Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán

Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

DXVII REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "LERMA-SANTIAGO-PACÍFICO"

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE MICHOACÁN							
1602	MORELIA-QUERÉNDARO	286.7	127.8	193.326387	162.2	0.000000	-34.426387

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO (1602), ESTADO DE MICHOACÁN

México, D.F., diciembre de 2009

CONTENIDO

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1. Localización 2
1.2. Situación administrativa del acuífero 4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 5
3. FISIOGRAFÍA 8
3.1. Provincia fisiográfica 8
3.2. Clima 9
3.3. Hidrografía 10
3.4. Geomorfología 10
4. GEOLOGÍA 11
4.1. Estratigrafía 11
4.2. Geología estructural 13
4.3. Geología del subsuelo 14
5. HIDROGEOLOGÍA 15
5.1. Tipo de acuífero 15
5.2. Parámetros hidráulicos 16
5.3. Piezometría 16
5.4. Comportamiento hidráulico 17
5.4.1. Profundidad al nivel estático 17
5.4.2. Elevación del nivel estático 17
5.4.3. Evolución del nivel estático 18
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS 19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 20
7.1. Entradas 21
7.1.1. Recarga vertical 21
7.1.2. Recarga inducida 22
7.1.3. Entradas por flujo subterráneo horizontal 23
7.2. Salidas 24
7.2.1. Evapotranspiración 24
7.2.2. Bombeo 26
7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal 26
7.2.4. Descarga natural por manantiales 26
7.3. Cambio de almacenamiento 26
8. DISPONIBILIDAD 27
8.1. Recarga total media anual 27
8.2. Descarga natural comprometida 28
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas 28
8.4. Disponibilidad de agua subterránea 28
9. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS 29

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Morelia-Queréndaro, definido con la clave 1602 en el Sistema de Información geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 26’ y 20° 08’ de latitud norte y los meridianos 100° 38’ y 101° 29’ de longitud oeste, abarca una superficie aproximada de 3,510 km^2 (Figura 1).

Colinda al norte con los acuíferos Ciénega Prieta-Moroleón y Lago de Cuitzeo, del estado de Guanajuato, al poniente con los acuíferos Pastor Ortiz-La Piedad, Zacapu y Lagunillas-Pátzcuaro, al sur con Tacámbaro-Turicato y Huetamo y al oriente con los acuíferos, Ciudad Hidalgo-Tuxpan y Maravatio-Contepec-Epitacio Huerta, en el estado de Michoacán.

Geopolitamente abarca la totalidad de los municipios Cuitzeo, Huandacareo, Santa Ana Maya, Copandaro, Tarimbaro, Álvaro Obregón; de manera parcial los municipios de Morelos, Chucándaro, Morelia, Quiroga, Lagunillas, Acuitzio, Charo, Zinapécuaro, Queréndaro e Indaparapeo; y pequeñas porciones de los municipios de Pátzcuaro, Huiramba y Huaniqueo.

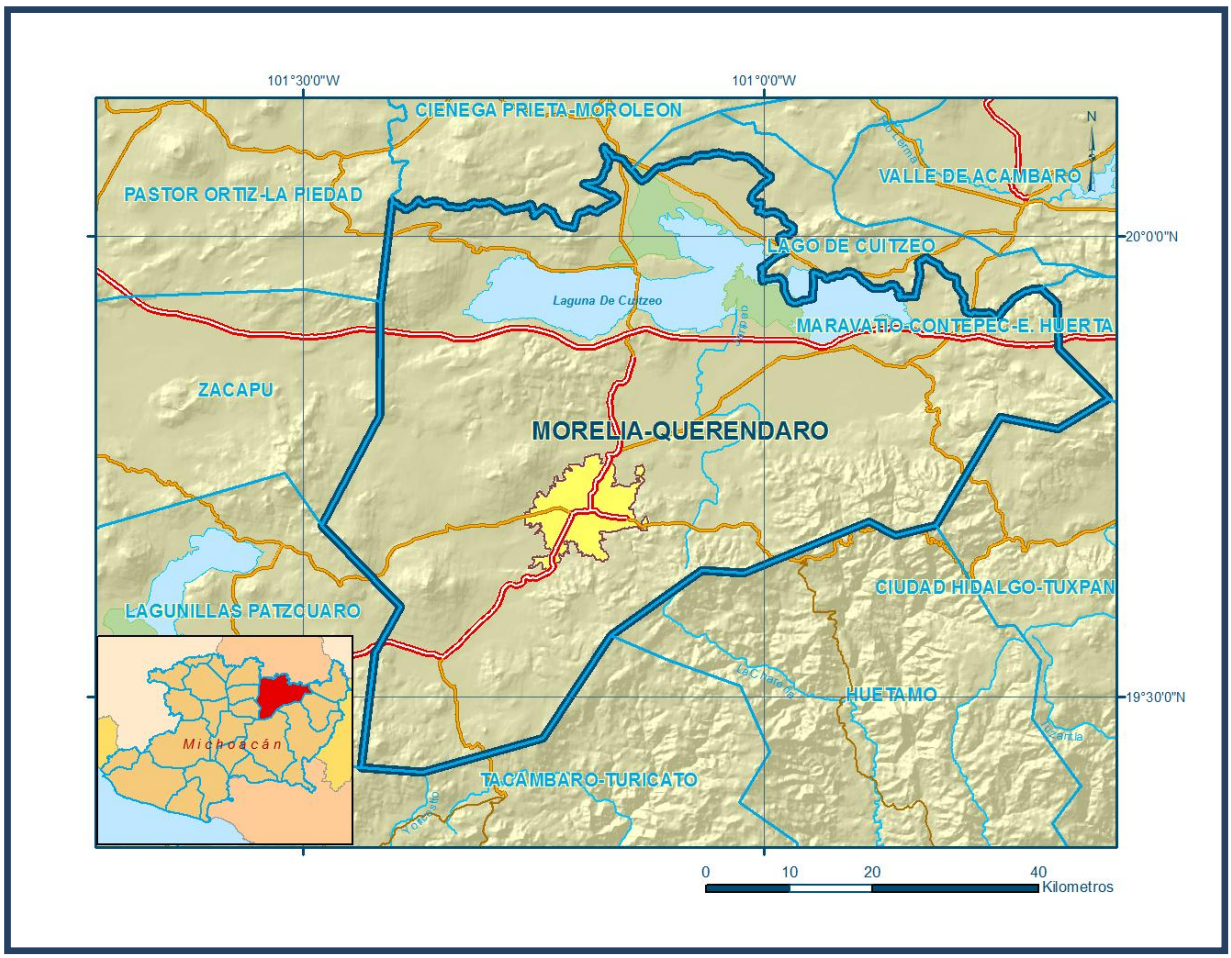


Figura 1. Localización del acuífero

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimita el acuífero

ACUÍFERO 1602 MORELIA-QUERÉNDARO

VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	42	2.1	19	56	36.2	
2	100	40	58.1	19	55	39.9	
3	100	40	49.5	19	52	45.2	
4	100	37	36.9	19	49	25.0	
5	100	40	53.0	19	47	26.3	
6	100	44	39.5	19	48	13.4	
7	100	48	50.0	19	41	12.7	
8	100	51	26.7	19	40	31.4	
9	100	53	12.6	19	41	27.2	
10	101	1	19.0	19	38	5.0	
11	101	4	3.4	19	38	17.0	
12	101	9	59.9	19	34	0.9	
13	101	14	25.0	19	27	19.5	
14	101	22	17.2	19	25	6.7	
15	101	26	15.4	19	25	25.4	
16	101	25	22.3	19	32	51.6	
17	101	23	42.7	19	35	50.9	
18	101	28	51.1	19	41	9.6	
19	101	25	5.2	19	48	19.2	
20	101	25	2.0	19	55	45.5	
21	101	24	12.9	20	2	21.3	DEL 21 AL 22 POR EL LÍMITE ESTATAL
22	101	8	40.2	20	4	22.8	DEL 22 AL 1 POR EL LÍMITE ESTATAL
1	100	42	2.1	19	56	36.2	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Michoacán. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de cuatro decretos. Al oriente por el "*Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de los terrenos que ocupa y circunda la Laguna de Los Azufres, en el Estado de Michoacán",* publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 13 de febrero de 1956*.*

El centro del acuífero por el "*Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende los municipios de Morelia y Charo, Mich*.", publicado en el DOF el 10 de febrero de 1964.

Al suroeste por el "*Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuífero en la zona del Bajo Balsas, estableciéndose veda por tiempo indefinido para la*

extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona", publicado en el DOF el 27 de junio de 1975.

El resto del acuífero por el *"Decreto por el que se declara de interés público la conservación de mantos acuíferos y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los municipios del estado de Michoacán"*, publicado en 20 de octubre de 1987. Tres decretos se clasifican como tipo III que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros y uno (Zona del Bajo Balsas) como tipo II que sólo permite extracciones para usos domésticos.

En el acuífero se localiza el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro; aún no se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2009, los principales municipios Morelia, Álvaro Obregón, Charo y Tarímbaro, se ubican en la zona de disponibilidad 5; Zinapécuaro de Figueroa, en la zona de disponibilidad 7; Cuitzeo del Porvenir, Queréndaro, Indaparapeo y Huandacareo, en la zona de disponibilidad 6; Acuitzio del Canje, en la zona de disponibilidad 9.

El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca (15) Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993, también pertenece a la Comisión de Cuenca (15C) Lago de Pátzcuaro, instalado el 18 de mayo de 2004.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero se han realizado ocho estudios, que van de los años 1977 a 2006. Algunos con información hidrogeológica, con el objetivo de evaluar las condiciones de disponibilidad de agua en la zona. A continuación se resume cada uno de ellos.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE MORELIA-QUERÉNDARO, MICHOACÁN (SARH, 1977). Este documento reporta la existencia de dos fuentes principales de agua subterránea, un acuífero granular y un acuífero basáltico. Espesores de 100 m en el valle de Morelia, de 300 m en la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro. Estimaron 21 Mm^3 de extracción de agua subterránea (pozos y norias), siendo el uso principal el de abastecimiento de agua potable. Los manantiales descargan un volumen anual del orden de 50 Mm^3.

En términos generales, el agua subterránea es de buena calidad, los sólidos disueltos totales tienen 800 ppm. Exceptuando el área inmediata a la laguna de Cuitzeo, registrándose contenidos entre 800 y más de 3,000 ppm. Realizaron 150 sondeos eléctricos verticales los cuales se integraron en 11 perfiles geoeléctricos. Muestrearon 184 aprovechamientos para análisis de calidad del agua. Llevaron a cabo 10 pruebas de bombeo.

ESTUDIO DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA Y ACTIVIDADES GEOLÓGICAS COMPLEMENTARIAS EN LA ZONA DE MORELIA-ÁLVARO OBREGÓN, MICHOACÁN (SARH, 1988). El estudio es una actualización del conocimiento geológico e hidrológico de los materiales del subsuelo con posibilidades de construir acuíferos susceptibles de explotación, mediante 50 sondeos eléctricos verticales, distribuidos en 10 secciones y un estudio hidrogeoquímico, efectuado en 30 aprovechamientos. Concluyen que en el subsuelo de la zona en que se encuentra ubicada la Cd. de Morelia, así como en las áreas circundantes se manifiesta la existencia de un sistema acuífero de alta productividad, alojado principalmente en las ignimbritas y tobas pumíticas de edad Plioceno Superior, así como en los derrames, brechas, aglomerados y conglomerados de composición basáltica y andesítica. La calidad fisicoquímica es apta para todo uso, únicamente la de la porción baja del valle Morelia-Álvaro Obregón, presenta peligro de salinidad media a ligeramente alta.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO CUANTITATIVO DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO, MICH. (CNA, 1990). En el estudio se llevó a cabo una actualización del inventario de aprovechamientos, reportando 1,038 (924 pozos, 52 norias y 62 manantiales) mediante los cuales se extrae un volumen del orden de 52 Mm^3/año en los acuíferos de la porción norte contigua al Lago de Cuitzeo a través de 581 aprovechamientos; 197 Mm^3/año, de los que 83 Mm^3/año se extraen en el valle de Morelia mediante 216 aprovechamientos y 62 Mm^3/año en la Planicie Álvaro Obregón-Queréndaro con 241 aprovechamientos. El principal uso del agua subterránea es el agrícola (56%) y público urbano (17%).

Reportan una sobreexplotación del agua subterránea en el valle de Morelia provocando el descenso progresivo de los niveles del agua en el área localizada entre Cointzio y el poblado de Charo, alcanzando un máximo de 30 m en el intervalo de 1977-1990. La calidad del agua en forma general es buena, reportando una salinidad total predominante de 1,000 ppm.

Concluyen que la recarga que recibe el acuífero granular en la porción sur de la zona: planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro y valle de Morelia es superior a 178 Mm^3, reportando una disponibilidad en este acuífero de 33 Mm^3 dado que en esa zona sólo se reportan 145 Mm^3/año de extracción. Recomiendan reglamentar la disponibilidad de agua en el acuífero granular para satisfacer demandas de riego para uso doméstico de los núcleos de población asentadas en los valles. Regular la disponibilidad de aguas subterráneas en la porción occidental de la planicie de Álvaro Obregón para satisfacer las demandas de agua potable de la población de Morelia. No incrementar la explotación de agua subterránea en el valle de Morelia, específicamente en el área comprendida entre las poblaciones de Cointzio y Charo.

ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES GEOHIDROLÓGICAS ACTUALES Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN DEL ACUÍFERO DE MORELIA-QUERÉNDARO, MICHOACÁN (CNA, 1993). Reportan una extracción de 100 Mm^3/año (incluye

pozos y norias) distribuido de la siguiente manera: 40 Mm^3/año para uso agrícola, 53 Mm^3/año para abastecimiento de núcleos de población e instalaciones industriales y 7 Mm^3/año para uso doméstico y/o abrevadero. En el documento se realizó el balance de aguas subterráneas, considerando la extracción de 100 Mm^3/año, una descarga natural del orden de 45 Mm^3/año (considerando evapotranspiración y descarga de manantiales), el cambio de almacenamiento anual de 15 Mm^3 (calculado en el lapso 1977-1992). Para planear el desarrollo y orientar el manejo del acuífero, realizaron una modelación matemática preliminar, ya que disponen de poca información para formar y calibrar el modelo, se simuló el comportamiento de los niveles en el intervalo 1993-2010, suponiendo un bombeo incrementado en unos 45 Mm^3/año, a partir de 1993, con la siguiente distribución: 30 Mm^3/año en el área de Álvaro Obregón-Queréndaro y 15 Mm^3/año en el área de Morelia.

Los resultados indican que el incremento del bombeo provocaría el descenso de los niveles del agua, afectando el área de Morelia. En el acuífero se observan abatimientos desde 1977 en la zona de Morelia, del orden de 5 a 20 m; y en la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro del orden de los 6 m, provocados por la operación de los pozos agrícolas construidos a partir de 1989.

REGISTROS DE LITOLOGÍA, ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO (CNA, 1995). Este expediente contiene planos de litología del área norte de la Laguna de Cuitzeo. En el plano fechado 1977, “Estudio Geohidrológico, Río Lerma, Modelo Tectónico, Subcuencas Subterráneas, SARH” indican dos abatimientos en la zona del acuífero Morelia-Queréndaro, uno en el municipio de Cuitzeo y el de mayor área se ubica en la zona entre Queréndaro y Zinapécuaro.

REGISTROS DE PIEZOMETRÍA, ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO (CNA, 1997). Este expediente contiene una recopilación de planos de piezometría de estudios previos (SARH, 1990; entre otros). Contiene información litológica de 13 pozos; datos piezométricos de aprovechamientos que abastecen la ciudad de Morelia en el periodo sep/96-mar/97 (ésta información carece de coordenadas), el OOAPAS dividió la información de niveles dinámicos en cinco zonas, *1)* Zona Río Chiquito, destacando la Reserva Ocolucen con niveles de 183.6 m; *2)* Zona Prados Verdes, Mariano Escobedo II con niveles de 154.2 m; *3)* Zona Quinceo, Potrerillos con niveles de 190.2 m; *4)* Zona Realitos, El Lago II con niveles de 157.1 m; *5)* Zona Oriente de la Cd., Enrique Ramírez II con niveles de 158.2 m. Los niveles estáticos se encuentran entre 2 y 98 m, los niveles dinámicos entre 21 y 215 m, el gasto entre 3 y 70 lps, profundidad total entre 25 y 350 m.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA SUR-PONIENTE DE MORELIA (OOAPAS, 2006). El estudio tiene una extensión de 48 km^2, localizada en la zona sur-poniente de Morelia. El censo indica un total de 59 aprovechamientos de agua subterránea, de ellos 53 son pozos y 6 manantiales. 33 de los pozos son operados por el OOAPAS Morelia; se observa que los niveles

estáticos de los pozos ubicados en la zona del valle varían de los 14 a los 45 m de profundidad y los pozos ubicados en la zona de las faldas del Quinceo varían de los 47 a los 110 m. Además se realizaron 20 sondeos eléctricos verticales.

Reportan un volumen de agua subterránea disponible en el acuífero de 5'840,579.64 m^3; abatimientos en la zona del ex Ejido Tzindurio, el FOVISSSTE La Huerta, Ciudad Universitaria y en el Fraccionamiento Ario 1815, San Isidro Itzicuaro. El menor abatimiento se encuentra en la zona comprendida entre la población de San Juanito Itzicuaro y el Fraccionamiento Fuentes de Valladolid y hacia el Sur de estos asentamientos. La calidad del agua subterránea es apta para el consumo humano en la zona centro y sur del valle aluvial, los pozos que en algunos parámetros rebasan lo establecido por la norma, se ubican al norte y oriente de la zona de estudio.

ACTUALIZACION HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS: MARAVATIO-CONTEPEC-EPITACIO HUERTA, ZACAPU, MORELIA-QUERÉNDARO Y PASTOR ORTIZ, EN EL ESTADO DE MICHOACÁN. 2007. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo general es conocer las condiciones actuales de explotación del agua subterránea y funcionamiento hidrogeológico del acuífero Morelia-Queréndaro (1602), con el objeto de que sirva de herramienta, para proponer las políticas de explotación adecuadas y estar en condiciones de realizar un mejor aprovechamiento del recurso subterráneo.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

El acuífero Morelia-Queréndaro, según el INEGI (1991), se ubica en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, cubre parte de tres subprovincias, la Neovolcánica Tarasca, Sierras y Bajíos Michoacanos, y Mil Cumbres.

El Eje Neovolcánico está representado por grandes expresiones de vulcanismo explosivo, originado durante eventos relativamente recientes; la segunda, alcanza desarrollo significativo de sistemas de fallas asociado con manifestaciones volcánicas y grabens o fosas.

El vulcanismo de la región se generó a lo largo de lineamientos de fallas formando las sierras circundantes y creando paisajes de morfologías combinadas y notable singularidad.

Subprovincia Neovolcánica Tarasca

Se caracteriza por un vulcanismo reciente (Plioceno-Cuaternario) muy particular. La mayor parte de su extensión está clasificada fisiográficamente como sierra volcánica con llanuras. Se caracteriza por la presencia de un gran número de aparatos volcánicos -conos cineríticos-. En general, los suelos son jóvenes, se formaron de manera residual, en su mayoría lo hicieron a partir de cenizas volcánicas, producto de las erupciones más recientes en el periodo Cuaternario y también de rocas basálticas, tobas, brechas y andesitas. Más de la mitad son suelos profundos, en algunos casos pedregosos y gravosos; la cuarta parte son suelos delgados y en menor proporción están los someros.

Subprovincia de las Sierras y Bajíos Michoacanos

Esta se localiza en el corazón de la cuenca del río Lerma, se extiende desde La Piedad Cabadas, Michoacán, hasta Acámbaro, Guanajuato. En el oriente, las efusiones volcánicas generaron, por bloqueo de drenaje, los lagos de Yuriria y Cuitzeo. Los suelos de esta subprovincia son aluviales y residuales, desarrollados a partir de basaltos, brechas, tobas, andesitas y riolitas, todas ellas originadas en los periodos Paleógeno-.Neógeno y Cuaternario. Entre los tipos de suelo más importantes de la región, se puede señalar a los vertisoles, feozems, luvisoles y andosoles.

Subprovincia de Mil Cumbres

Es relativamente de poca extensión. Es una región accidentada y complicada por la diversidad de sus geoformas, como son: sierras volcánicas complejas, mesetas lávicas escalonadas, lomeríos basálticos y el valle por el cual el río Lerma se dirige al norte, hacia la presa Solís. Esta presenta agrestes paisajes formados por bosques de coníferas en una compleja topografía. Clima y geología condicionan la formación de suelos cuyo origen volcánico es dominante para los andosoles y residual para litosol, regosol y suelos rojos arcillosos.

3.2. Clima

De acuerdo con los datos de las 26 estaciones climatológicas seleccionadas (ERIC II, 1999), con registros de 1940 a 2004, el clima es templado subhúmedo. Los promedios anuales de temperatura, precipitación y evaporación potencial son 17.4° C, 797 mm y 1,810 mm respectivamente; el régimen de lluvias se presenta de junio a septiembre.

La precipitación menos abundante se presenta en la porción norte del acuífero y la más cuantiosa en la porción sureste.

3.3. Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 12, Lerma-Chapala-Santiago, constituye una región alta que se caracteriza por tener zonas planas y amplias, que basculan ligeramente hacia el noroeste. Estos valles se encuentran separados por elevaciones que corresponden a estructuras volcánicas, cuyas altitudes varían entre los 1,600 y 2,000 m. En la porción norte del acuífero se encuentran orientados de oeste a este. Esta región hidrológica comprende parcialmente cinco cuencas en el estado, a dos de ellas pertenece el acuífero.

Cuenca Río Lerma-Salamanca, tiene dos subcuencas intermedias: "Presa Solís-Salamanca" y "Salamanca-Río Angulo".

Cuenca Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Laguna de Yuriria, el lago de Pátzcuaro, el de Cuitzeo y la laguna de Yuriria ligan su origen al sistema volcánico que fue afectado por fallas. Durante largos periodos de erosión las amplias depresiones han sido azolvadas, reflejándose principalmente en el lago de Cuitzeo. En la zona central de la porción de esta cuenca se localiza el Distrito de Riego Morelia-Queréndaro.

La corriente superficial más importante es el río Grande de Morelia, corre por un estrecho valle fluvial, situado en la porción occidental de la zona y desemboca en una extensa planicie, ubicada en la porción central de la misma.

3.4. Geomorfología

El acuífero define rasgos geomorfológicos resultado de fuerzas tectónicas y actividad volcánica muy intensas, que actuaron combinadamente y alternadamente con la erosión. Hay dos unidades morfológicas presentes en la zona: a) montañas y lomeríos y, b) valles.

Las montañas y lomeríos están constituidos predominantemente por rocas ígneas extrusivas de edad Terciaria, en la porción sur de la zona, las constituyen andesitas y basaltos del Paleógeno-Neógeno, sus montañas alcanzan elevaciones superiores a los 3,000 msnm, presentan un relieve muy abrupto, con frentes escarpados y fuertes pendientes.

Los valles son de origen tectónico y fluvial, actualmente están ocupados en su mayor parte por tres unidades del Distrito de Riego 020. La planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro, ubicada en la porción central de la zona, está formada por las llanuras de inundación de los ríos y arroyos, que siguiendo cursos divagantes desembocan al lago de Cuitzeo.

4. GEOLOGÍA

La región se encuentra afectada por sistemas de fallas con dirección E-W y NE-SW que dieron origen al valle donde se aloja el sistema acuífero. Están presentes ignimbritas, brechas y tobas de composición riolítica que datan desde el Mioceno Inferior y depósitos lacustres y de aluvión del Cuaternario Reciente (Corona y Birgit, 2001).

Las rocas que afloran dentro de los límites del acuífero son de tipo ígneo extrusivo básica del periodo cuaternario, según INEGI 2007. La Figura 3 muestra la geología general del acuífero.

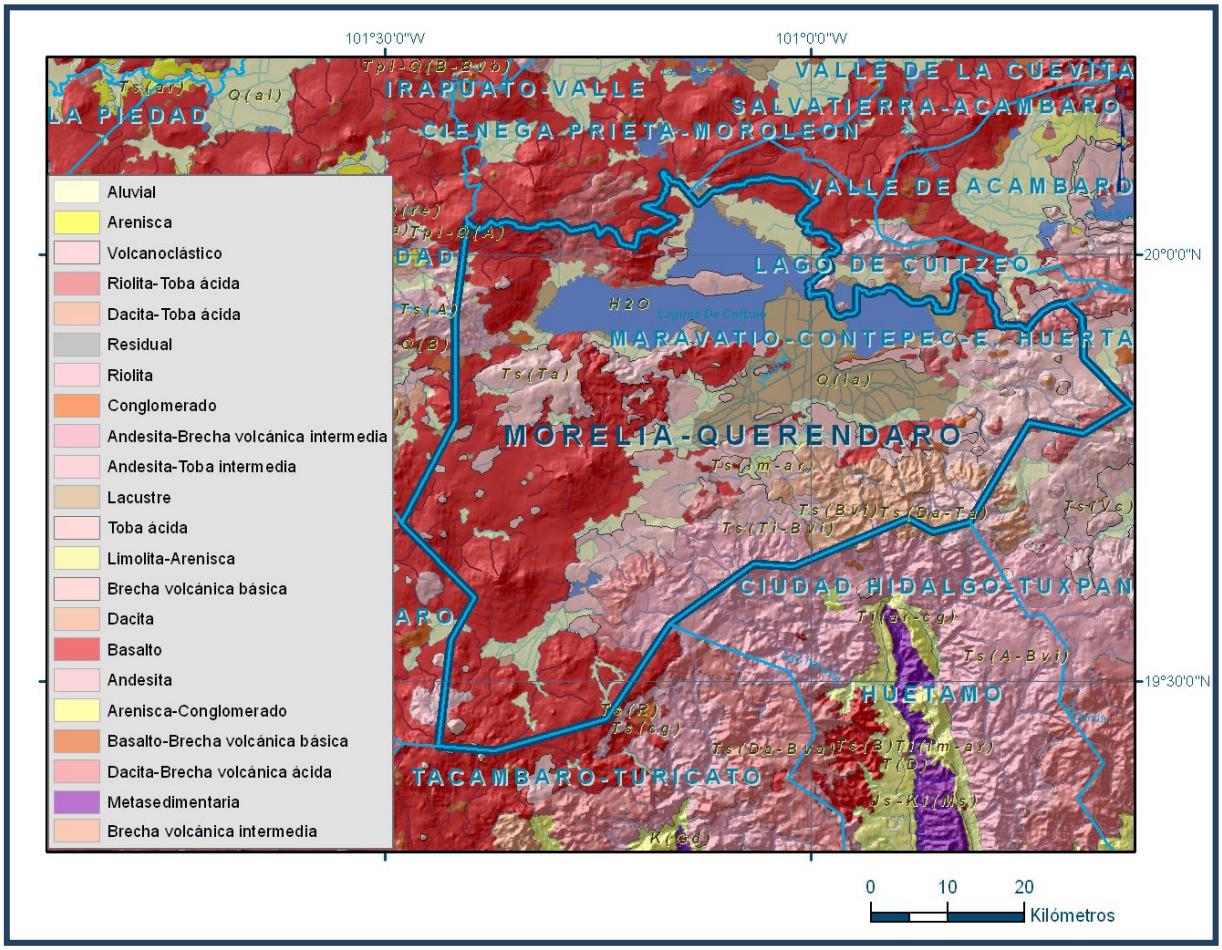


Figura 3. Geología del acuífero

4.1. Estratigrafía

Las unidades que afloran en la zona son:

Rocas ígneas. Está constituida por tobas, brechas y lavas ignimbríticas, de composición riolítica (Mioceno Inferior). En la sierra de Mil Cumbres, suprayace a derrames andesíticos de edad Oligoceno. En la sierra de Mil Cumbres y en el camino a Tzitzio, su espesor que va de 300 a 350 m, al este de Copándaro, es del orden de 120 m. Está ampliamente distribuida en la porción sureste del área y en la ribera sur del lago de Cuitzeo.

Derrames andesíticos. Derrames de lavas, aglomerados y brechas de composición andesítica (Mioceno Medio). Las lavas se presentan al NNE del poblado de Tarímbaro en ocasiones hasta con pseudoplegamientos, como en la cantera cercana al poblado de Álvaro Obregón. Su espesor es cercano a los 400 m, aflora en los macizos montañosos, en el frente de la falla que limita al valle de Morelia-Álvaro Obregón por el SE, constituyendo la elevación en donde se asienta este último poblado y en el extremo norcentral del área, en el fondo de las barrancas, alrededor del poblado Cañada del Herrero y en el frente del alto de la falla normal que limita a la planicie del Lago de Cuitzeo, por el sur.

Lavas, brechas y conglomerados. Predominantemente derrames de lavas, brechas y conglomerados basales (Mioceno-Plioceno). En la porción norte el espesor es del orden de 260 m y en la barranca del arroyo Uval, de 120 m.

Ignimbritas y tobas riolíticas. Ignimbritas o tobas soldadas, vidrios, derrames y tobas vítreas, cristalinas, arenosas y arcillosas, pumicíticas y de composición dacítica y riolítica (Plioceno Inferior-Medio). Se han medido espesores de cerca de 350 m. En el área del poblado de Morelos, afloran más de 150 m de tobas soldadas, se les midió un espesor máximo de 140 m, sin embargo en los alrededores de la ciudad de Morelia, muestran que el espesor de las tobas arenosas y de las ignimbritas, aumentan del oriente de dicha ciudad hacia el poniente de la misma.

Depósitos lacustres y gravas, arenas y tobas. Constituida por sedimentos o depósitos, en ambientes lacustres, de constitución arcillo-arenoso, que se gradúan vertical y horizontalmente a gravas, arenas y tobas (Plioceno Superior). Sus espesores pueden ser de hasta 80 m y llegar a ser mayores al oriente del área. Sus afloramientos se restringen hacia las porciones central y centro oriental del área, y en las inmediaciones del noreste de la ciudad de Morelia, de igual manera, al norte de ésta a unos 2 km, antes de la bifurcación hacia Álvaro Obregón y Cuitzeo.

Derrames basálticos y andesíticos. Son derrames de lavas, brechas y tobas de composición basáltica, basalto-andesítica, andesita-basáltica y andesítica (Plioceno Superior). En la porción oriental, sus espesores son de un máximo de 25 m y en la occidental, pueden alcanzar hasta del orden de 400 m. Los afloramientos más amplios, conforman los aparatos volcánicos: La Trampa, El Irauco y El Picacho, así como pequeñas mesetas que coronan a las depósitos de ignimbritas y tobas riolíticas, al norte del poblado Santa Ana del Arco o a los lacustres, como al NE del poblado Francisco I. Madero.

Lavas, brechas y tobas basálticas. Lavas, brechas y tobas de composición basáltica, basalto andesítico y andesíticas (Plioceno Tardío-Cuaternario Temprano). Sus espesores son variables, al poniente de la ciudad de Morelia es de 60 m, estos espesores deben de aumentar hacia el centro de emisión del Quinceo, probablemente hasta unos 600 m tomando en cuenta su altura.

Lavas, escorias, brechas, piroclastos y tobas. Derrames de lavas, escorias, brechas, aglomerados, piroclastos y lapilli (Cuaternario Medio). Debido a los grandes volúmenes de rocas volcánicas de esta unidad, los espesores deben de ser cientos de metros, si se considera que algunos de los valles u hondonadas, donde afloran rocas de esta unidad, tienen un desnivel de más de 400 m con respecto a los afloramientos contiguos, también de rocas de esta unidad. Sus afloramientos se circunscriben a la porción poniente del área y continúan hacia el poniente y sur poniente, ya que estos se consideran como pertenecientes al extremo noreste de la meseta Tarasca.

Gravas, arenas, limos y arcillas. Esta unidad está constituida por limos y arcillas, depositados en ambiente lacustre; gravas, arenas y arcillas de origen residual y aluviones compuestos por conglomerados; gravas, arenas, limos y arcillas. Se les asigna una edad del Reciente, aunque los lacustres a profundidad, en la porción oriente del valle de Morelia-Álvaro Obregón, pueden rebasar esta edad, lo mismo que en el de Lagunillas y Tiripetío. Los espesores de los residuales deben ser mayores a unos 3 m; los aluviones, pueden llegar a los 10 m, en la periferia del valle Morelia-Álvaro Obregón y los lacustres es posible que tengan algunas decenas en el centro del valle y en el de Tiripetío y Lagunillas. Están distribuidos ampliamente en el área, aunque en general sus afloramientos, son de reducidas dimensiones, los residuales cubren por lo general las partes altas o laderas de las anteriores unidades, los aluviones se encuentran en las hondonadas, fondo del lago de Cuitzeo, valle Morelia-Álvaro Obregón y los lacustres, en la porción oriental del anterior valle y en el subsuelo de los otros dos.

4.2. Geología estructural

En lo concerniente a los alineamientos estructurales, es posible dividir a la provincia en los sectores poniente, oriente y central, basándose en la concentración de ellas y los sentidos preferenciales que muestran. El sector poniente es afectado por sistemas de alineamientos de dirección SE-NW; en el sector oriental los alineamientos observan una dirección SW-NE, S-N y NNW-SSE; siendo afectada la porción central que es donde se ubica la zona, predominantemente por el sistema SW-NE, observándose también alineamientos de sentido E-W y NNW-SSE.

Se observa la existencia de fosas tectónicas orientadas E-W, como las que corresponden con los lagos de Chapala y Cuitzeo, así como, la zona del Bajío Guanajuatense a S-N, como las de los valles de México y Toluca.

Por otro lado, se observan alineamientos estructurales de direcciones coincidentes con los del sector central, esto es, SW-NE, E-W y SSE-NNW, en donde la mayoría de ellos corresponden a trazas de fallas normales, con sus bloques bajos hacia el norte. Los sistemas sensiblemente E-W y SW-NE, con escalonamientos hacia el N y NW propiciaron los valles de Morelia-Álvaro Obregón, el de Atapaneo-Charo y la depresión existente al SE de Morelia, entre los poblados de Buenavista-Zurumbeneo; debiéndose al sistema SW-NE la depresión en donde se asienta la Cd. de Morelia, que corresponde a un gran alineamiento sensiblemente SW-NE.

El graben es evidenciado por la abrupta terminación de los afloramientos de las unidades miocénicas ubicadas al oriente, sur y suroriente de la Cd. de Morelia, esto es, en la porción suroriental del área, lo que equivale a conceptualizarla como el pilar tectónico oriente de él, el cual hacia el valle de Morelia-Álvaro Obregón es profundizado por el sistema de fallas que originó este valle. El pilar tectónico occidental se manifiesta al noroeste de Tarímbaro, sitio en donde afloran las rocas miocénicas y es cubierto hacia el sur por los derrames basálticos y andesíticos de edad Plio-Cuaternaria. La fosa tectónica o el graben, quedó enmascarado por el depósito de ignimbritas o tobas soldadas y en él se definen, además del valle de Morelia, el de Tiripetío y la depresión en donde se ubica el vaso de la Presa Cointzio; que prácticamente lo cruzan del SW al NE, corresponde a los sistemas de fallas que lo formaron.

Por último, basándose en la descripción anterior de los sistemas de fallas, es posible inferir que, el sistema más antiguo identificable es el SW-NE, el cual afectó a las rocas de edad Mio-Pliocénicas y anteriores, después de él, irrumpieron las ignimbritas o tobas soldadas y se sucedieron los restantes sistemas como el E-W y SSE-NNW, que afectan a las ignimbritas. Así mismo, la afectación de las ignimbritas por el sistema de fallas SW-NE, determina que éste se activó poco después de que éstas ocurrieron, posteriormente acontecieron los otros sistemas.
Las fallas de transcurrencia, desplazamiento lateral derecho, son de los últimos sistemas en aparecer, aunque son anteriores al sistema de sentido E-W, pues aparentemente son cortadas por éste.

4.3. Geología del subsuelo

La geometría del acuífero está definida por la depresión tectónica originada por el sistema de fallas SW-NE, en rocas de composición basáltica y conglomerados Mio-Pliocénicos, que afloran en la barranca del Arroyo Uval. Por lo tanto, el conglomerado se considera como basamento del sistema acuífero. Sus fronteras laterales están constituidas, al oriente por el pilar tectónico que

limita a la fosa, como tal lo demuestra el pozo Mil Cumbres, perforado en las faldas del Punhuato, el cual hasta una profundidad de 202 m, cortó basaltos andesíticos, aglomerados y al conglomerado basal, resultando fallido; hacia el sur-oriente de la ciudad de Morelia se está también dentro del pilar tectónico, pero el cruce de fallas del sistema E-W determinó que las rocas ignimbritas, basálticas y posiblemente el conglomerado mismo, adquirieran alta permeabilidad; la frontera lateral poniente no está bien definida. Los espesores de este acuífero son del orden de los 300 m en el centro del acuífero, al centro-sur de 400 m.

En la planicie Álvaro Obregón-Queréndaro, las rocas que alojan al acuífero son variables, pero por lo general en su porción superior son clásticas, del tamaño de gravas y arenas, alojándose también en basaltos y tobas pumíticas, hacia las laderas de las porciones centro-norte y norcentral; hacia las laderas de la porción sur, los clásticos y lacustres suprayacen a las andesitas basálticas Miocénicas.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos en la porción aledaña al lago de Cuitzeo. El acuífero se aloja en una depresión tectónica y está conformado, en su porción superior, por sedimentos clásticos de granulometría variada así como sedimentos arcillosos que se depositaron en la parte baja de la cuenca, donde se localiza el Lago de Cuitzeo; la porción inferior está constituida por rocas volcánicas que presentan permeabilidad primaria y secundaria, principalmente basaltos y tobas.
El medio granular y fracturado conforman una misma unidad hidrogeológica que presenta en general permeabilidad media a alta y un espesor promedio de 300 a 400 m.

Las distintas unidades que conforman el acuífero muestran variaciones: al poniente está alojado principalmente en tobas pumíticas con horizontes líticos y arcillosos y tobas soldadas, cuya geometría es controlada por los sistemas de fallas W-E; hacia Álvaro Obregón y Queréndaro está conformado principalmente por sedimentos clásticos del tamaño de gravas y arenas y hacia la zona contigua al Lago de Cuitzeo por sedimentos arcillosos, brechas andesíticas, basaltos así como brechas y cenizas basálticas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2007, las características hidráulicas del acuífero se estimaron de 7 pruebas de bombeo. Se utilizó el método de interpretación de Neuman, Theis, Jacob y Cooper-Jacob.

Los resultados se muestran en la tabla 2. Se observa que los valores de T (prueba de abatimiento) varían de 1.**9 a 0.083 x10^{-3} m^2/s y de 3.4 x10^{-3} a 0.80 x10^{-3}** m^2/s para la epata de recuperación; en tanto que para K se obtuvieron valores que oscilan entre 0.10 y 4.0 m/d (1**.2 x10^{-6} a 4.6 x10^{-5} m/s**) en las pruebas de abatimiento.

Tabla 2. Resultados pruebas de bombeo.

No. de aprov.	Longitud Oeste	Latitud Norte	P. T. (m)	L.C. (m)	Caudal (lps)	N.E. (m)	N.D. (m)	Espesor acuífero (m)	b (m)	Abatimiento (m)	Qe (lps/m abat.)
650	271563	2176242	200	195	10.00	124.36	177.68	75.64	70.64	53.32	0.187547
639	274155	2175394	300	240	3.30	134.64	189.85	165.36	105.36	55.21	0.059772
538	267977	2178974	190	126	15.90	84.85	89.25	105.15	41.15	4.40	3.613636
585	264034	2180413	200	150	10.00	120.33	137.05	79.67	29.67	16.72	0.598086
499	269738	2176336	180	150	22.20	118.60	127.25	61.40	31.40	8.65	2.566474
571	261997	2175783	300	171	15.10	144.10	160.83	155.90	26.90	16.73	0.902570
546	274890	2182361	330	168	19.00	123.96	140.18	206.04	44.04	16.22	1.171393

No. de aprov.	Abatimiento Tx10^{-3} (m^2/s)	Recuperación Tx10-^{3} (m^2/s)	k (m/d)	Método de interpretación
650	0.0534	3.420	0.065314	Neuman
639	0.1360	2.080	0.111526	Theis (1935)
538	1.9000	1.180	3.989307	Theis
585	0.2910	0.234	0.847401	Theis
499	0.8620		2.371873	Theis
571	0.2820	0.800	0.905755	Cooper-Jacob
546	2.5900		5.081199	Cooper-Jacob

5.3. Piezometría

El registro de los niveles del agua realizados durante el periodo de 1977 a 1992 aunado a la información recabada el año de 2007 permiten establecer la variación de los niveles que ha presentado el agua subterránea en las últimas tres décadas y la influencia del bombeo sobre los mismos.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

Los valores de profundidad al nivel estático varían de 10 a 200 m, valores menores de 10 m se registran en el valle de Álvaro Obregón y Huandacareo; en tanto que los valores mayores, entre160 y 200 m, se registran entre las localidades de Mil Cumbres, Peña Blanca, Fraccionamiento Coto del Ángel y Valle de las Flores. En la zona aledaña al Lago de Cuitzeo las profundidades varían entre 10 y 25 m. Profundidades del orden de los 50-160 m se presentan en la ciudad de Morelia. Figura 4.

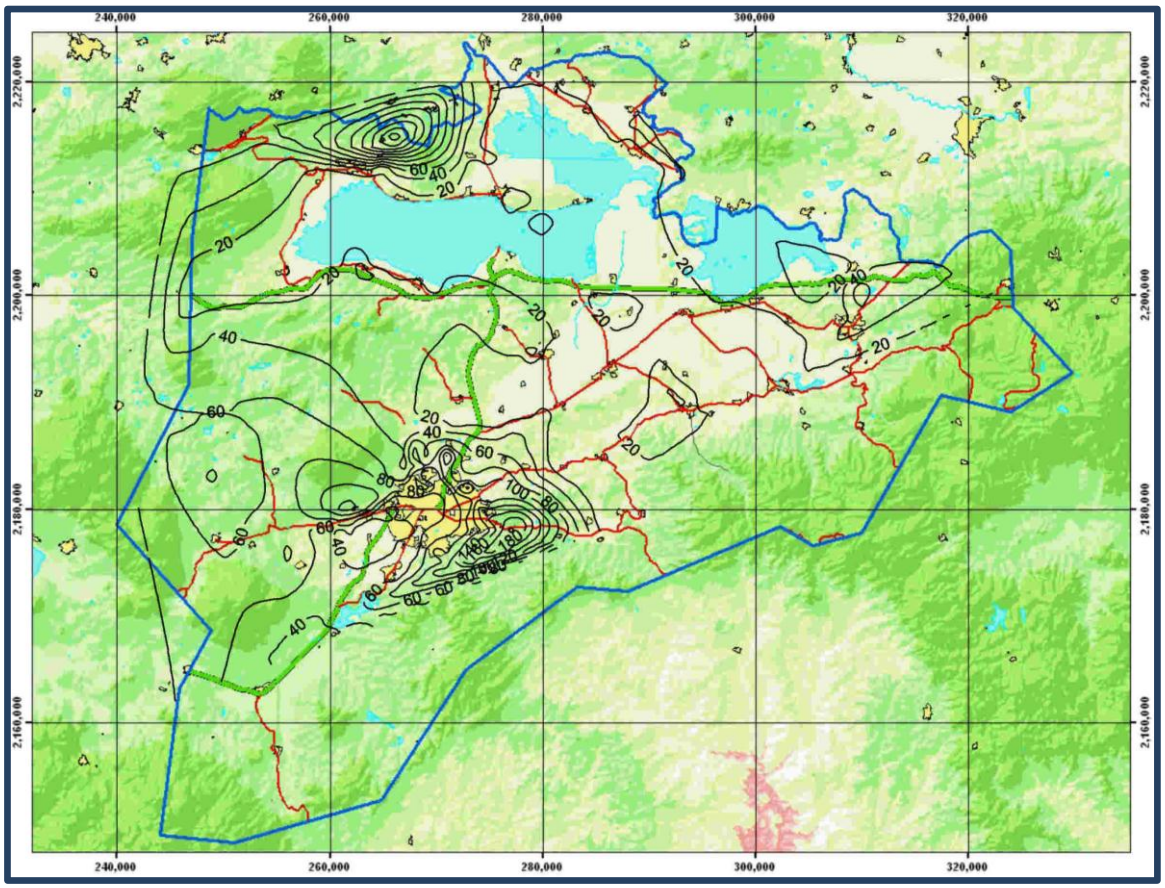


Figura 4. Profundidad al nivel estático (m), 2007

5.4.2. Elevación del nivel estático

En lo que respecta a la configuración de la elevación del nivel estático para octubre de 2007 varía de manera general de 1840 a 2000 msnm, estas curvas van ascendiendo del valle a las serranías, en la zona urbana de Morelia se presentan elevaciones de 1820 en la zona noreste a 1880 en la zona suroeste, Figura 5.

En el área del Río Grande, el agua subterránea circula de los flancos montañosos hacia la faja fluvial y luego a lo largo de ésta con dirección suroeste-noreste; en el sector de la ciudad de Morelia se aprecia una depresión piezométrica local, originada por la concentración de pozos, hacia la cual converge el flujo subterráneo. El Agua escapa de esta área hacia la de Álvaro Obregón-Queréndaro a través de la estrecha sección fluvial y de lomeríos. En la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro, el agua fluye subterráneamente de los cerros circundantes hacia el Lago de Cuitzeo, cuya elevación media es de 1,820 msnm; las aportaciones más cuantiosas proceden de los macizos montañosos que la limitan por el oeste y suroeste.

Aparentemente, la meseta alargada constituida por tobas riolíticas y coronada por basaltos en su flanco norte, que separa a las áreas de Morelia y Álvaro Obregón-Queréndaro, es receptora de recarga para ambos acuíferos.

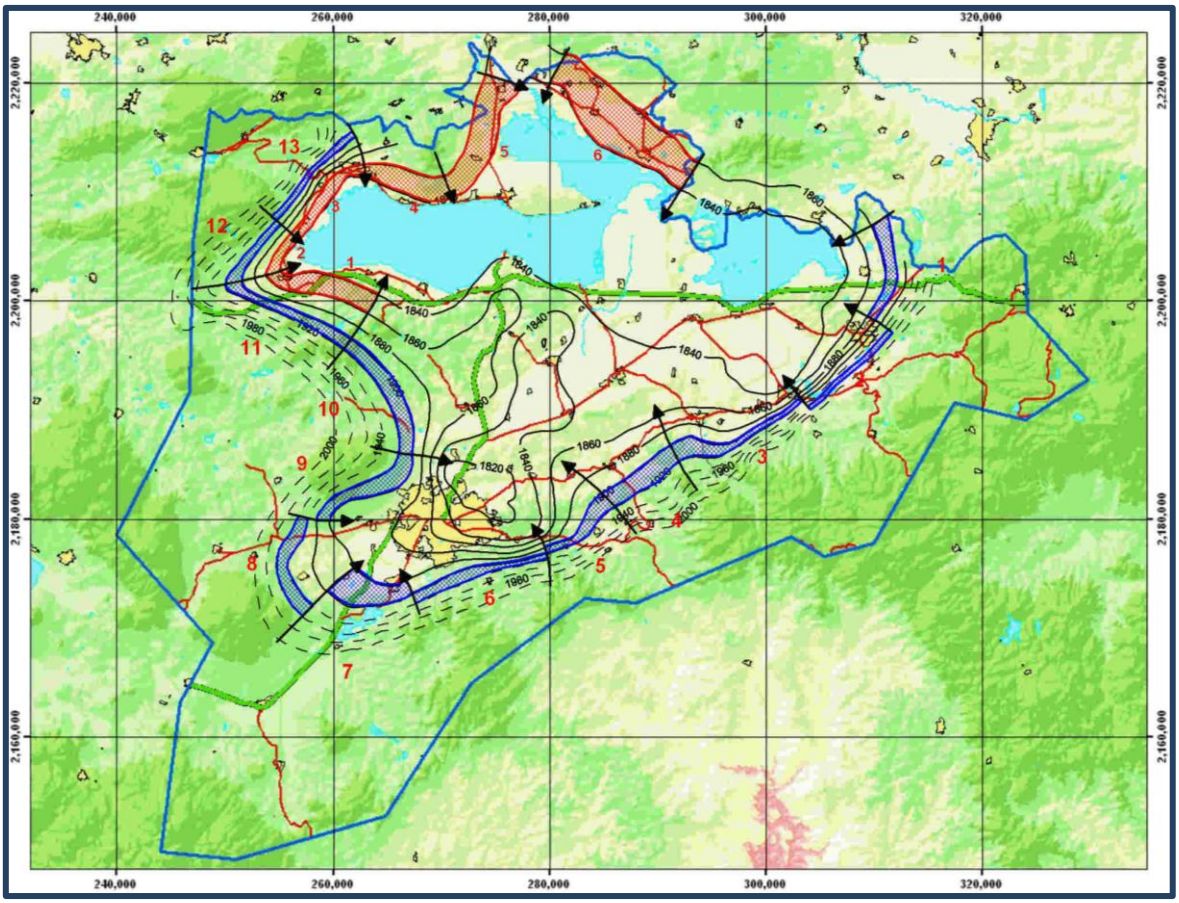


Figura 5. Elevaciones de nivel estático (msnm), 2007 y red de flujo subterráneo

5.4.3. Evolución del nivel estático

Para establecer la evolución del nivel estático en el área se consideró una piezometría de 1990 y las mediciones piezométricas realizadas en 2007. Es conveniente señalar que la información de

elevación del nivel estático para ese año es escasa, sin embargo se logró realizar al menos en la zona de Morelia la evolución de los niveles, donde se presenta un abatimiento entre los 20 a 40 m.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se tomaron 10 muestras de agua para su análisis fisicoquímico y bacteriológico correspondiente.

De estas pruebas, se puede observar que los valores de conductividad eléctrica del agua subterránea registran un promedio de 481 uS/cm, sin problema para uso potable. Manifiesta baja salinidad, en las muestras colectadas el promedio es del orden de 45 mg/l de salinidad.

El contenido iónico varía de 176 a 761 ppm de sólidos disueltos totales, exceptuando un aprovechamiento que presenta 1613 ppm (ubicado en Álvaro Obregón), la norma es 1000 para consumo humano. En cuanto a elementos mayores no presenta problemas de calidad para uso y consumo humano, exceptuando en la concentración de nitratos en tres pozos que rebasan la norma, localizados dos en el valle de Morelia y otro en los márgenes de la laguna de Cuitzeo.

Con relación a las familias de agua subterránea predominan las familias bicarbonatadas-sódicas (40%) y las bicarbonatadas mixtas (40%).

El 100% de las muestras se clasifican como tipo S_1 que representa agua baja en sodio que puede utilizarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de Na intercambiable. Así como el 60% de las muestras de agua subterránea se clasifican como C_2, lo que indica que es agua de salinidad moderada, que puede ser utilizada si se presenta una lixiviación moderada de las sales del suelo, en la mayoría de los casos podría utilizarse para la irrigación de plantas con tolerancia media a la salinidad.

El análisis bacteriológico detectó presencia de coliformes fecales y coliformes totales.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS

De acuerdo con los resultados reportados en el último censo realizado en el año 2007, se registraron 986 pozos y 23 manantiales. El uso principal del agua es agrícola (53.69%), el segundo lugar lo ocupa el público urbano (40.21%) y en menor medida los demás usos (6.1%);

para este análisis se utilizaron los pozos activos. La extracción de agua subterránea de acuerdo con la estimación del censo es de **162.2 hm^3/año**.

El volumen de agua estimado en el censo por salida de **manantiales es de 60.3 hm^3/año**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.
La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

$$\text{Entradas E - Salidas (S)} = \text{Cambio de almacenamiento } \Delta V(S)$$

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

$$Rv + Eh + Ri - B - Sh - ETR - Dm = \pm\Delta V(S)$$

Donde:

Rv Recarga vertical
Eh Entradas por flujo subterráneo horizontal
Ri Recarga inducida
B Bombeo
Sh Salidas por flujo subterráneo horizontal
ETR Evapotranspiración
Dm Descarga a través de manantiales
$\Delta V(S)$ Cambio de almacenamiento

Considerando que la información previa disponible, no permite plantear un balance para un periodo de tiempo mayor que corresponda a la misma temporada del ciclo climatológico, se decidió plantear el balance para el periodo 2000- 2007. El área de balance definida es de 2,030 km^2.

7.1. Entradas

La recarga total (Rt) al acuífero Morelia-Queréndaro está integrada primordialmente por las entradas subterráneas (Eh), la recarga vertical por lluvia (Rv) que se infiltra en las zonas no cubiertas por la capa impermeable de la zona urbana y la recarga inducida por retornos de riego y por infiltración de las fugas en la red de agua potable.

La recarga natural Esta recarga está constituida por recarga por flujo horizontal subterráneo que se presenta a través de las zonas de pie de monte y por la infiltración de una parte del agua precipitada en el área del valle.

7.1.1. Recarga vertical

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene escasa información para elaborar la configuración de evolución del nivel estático y cuantificar el cambio de almacenamiento, se decidió emplear el balance hidrometeorológico. Para realizar este balance se requiere conocer entre otros parámetros, los volúmenes de escurrimiento que se presentan por lluvia dentro del área, es decir, es necesario determinar el volumen de agua que se genera por cuenca propia; sin embargo, no se disponen de aforos específicos que permitan cuantificar dicho volumen, en este sentido a continuación se menciona la forma en que se procedió para obtenerlo.

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se puede utilizar el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 17 de abril de 2002, que señala que en caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento (Tabla 3).

El volumen anual medio de escurrimiento natural en términos genéricos es igual a la precipitación media anual por el área y un coeficiente de escurrimiento. El coeficiente de escurrimiento (Ce) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que está en función del tipo y uso de suelo. Al respecto para la zona se consideró un valor medio ponderado de K=0.263, que corresponde a suelos medianamente permeables, tipo B, uso de suelo tipo cultivos en hilera (0.27), pastizal regular (0.24), bosque cubierto menos 25 al 50% (0.26) y zonas urbanas (0.29), con 32%, 16%, 42% y 10% del área respectivamente, aplicando a su vez el valor de K en la ecuación del coeficiente de escurrimiento se obtiene un valor de Ce= 0.1473.

Tabla 3. Balance hidrometeorológico

Área (km^2)	Temperatura (° C)	L Turc	X Coutagne	Precipitación (mm)	Evapotranspiración Turc (mm)	Evapotranspiración Coutagne (m)
2030	17.4	998.4012	0.309023	797	642.8	0.601

Coeficiente de escurrimiento (Ce)	Balance hidrometeorológico				Coeficiente de infiltración
	Escurrimiento (hm^3/año)	Precipitación (hm^3/año)	Evapotranspiración (hm^3/año)	Infiltración (hm^3/año)	
0.1473	238.3	1617.9	1219.4	160.2	0.099

$$Ce = \frac{K(P-250)}{2000} + \frac{(K-0.15)}{1.5}$$

Dónde:

Ce Coeficiente de escurrimiento

K Parámetro en función del tipo de suelo

TURC

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left[\frac{P^2(mm)}{L^2}\right]}} \qquad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Donde:

ETR Evapotranspiración $(mm/año)$

P Precipitación $(mm/año)$

T Temperatura (℃)

COUTAGNE

$$ETR(m) = P - XP^2 \qquad X = \frac{1}{(0.8 + 0.14t)}$$

Donde:

ETR Evapotranspiración (m/año)

P Precipitación (m/año)

T Temperatura (°C)

El valor estimado de la recarga vertical por lluvia es de **160.2 hm^3/año.**

7.1.2. Recarga inducida

Esta recarga está constituida por recarga por retornos de riego en la zona agrícola del Distrito de Riego 020 y por retornos por fugas de la red de abastecimiento de agua potable.

En la recarga inducida se consideran los retornos de riego, tomando en cuenta un volumen utilizado en el Distrito de Riego de 345 hm^3/año y considerando un coeficiente de infiltración de 10% obtenido del balance hidrometeorológico del área de balance. Por lo tanto el resultado por retornos de riego de **34.5 hm^3/año**.

El organismo operador en 2005 entregaba un volumen de 100 hm^3/año y se perdía el 40% en fugas, entonces para un volumen de 40 hm^3/año de fugas y considerando que un 10% se recarga al acuífero, se estima un volumen por retornos por fugas de **4.0 hm^3/año**.

7.1.3. Entradas por flujo subterráneo horizontal

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero.

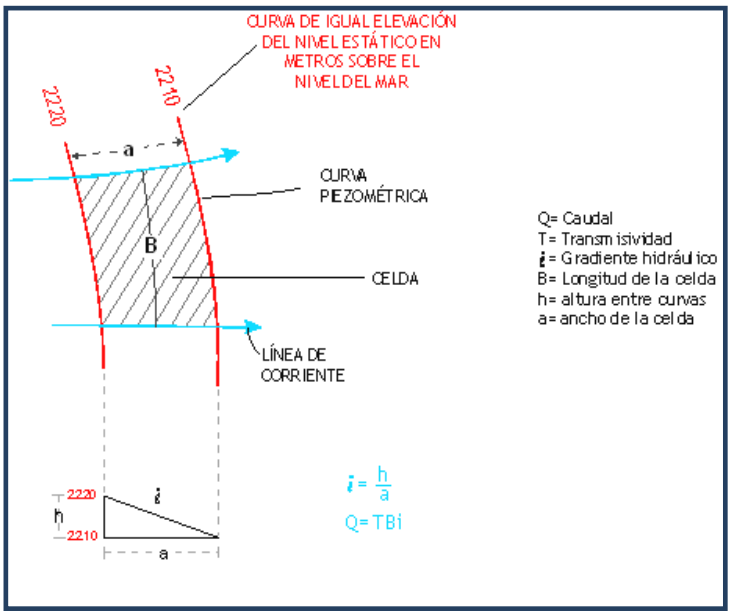
Para su cálculo se utilizó la configuración de la elevación del nivel estático de 2007, mostrada en la Figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal (Q) que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. $Q = B * i * T$

Donde:

B: Ancho (m) del caudal de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo

T: Transmisividad (m^2/s) en el canal de flujo



En la Tabla 4 se puede observar los valores obtenidos en cada celda y el total de 88 hm^3/año.

Tabla 4. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal

Canal	Longitud L [m]	Ancho B [m]	h_2-h_1 [m]	Gradiente i [adimensional]	Transmisividad T [m^2/s]	Caudal Q [m^3/s]	Volumen V [hm^3/año]
E1	10037	1124	20	0.0178	0.0019	0.339329	10.701085
E2	10637	524	20	0.0382	0.0019	0.771385	24.3
E3	13034	899	20	0.0222	0.0019	0.550937	17.4
E4	7640	1723	20	0.0116	0.0027	0.239443	7.6
E5	7640	1049	20	0.0191	0.00283	0.412225	13.0
E6	13186	824	20	0.0243	0.000349	0.111697	3.5
E7	6742	2397	20	0.0083	0.000282	0.015864	0.5
E8	10487	1199	20	0.0167	0.000282	0.04933	1.6
E9	9888	1348	20	0.0148	0.000291	0.042692	1.3
E10	11086	1348	20	0.0148	0.0005	0.08224	2.6
E11	13034	1124	20	0.0178	0.0005	0.115961	3.7
E12	7491	899	20	0.0222	0.0001	0.016665	0.5
E13	10787	524	20	0.0382	0.0001	0.041172	1.3
							88.0

Los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son valores promedio obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas subterráneas (Sh), evapotranspiración (ETR) y descarga natural por manantiales (Dm).

7.2.1. Evapotranspiración

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

En algunas zonas del área de balance los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de evapotranspiración real, considerando valores medios anuales de temperatura y precipitación.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left[\frac{P^2(mm)}{L^2}\right]}} \qquad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

$T(°C) = 17.4$

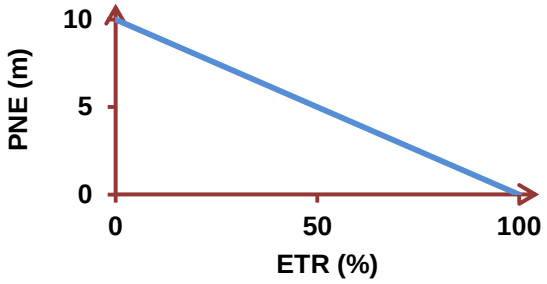
$P(mm) = 797$ $\qquad P^2 = 635{,}209$

$L = 998.4012$ $\qquad L^2 = 996{,}804.956$

ETR (mm) = 642.8

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen retenido, partiendo de una relación lineal entre la profundidad al nivel estático (PNE) y él % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR es nulo y a 0 m el valor es de 100%, a 5 m el 50%, a 2 m el 80%, etc.



El área donde ocurre este tipo de descarga, según los registros de piezometría de 2007, está comprendida en la zona colindante con el Lago de Cuitzeo y al oriente del rio Zinapécuaro, donde el nivel estático se encuentra a una profundidad promedio de 5 m. Después de determinar la dimensión de esta área y el valor promedio de profundidad al nivel de 5 m. El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, deberá ponderarse de acuerdo a la relación lineal mencionada anteriormente, en este caso particular como el valor medio de profundidad es de 5 m, se multiplicará por 0.5 (que significa que a esta profundidad, el 50% es susceptible de evapotranspiración.

El resultado de este proceso se presenta en la Tabla 5, en la que se muestra que el valor de la evapotranspiración real calculado es de **64.2 hm^3 anuales**.

Tabla 5. Cálculo de la evapotranspiración

Intervalo curvas [m]	Profundidad considerada [m]	Área [km^2]	%	ETR [m]	Vol. ETR [hm^3/año]
4 a 6	5	199.8	0.5	0.643	64.2

7.2.2. Bombeo

La extracción de agua subterránea en el área ha variado a través del tiempo y de acuerdo con la estimación más reciente, dicha extracción efectuada por bombeo es del orden de **162.2 hm^3/año**, destinado principalmente para el uso agrícola y público urbano.

7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal

Las salidas subterráneas que ocurren como descarga fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir también de la configuración de elevación del NE. El valor estimado es de 3.3 hm^3 anuales, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

Canal	Longitud L [m]	Ancho B [m]	h_2-h_1 [m]	Gradiente i [adimensional]	Transmisividad T [m^2/s]	Caudal Q [m^3/s]	Volumen V [hm^3/año]
S1	11086	1798	20	0.0111	0.0001600	0.0197304	0.622217
S2	3895	974	20	0.0205	0.0001600	0.0127967	0.403557
S3	9139	974	20	0.0205	0.0001600	0.0300255	0.946883
S4	7940	1947	20	0.0103	0.0001600	0.0130498	0.411539
S5	11685	2547	20	0.0079	0.0001600	0.0146808	0.462974
S6	15580	3596	20	0.0056	0.0001600	0.0138643	0.437224
							3.3

7.2.4. Descarga natural por manantiales

El volumen anual de extracción por manantiales de acuerdo al censo de aprovechamientos es de **60.3 hm^3/año**.

7.3. Cambio de almacenamiento

Una vez calculados los componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar el cambio de almacenamiento, tomando en cuenta todas las variables anteriormente calculadas y sustituidas en la siguiente expresión:

$$\Delta v(S) = Eh + Rv + Ri - B - Sh - ETR - Dm$$

$$\Delta V(S) = 88.0 + 160.2 + 38.5 - 162.2 - 3.3 - 64.2 - 60.3$$

$$\Delta V(S) = \mathbf{- 3.3}$$

En la Tabla 7 se presenta un resumen del balance del acuífero.

Tabla 7. Resumen del balance

Entradas	Volumen [hm^3/año]	Salidas	Volumen [hm^3/año]
Recarga vertical	160.2	Evapotranspiración	64.2
Recarga inducida	38.5	Bombeo	162.2
Entrada subterránea	88.0	Salidas subterráneas	3.3
		Descarga de manantiales	60.3
		Cambio de almacenamiento	-3.3
Total de entradas	286.7	Total de salidas	286.7

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica

Rt = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

8.1. Recarga total media anual

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt) , corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso particular, su valor es de **286.7 hm^3/año.**

8.2. Descarga natural comprometida

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero Morelia-Queréndaro, el volumen de las descargas naturales comprometido es de **127.8 hm^3/año**, que corresponde al total de la evapotranspiración, las salidas horizontales y las descargas naturales a través de manantiales; para proteger el ecosistema del Lago de Cuitzeo, que se considera un sitio de refugio de aves migratorias y como una zona de regulación natural del clima de la región.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte **31 de marzo de 2009** es de **165 067,601 m^3 anuales**.

8.4. Disponibilidad de agua subterránea

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión correspondiente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas ocasionado e inscrito en el REPDA.

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS}$$

$$DAS = 286.7 - 127.8 - 165.067601$$

$$\mathbf{DAS = - 6.167601}$$

El resultado indica que existe un déficit de 6 167,601 m^3 anuales.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de su disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero en la que actualmente existe información hidrogeológica para su evaluación. No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor; sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

Comisión Nacional del Agua. 1990. Estudio Geohidrológico Cuantitativo del Acuífero Morelia-Queréndaro, Mich. Realizado por la compañía Consultores, S. A.

Comisión Nacional del Agua. 1993. Estudio de diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del acuífero de Morelia-Queréndaro, Michoacán, realizado por la empresa Servicios, Estudios, Proyectos de Ingeniería y Ciencias de la Tierra, S. A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua. 2007. Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el estado de Michoacán, Acuífero Morelia-Queréndaro, realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1977. Estudio Geohidrológico preliminar de la zona de Morelia-Queréndaro, estado de Michoacán.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaria de infraestructura hidráulica, Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos, Dirección de Aguas Subterráneas. 1988. Estudio de exploración geofísica y actividades geológicas complementarias en la zona de Morelia-Álvaro Obregón, Michoacán.