	7.53	22	207	216	180.62
33	6.12	7.28	22	387	196	297.25
34	6.13	7.28	21.2	446	188	327.05
35	5	7.42	21	391	211	292.06
36	4.44	7	24.5	488	203	372.33
LMP	-	6.5-8.5	-	-	-	1000.00

Tabla A.6 Iones mayores y menores del segundo muestreo.

ID	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na	Balance
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	%
1	0.22	26.96	<LC	<LC	3.43	0.30	6.24	214.11	18.5	6.482	7.647	65.57	0.28
2	0.21	17.20	<LC	<LC	3.03	0.28	5.08	185.56	17.2	6.866	6.663	52.67	2.40
3	0.27	3.52	<LC	<LC	4.25	0.69	2.89	135.60	9.90	3.810	4.766	30.50	-4.86
4	0.19	6.30	<LC	<LC	4.03	0.25	3.96	148.23	13.9	6.422	7.036	32.88	1.06
5	0.23	4.34	<LC	<LC	9.28	<LC	4.90	148.23	15.41	12.08	7.48	21.25	1.10
6	0.29	49.42	<LC	<LC	1.44	<LC	25.55	338.51	42.65	12.73	11.76	102.00	2.59
7	0.17	12.37	<LC	<LC	2.37	<LC	17.63	223.22	33.57	18.74	14.99	36.02	7.77
8	0.22	3.32	<LC	<LC	3.67	<LC	5.44	142.74	19.02	7.54	9.38	28.10	7.34
9	0.15	87.20	<LC	<LC	2.36	<LC	15.58	322.04	32.39	7.37	10.57	120.80	-2.28
10	0.17	61.81	<LC	<LC	0.72	<LC	11.92	0.00	30.19	6.01	7.97	103.00	-11.02
11	0.14	4.48	<LC	<LC	2.54	0.14	2.34	170.19	11.9	10.311	8.551	34.41	2.24
12	0.24	4.17	<LC	<LC	1.48	<LC	1.54	162.83	9.49	6.91	11.36	34.58	-0.33
13	0.24	4.10	<LC	<LC	5.93	<LC	2.97	129.02	14.40	10.12	8.35	19.64	4.35
14	0.24	3.87	<LC	<LC	3.14	<LC	2.04	131.76	11.00	7.13	9.63	28.23	4.72
15	0.25	4.02	<LC	<LC	8.52	<LC	7.72	179.30	24.91	13.80	7.52	28.02	5.95
16	0.08	4.29	<LC	<LC	6.60	0.18	4.10	115.29	12.3	5.262	6.896	25.28	2.39
17	0.18	31.44	<LC	<LC	15.92	0.09	16.70	153.72	13.3	10.587	4.186	53.48	-0.69
18	0.26	5.57	<LC	<LC	12.77	<LC	8.24	142.74	18.45	11.01	8.66	22.87	2.61
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00
20	0.32	2.38	<LC	<LC	2.65	0.61	7.97	128.08	11.57	9.60	6.39	23.48	2.82
21	0.29	3.29	<LC	<LC	0.30	0.97	4.37	192.15	13.63	12.74	9.15	36.73	2.53
22	0.19	1.77	<LC	<LC	7.62	0.02	3.81	109.80	15.0	7.731	4.356	16.09	3.13
23	0.24	5.08	<LC	<LC	8.47	<LC	3.39	139.06	15.32	10.23	9.49	23.26	3.96
24	0.20	3.80	<LC	<LC	2.60	<LC	2.21	137.25	11.92	6.83	8.10	26.92	1.59
25	0.26	4.21	<LC	<LC	5.81	<LC	2.25	150.04	13.94	10.55	9.46	23.54	1.75
26	0.24	67.45	<LC	<LC	0.98	0.29	16.94	340.38	21.3	10.627	8.281	132.00	0.11
27	0.18	2.98	<LC	<LC	13.49	0.13	6.78	87.84	11.0	8.894	2.815	10.74	-2.07
28	0.18	3.25	<LC	<LC	13.92	0.28	6.88	97.17	12.4	9.396	3.245	12.71	-1.10
29	0.26	4.19	<LC	<LC	0.18	0.55	4.44	160.86	12.9	11.081	6.571	29.98	2.49
30	0.16	2.55	<LC	<LC	0.68	0.00	1.45	307.44	32.5	21.222	7.730	51.20	5.78
31	0.26	1.99	<LC	<LC	2.63	0.00	1.66	98.82	9.60	8.319	4.253	20.61	10.21
32	0.19	3.17	<LC	<LC	16.98	<LC	7.66	109.80	15.29	9.58	3.79	14.16	-1.49
33	0.22	17.09	<LC	<LC	35.66	0.00	28.60	133.41	25.35	16.305	6.661	33.95	4.96
34	0.24	24.53	<LC	<LC	32.09	0.00	26.69	150.98	21.70	15.317	5.324	50.19	4.60
35	0.25	11.20	<LC	<LC	41.71	0.00	30.52	130.11	25.11	17.447	5.005	30.71	4.83
36	0.21	18.41	<LC	<LC	47.93	0.67	39.25	170.19	36.91	22.397	8.957	27.41	1.74
LC	0.05	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	0.25	6.10	0.17	0.29	0.80	1.16	-
LMP	1.50	250.00	1.00	-	10.00	-	400.00	-	-	-	-	200.00	-

Tabla A.7 Elementos traza del segundo muestreo.

ID	Al	As	Ba	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm
1	<LC	0.029	0.0293	0.0012	<LC	0.021	0.0057	<LC	<LC
2	<LC	0.030	0.0328	0.0012	<LC	0.007	<LC	<LC	0.0141
3	<LC	0.031	0.0308	0.0013	<LC	0.004	<LC	<LC	<LC
4	<LC	0.030	0.0335	0.0012	<LC	0.005	<LC	<LC	0.0143
5	<LC	<LC	0.0336	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0.0238
6	<LC	<LC	0.0816	<LC	<LC	0.0242	<LC	<LC	0.0045
7	<LC	<LC	0.1622	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0.0032
8	<LC	<LC	0.0783	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0.0042
9	<LC	0.0156	0.0570	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0.0043
10	<LC	0.0138	0.0469	<LC	<LC	0.0923	0.0008	<LC	0.0014
11	<LC	0.025	0.0194	0.0012	<LC	0.017	0.0137	<LC	0.0059
12	<LC	<LC	0.0411	<LC	<LC	<LC	0.0105	<LC	0.0039
13	<LC	<LC	0.0602	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<l.c.
14	<LC	<LC	0.0633	<LC	<LC	<LC	0.0240	<LC	<l.c.
15	<LC	<LC	0.0747	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0.0134
16	<LC	0.025	0.0454	0.0013	<LC	0.003	<LC	<LC	0.0178
17	0.099	0.026	0.0237	0.0014	<LC	0.045	<LC	<LC	<LC
18	<LC	<LC	0.0639	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0.0015
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	<LC	<LC	0.0402	<LC	<LC	0.0831	0.0516	<LC	0.0019
21	<LC	<LC	0.0808	<LC	<LC	0.1397	0.1968	<LC	0.0051
22	<LC	0.025	0.0035	0.0013	<LC	0.004	<LC	<LC	<LC
23	<LC	<LC	0.0336	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<l.c.
24	<LC	<LC	0.0463	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0.0095
25	<LC	<LC	0.0389	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0.0042
26	<LC	0.032	0.0934	0.0012	<LC	0.274	0.2436	<LC	<LC
27	0.290	0.023	0.0139	0.0013	<LC	0.108	<LC	<LC	<LC
28	0.384	0.024	0.0170	0.0013	<LC	0.141	<LC	<LC	<LC
29	<LC	0.022	0.0443	0.0012	<LC	0.069	0.0971	<LC	<LC
30	<LC	0.027	0.0375	0.0013	<LC	0.009	<l.c.	<LC	<LC
31	<LC	0.021	0.0195	0.0013	<LC	0.009	0.0007	<LC	<LC
32	0.0514	<LC	0.0262	<LC	<LC	0.0111	<LC	<LC	0.0021
33	0.025	0.026	0.0397	0.0013	<LC	0.012	<LC	<LC	<LC
34	0.083	0.024	0.0374	0.0013	<LC	0.036	<LC	<LC	<LC
35	<LC	0.022	0.0272	0.0014	<LC	0.006	<LC	<LC	<LC
36	<LC	0.021	0.0675	0.0012	<LC	0.006	<LC	<LC	<LC
LC	0.0035	0.0052	0.0006	0.0002	0.0021	0.0008	0.0002	0.0038	0.0017
LMP	0.020	0.050	0.700	0.005	2.000	0.300	0.150	0.010	5.000

Aforos de los pozos incluidos en la modelación

Tabla A.8 Listado de pozos (activos) considerados en la modelación. Los valores subrayados indican valores aproximados.

Sitio	ID	Aforo (lt/s)
23 de Marzo	1	15
La Esperanza	2	25
Ricardo Flores Magon	3	27
San Isidro Itzicuaró	4	10
San José Itzicuaró	5	11.5
Arko San Antonio	6	12
Mariano Abasolo	7	20.8
Tzindurio Sarh	8	30
San Juanito Itzicuaró	9	21
Ario de 1815	10	6
Gas del Lago	11	<u>15</u>
Villa Magna 3	12	10
Villas del Pedregal 1	13	4
Villas del Pedregal 3	14	25
Ignacio Allende	15	4
Residencial Tinijaro	16	9
Heroes Republicanos	17	18.5
Arko San Juan	18	2
La Hacienda 1	19	<u>15</u>
Capula 2	20	16
Tacícuaró	21	13
Cuto de la Esperanza	22	<u>8</u>
La Maestranza	23	14.8
Río Florido	24	6
Rancho Nuevo	25	5
El Cerrito Itzicuaró	26	9
Pozo La Mintzita	28	<u>20</u>
Hacienda Itzicuaró	29	6.5
San Nicolás Obispo	31	9
Cuanajillo	32	8
Tanganxoan	38	2.5
La Concepción	41	7.5
INIRENA	42	7.5
El potrero	43	<u>11</u>
Villas del pedregal 2	44	<u>15.65</u>
Villas del pedregal 4	45	<u>21.15</u>
Villas del pedregal 5	46	<u>23.33</u>
Capula 1	47	<u>15</u>

Trabajos publicados y (o) aceptados

U.M.S.N.H. | Año 5 / Mayo - Junio / No. 27



¿Alguna vez se han detenido a pensar de dónde vienen y a dónde van las aguas subterráneas?

Poco valoradas pero muy presentes en nuestra vida cotidiana son las aguas subterráneas, para valorarlas tenemos que empezar por entender que nuestro "planeta azul" está cubierto en tres quintas partes de su superficie por agua. Sin embargo, solo el 2.5% del total de agua en el planeta es dulce. Al decir agua dulce indicamos que su contenido de sales es apto para el consumo humano.

Del total del agua dulce solo una pequeña parte está a nuestro alcance. El agua dulce del planeta se divide en glaciares (68.8%), subterráneas (30%), aguas superficiales y humedad de la atmósfera (0.4%), y suelos congelados llamados permafrost (0.8%).

Las aguas provenientes de glaciares solo están presentes en ciertas zonas del planeta. Las

aguas superficiales como los ríos y lagos, suelen estar tan contaminadas que no se pueden beber. La importancia de las aguas subterráneas radica en el hecho de que éstas se encuentran en casi cualquier lugar, además son limpias debido a los procesos naturales de filtración que se presentan durante su ingreso al subsuelo. A los lugares de donde se extrae agua subterránea se les denomina acuíferos. Entonces surge la primera pregunta

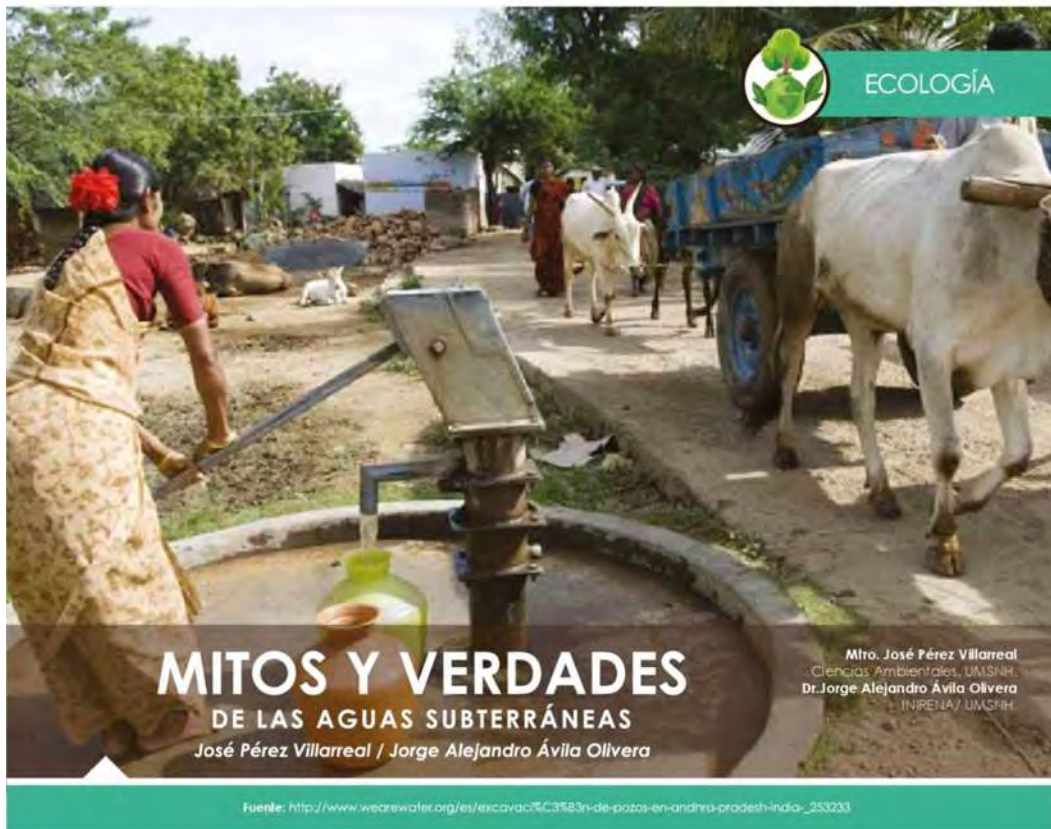
¿De dónde vienen las aguas subterráneas que alimentan a los acuíferos?

Las aguas que alimentan a los acuíferos pueden provenir de diferentes orígenes, como lo son el derretimiento de los glaciares, las lluvias, las infiltraciones de ríos y lagos, inclusive de otros acuíferos. Generalmente las lluvias son la fuente primaria que alimenta a los acuíferos. Una forma sencilla de entender un acuífero es considerando el ejemplo de un raspado, en el cual el hielo representaría al lugar de donde se extrae el agua (cuerpo rocoso ubicado en el subsuelo).

* *MC. José Pérez Villarreal*, es estudiante del Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en el Instituto de Investigación sobre los Recursos Naturales.

Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera es Profesor Investigador, del Instituto de Investigación sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Figura A1. Artículo de divulgación publicado en la revista Saber Más.



Un mito es una historia imaginaria que altera las verdaderas cualidades de una cosa. En este artículo hablaremos de los mitos en torno a uno de los recursos más importantes del planeta, el **agua subterránea**.

El agua subterránea es la que se obtiene del subsuelo, de rocas porosas y (o) porosas saturadas de agua. El agua subterránea es la principal fuente de líquido para millones de personas. Incluso en muchas partes del planeta se depende por completo del agua subterránea para satisfacer las necesidades del vital líquido. En México existe una gran necesidad de agua subterránea, particularmente en las zonas centro y norte del país, donde algunas ciudades dependen en su mayor parte del suministro de líquido extraído del subsuelo. Algunas ciudades como

Aguascalientes, San Luis Potosí y Querétaro surten alrededor del 90% de su necesidad de líquido con agua subterránea. Es así que el agua subterránea se convierte en un elemento vital para la existencia del ser humano. Siendo un recurso sumamente importante, es muy común observar que en torno al agua subterránea existen una serie de mitos. Profundizar en torno a los mitos sobre el agua subterránea nos permite entenderla y con ello valorar y cuidar este importante recurso.

Figura A2. Artículo de divulgación publicado en el libro del Programa de Lectura Científica editado por SICDET.

Ciudad de México, 24 de octubre de 2017

Estimado Dr. Jorge Alejandro Ávila Olvera,

He recibido los reportes (mismos que anexo con comentarios adicionales de mi parte) de nuestros revisores sobre su manuscrito "Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso zona Morelia-Capula, Michoacán", cuyos autores son José Pérez Villarreal, Jorge Alejandro Ávila Olivera e Isabel Israde Alcántara. Me es grato informarle que con base en éstos, he decidido aceptarlo para su publicación en el Boletín con correcciones menores.

Le mando un saludo cordial,

Dra. Graciela Herrera Zamarrón
Miembro del Comité Editorial,
Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana

Figura A3. Artículo técnico aceptado en el Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.