

***Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Zacapu (1606), 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.**

DXX REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "LERMA-SANTIAGO-PACÍFICO"		R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CLAVE	ACUÍFERO	CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
<b>ESTADO DE MICHOACÁN</b>							
1606	ZACAPU	189.5	125.4	29.057891	23.0	35.042109	0.000000

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 ZACAPU (1606),  
ESTADO DE MICHOACÁN.**

**México, D.F., mayo 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 .....	4
3. FISIOGRAFÍA.....	7
3.1. Provincia fisiográfica .....	7
3.2. Clima .....	8
3.3. Hidrografía.....	9
3.4. Geomorfología .....	9
4. GEOLOGÍA .....	10
4.1. Estratigrafía .....	11
4.2. Geología Estructural .....	12
4.3. Geología del subsuelo .....	13
5. HIDROGEOLOGÍA .....	15
5.1. Tipo de acuífero .....	15
5.2. Parámetros hidráulicos .....	15
5.3. Comportamiento hidráulico .....	16
5.4. Piezometría.....	16
5.4.1. Profundidad al nivel estático .....	17
5.4.2. Elevación del nivel estático .....	18
5.4.3. Evolución de nivel estático.....	19
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS .....	21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1. Entradas .....	22
7.1.1. Recarga vertical.....	22
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal.....	23
7.1.3. Recarga inducida.....	25
7.2. Salidas.....	26
7.2.1. Evapotranspiración .....	26
7.2.2. Bombeo .....	28
7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal .....	28
7.2.4. Flujo base .....	28
7.2.5. Salida por manantiales .....	30
7.3. Cambio de almacenamiento .....	31
8. DISPONIBILIDAD.....	32
8.1. Recarga total anual.....	32
8.2. Descarga natural comprometida .....	33
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas.....	33
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas .....	33
9. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS .....	34

## **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 (REPGA).

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 Zacapu, definido con la clave 1606 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 37' y 19° 57' latitud norte y los meridianos 101° 24' y 101° 55' longitud oeste; abarca 1239 km<sup>2</sup> de extensión superficial aproximadamente, cubre gran parte de los municipios Zacapu, Coeneo y Huaniqueo, parte de los municipios de Morelia, Jiménez, Nahuatzén y Quiroga, y una pequeña porción de Chucándaro. (Figura 1).

Hacia el norte colinda con el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad, al este con Morelia Queréndaro, al sur con Lagunillas Pátzcuaro y al oeste con los acuíferos Zamora y Uruapan, todos ellos del estado de Michoacán.

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

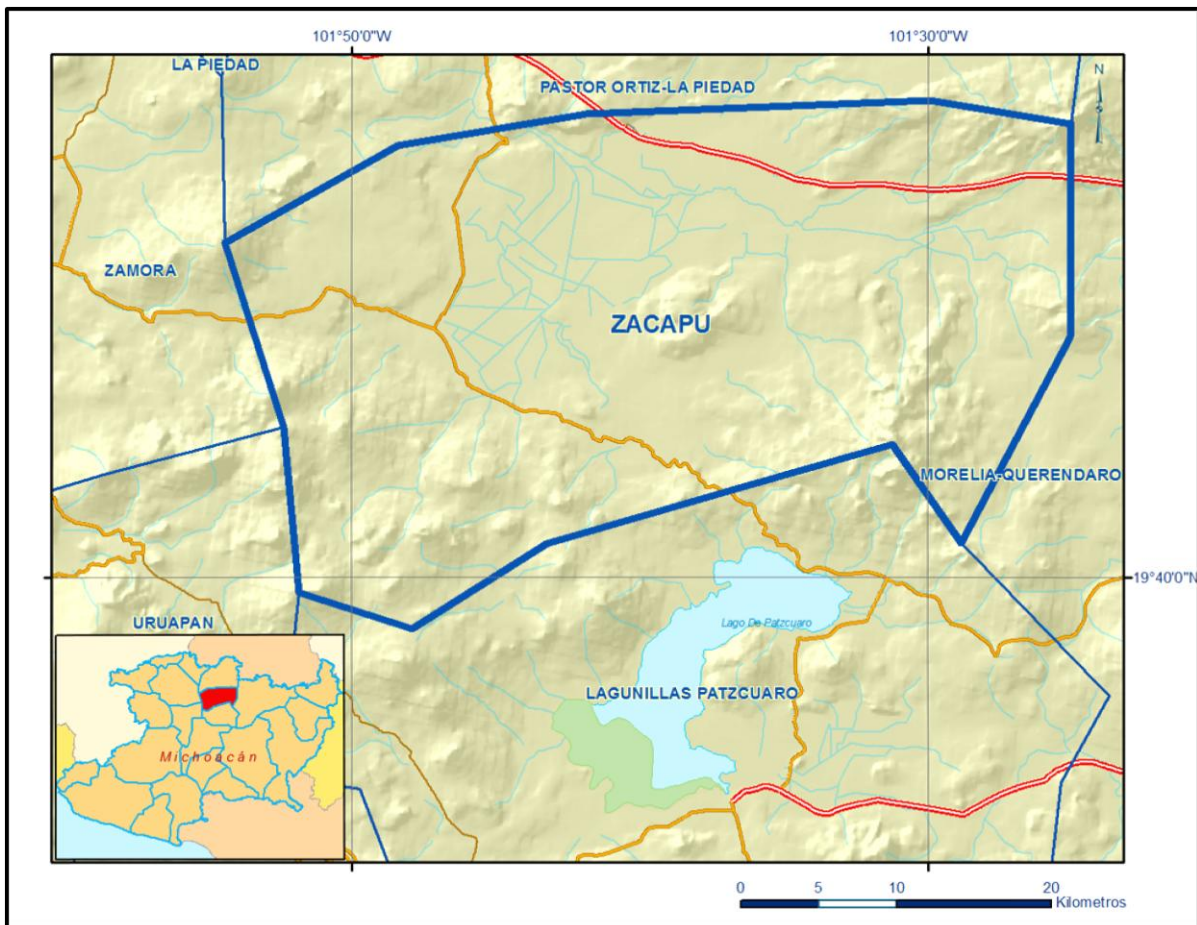


Figura 1. Localización del acuífero.

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

<b>ACUIFERO 1606 ZACAPU</b>						
<b>VERTICE</b>	<b>LONGITUD OESTE</b>			<b>LATITUD NORTE</b>		
	<b>GRADOS</b>	<b>MINUTOS</b>	<b>SEGUNDOS</b>	<b>GRADOS</b>	<b>MINUTOS</b>	<b>SEGUNDOS</b>
1	101	28	51.1	19	41	9.6
2	101	31	13.3	19	44	35.9
3	101	43	14.2	19	41	8.3
4	101	47	54.4	19	38	12.0
5	101	51	49.2	19	39	26.0
6	101	52	22.6	19	45	11.2
7	101	54	24.8	19	51	35.0
8	101	48	25.1	19	55	0.0
9	101	41	51.8	19	56	6.0
10	101	29	56.6	19	56	34.3
11	101	25	2.0	19	55	45.5
12	101	25	5.2	19	48	19.2
1	101	28	51.1	19	41	9.6

## **1.2. Situación administrativa del acuífero**

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda, el primero de tipo II y que cubre la mayor parte del territorio se denomina “*Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los Municipios del Estado de Michoacán*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de octubre de 1987.

La porción sureste del acuífero se encuentra sujeta al decreto tipo III, denominado “*Municipios de Morelia y Charo*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 10 de febrero de 1964.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos vigente para el 2009, los municipios Zacapu, Coeneo y Huaniqueo se ubican en zona de disponibilidad 7.

Dentro de los límites del acuífero se localiza una parte del Distrito de Riego Rosario-Mezquite; aún no se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca (15) Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993.

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En la zona que comprende el acuífero se han realizado estudios, 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 DE LA CUENCA LACUSTRE TERCIARIA DEL ALTIPLANO MEXICANO. CNA, 1975.**

Abarca parte del acuífero Zacapu, analiza la extensión y continuidad, las posibilidades hidrogeológicas y potenciales zonas de explotación de los depósitos Terciarios lacustres del Altiplano Mexicano.

El estudio comprende recopilación y análisis de información geológica, cartográfica y geohidrológica, así como trabajos de campo consistentes en verificación y toma de muestras de roca para su estudio palinológico y elaboración de la columna lito-estratigráfica general, se inventariaron pozos y manantiales.

Así, se determina que la litología de la zona central y suroeste, que comprende los alrededores del lago Cuitzeo, Zacapu, Ario de Rosales y Uruapan, corresponde a rocas volcánicas producto de intensa actividad volcánica de finales del Terciario e inicios del Cuaternario, tales como derrames y piroclásticos de composición basáltica; por su parte, los sedimentos lacustres se localizan a unos 30 km al oriente de Zacapu.

En general se identifican

- a) Acuíferos en relleno aluvial, depósitos lacustres y fluviales, de tipo libre o semiconfinado, dependiendo de su posición y relaciones estratigráficas en el subsuelo
- b) Acuíferos en rocas basáltico andesíticas fracturadas, en cuyos contactos con rocas de menor permeabilidad forman manantiales ocasionalmente de gasto considerable
- c) Acuífero en piroclásticos, tobas y escoria volcánica, materiales que se comportan como un medio granular

Las fuentes subterráneas resultan aptas químicamente para usarse con fines potables o de riego, tienen baja concentración de sales.

### **ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES DE ZACAPU Y PÁTZCUARO, ESTADO DE MICHOACÁN. CNA, 1981.**

El objetivo central fue evaluar el grado de explotación de los acuíferos, conocer el funcionamiento de éstos, determinar sus mecanismos de recarga y descarga y prestar atención especial a la aportación de las corrientes superficiales.

Se realizó censo de pozos, interpretación foto-geológica, reconocimientos hidrogeológicos de campo, nivelación de brocales, medición de niveles piezométricos, pruebas de bombeo, y muestreo y análisis físico químico del agua subterránea.

Desde el punto de vista geológico el acuífero Zacapu se encuentra ubicado en un graben o fosa tectónica, actualmente cubierta por material clástico no consolidado; geohidrológicamente parece corresponder a una cuenca cerrada, con una salida por Villa Jiménez.

Las unidades litológicas de alta permeabilidad corresponden a basaltos antiguos y recientes, así como a conos cineríticos, que en las zonas montañosas constituyen zonas de recarga.

El análisis de la calidad química del agua arroja baja concentración de sales por lo que resulta apropiada para cualquier fin, cumpliendo las normas establecidas para consumo humano.



El flujo subterráneo es radial convergente, proviene de las sierras limítrofes, llega a las zonas bajas y sale en dirección SE-NW, por el poblado Villa Jiménez. Con base en pruebas de bombeo se estima que la transmisividad oscila de 0.52 a  $3.91 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

El estudio concluye que la capacidad de aporte excede el volumen descargado, con unos 4.8  $\text{Mm}^3/\text{año}$  de disponibilidad adicional del acuífero. La lámina de lluvia promedio anual es 800 mm, entre 20 y 21° C la temperatura media mensual y del orden de 1753 mm/año la evapotranspiración.

Mediante aforos realizados durante el estudio, la descarga de manantiales y por bombeo de pozos y norias resulta 17.12 y 4.89  $\text{Mm}^3/\text{año}$  respectivamente.

**EXISTEN NUMEROSOS DICTÁMENES DE PROSPECCIÓN REALIZADOS EN DISTINTAS FECHAS Y PARA DISTINTOS POBLADOS Y EJIDOS, POR DIFERENTES DEPENDENCIAS, COMO EL COMAPAS, LOS AYUNTAMIENTOS MUNICIPALES, ORGANISMOS OPERADORES O USUARIOS PARTICULARES. LOS CUALES REPRESENTAN UNA FUENTE MUY VALIOSA DE INFORMACIÓN.**

Las actividades relevantes de estos dictámenes se circunscriben a sondeos eléctricos verticales de resistividad con diversa abertura AB para distintas profundidades de penetración, a un estudio de correlación geológica, ocasionalmente con análisis de fotos aéreas, y a establecer un modelo hidrogeológico local para seleccionar sitios factibles de perforación de pozos de agua de consumo humano o uso agrícola.

La información ayuda a definir la interpretación geohidrológica a escala regional no solo para encontrar mantos acuíferos potencialmente aprovechables sino también para estudiar la estructura, geometría y los mecanismos de recarga y descarga de los sistemas de flujo más importantes, así como la calidad química de sus fuentes.

La geología predominante, está constituida por rocas volcánicas con su secuencia alternante de tobas, brechas y piroclastos, de naturaleza basalto andesítico, así como por depósitos lacustres y aluviales, de granulometría y compacidad variables, que comprenden del Paleógeno-Neógeno al Reciente.

Las resistividades asociadas con rocas acuíferas varían de unas cuantas decenas a pocos cientos de ohm-m, sin llegar a rebasar los miles.

Cualitativamente se espera mayor aportación de agua y de mejor calidad en rocas volcánicas fracturadas que en depósitos lacustres o aluviones.

Las partes más inconvenientes o desfavorables hidrogeológicamente se detectan en la cabecera de la cuenca, con fuertes elevaciones topográficas y, en el mejor de los casos, con caudales inciertos y niveles piezométricos muy profundos.

Los dictámenes recomiendan perforar pozos de 150 a 350 m de profundidad. Pozos ubicados en las partes elevadas alcanzan grandes profundidades en comparación con los de las partes bajas, aunque allá se han manifestado gastos de 15 a 20 lps.

La mayor parte de estos dictámenes culmina con la construcción de las obras subterráneas, así que también fue aportada información de cortes litológicos, registros eléctricos, pruebas de productividad y análisis de calidad del agua.

En el lugar que le corresponde de acuerdo con el índice general del estudio se consigna esta información, sin lugar a dudas de sumo interés práctico.

**ACTUALIZACION HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS: MARAVATIO-CONTEPEC-EPITACIO HUERTA, ZACAPU, MORELIA-QUERÉNDARO Y PASTOR ORTIZ, EN EL ESTADO DE MICHOACÁN. 2007. INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA 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 Zacapu (1606), 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 pertenece a la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico (INEGI, 2007), abarca parte de las Sub-provincias Neovolcánica Tarasca y Sierras y Bajíos Michoacanos.

El Eje Neovolcánico se caracteriza por una gran masa de rocas volcánicas de diversa naturaleza, acumulada en innumerables y sucesivos episodios volcánicos, iniciados desde el Paleógeno-Neógeno hasta el presente, definiendo las sierras circundantes del acuífero.

Otro rasgo esencial de la provincia corresponde a las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos como el de Pátzcuaro, Cuitzeo y Totolcingo, o por depósitos de lagos antiguos.

Dentro de esta provincia se localiza casi toda la cuenca del río Lerma, quedando fuera de ella los afluentes provenientes de la Mesa del Centro.

### **3.2. Clima**

El clima se clasifica como templado subhúmedo, la temperatura media anual es de 16.12° C, mientras que la precipitación media anual es de 766.32 mm, con un período principal de lluvias de junio a septiembre. Los vientos dominantes poseen dirección noroeste, y en promedio se presentan 13 días con heladas al año.

Con base en información climatológica disponible en el Servicio Meteorológico Nacional, de la Subdirección General Técnica, de la Comisión Nacional del Agua, se seleccionan por su ubicación y período de registro, las estaciones Copándaro de Galeana (16023), Huaniqueo (16050), Puente San Isidro (16100), Santa Fe (16118), Tiríndaro (16188), Villa Jiménez (16225), Caurio de Guadalupe (16248) y Teremendo (16254), enclavadas en el estado de Michoacán.

El análisis de los promedios mensual y anual de precipitación y temperatura comprende el período 1979-2004, mientras el de la evaporación abarca de 1979 a 2002.

El promedio anual de precipitación es 766.32 mm, con 574.44 de valor mínimo registrado en el año 1996 y 957.54 como máximo acaecido en 1992. La temporada de lluvias ocurre entre los meses de junio y septiembre, con tormentas ocasionales significativas en octubre; en julio cae la mayor precipitación con 176.72 mm y marzo es el de menor, con 4.66 mm.

La temperatura anual promedio es 16.12° C, se midió 14.68° C en 1999 y 17.92° C en 1991. Se determina que mayo es relativamente el más cálido con 19.16° C en promedio, mientras enero registra 12.47° C.

La evaporación potencial promedio es de 1736.06 mm/año, 1551.97 mm es su límite inferior y se obtuvo en 1992, 1997.75 mm corresponde a su máximo registrado en 1998. Abril tiene la evaporación más grande con 204.67 mm, en cambio diciembre registra 73.91 mm.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero se ubica dentro de la Región hidrológica No. 12, Lerma-Chapala-Santiago, un escurrimiento relevante es el río La Patera, el cual, confluye poco antes de llegar a Villa Jiménez, por la margen derecha al río Angulo, de los afluentes más importantes del río Lerma.

El río La Patera tiene dirección noreste, es el dren principal de la ciénaga de Zacapu; por Villa Jiménez se asienta el Distrito de Riego No. 22 "Zacapu".

El Angulo nace de la descarga de manantiales, los más caudalosos son los que forman la Lagunas Zacapu y Tarajero.

El límite del acuífero coincide aproximadamente con el parteaguas hidrográfico de las montañas circundantes del acuífero, es una demarcación virtual.

De datos hidrométricos mensuales de 1979 y 1980, de la estación Villa Jiménez, se determinan escurrimientos sensiblemente uniformes durante el estiaje y las lluvias, deduciéndose buena permeabilidad y consecuentemente alta capacidad de infiltración de los materiales superficiales del acuífero.

El escurrimiento que aporta la Laguna Zacapu al río Angulo se estima en 1.65 m<sup>3</sup>/s durante el estiaje, el cual funciona como colector general de la cuenca y se une por la margen izquierda al Lerma, después de unos 60 km de recorrido por donde recibe las descargas de una extensa red de drenes agrícolas ubicados en la Ciénaga y en los valles de Panindícuaro y Angamacutiro, el río Angulo es aprovechado por el embalse de la Presa Melchor Ocampo.

### **3.4. Geomorfología**

Se distinguen dos rasgos geomorfológicos representativos, cerril y valle; el primero y más destacado, se origina por abundantes efusiones volcánicas basálticas que surgieron a través de estructuras fisurales y se encuentran a las mayores altitudes en la porción sur-suroeste del acuífero, representadas por los cerros. El Tecolote con 3360 msnm ubicado al oriente de Zacapu y El Tule, al noroeste, con 3100 msnm, así como por El Angaruen, Partidas, La Curinda, La Curindita, Mesteño, El Pilón, El Capen y Caratacua con 3100 msnm de altura promedio, localizados al sureste, sur y suroeste de la comunidad La Mojonera. Otros tienen elevaciones de 2300 a 2800 msnm, están circundando los valles, corresponden a volcanes compuestos acompañados por conos cineríticos en sus laderas.

Al noreste de Zacapu con amplia distribución espacial se observan efusiones volcánicas de

malpaís y abundantes depresiones o cavidades de forma irregular y variadas dimensiones; igualmente, por la comunidad Comanja se manifiestan estos mismos rasgos geomorfológicos pero de menor extensión.

Dos depresiones originadas por calderas de unos 500 m de diámetro contienen lagos pequeños, se conocen como Hoya Alberca, uno se ubica en la comunidad La Estación y otro al oriente de la de La Alberca o Lienzo Charro.

Las rocas de estas estructuras, es de origen basáltico con algunos componentes andesíticos.

El segundo rasgo no menos importante concierne al relieve plano del valle o Ciénaga de Zacapu con 2000 msnm de altura promedio y muy baja pendiente que desciende en dirección norte, hacia Villa Jiménez; en el límite sur del acuífero existen valles intermontanos de menor amplitud ubicados entre 2400 y 2700 msnm de altitud.

Los valles se rellenaron por materiales de granulometría, espesor y grado de compacidad variados.

El drenaje superficial es radial a subdendrítico, influenciado por las propias estructuras rocosas, con cauces angostos poco profundos, de régimen intermitente torrencial, que desaparecen al aproximarse al valle, lo cual es indicativo de la buena permeabilidad prevaleciente en los materiales granulares del mismo.

#### **4. GEOLOGÍA**

Las características geológicas del acuífero son las mismas que las del Eje Neovolcánico, principalmente de carácter explosivo, cuyas emisiones cubrieron el basamento pre-existente y están representadas por rocas de composición andesítica.

Durante el Paleógeno-Neógeno y Cuaternario la actividad volcánica cambio su composición andesítica a basáltica con alternancia de derrames, brechas y piroclásticos finos a medios, que originaron conos cineríticos.

La figura 2 ilustra la geología general, la cual se soporta en gran parte por la base cartográfica del INEGI.

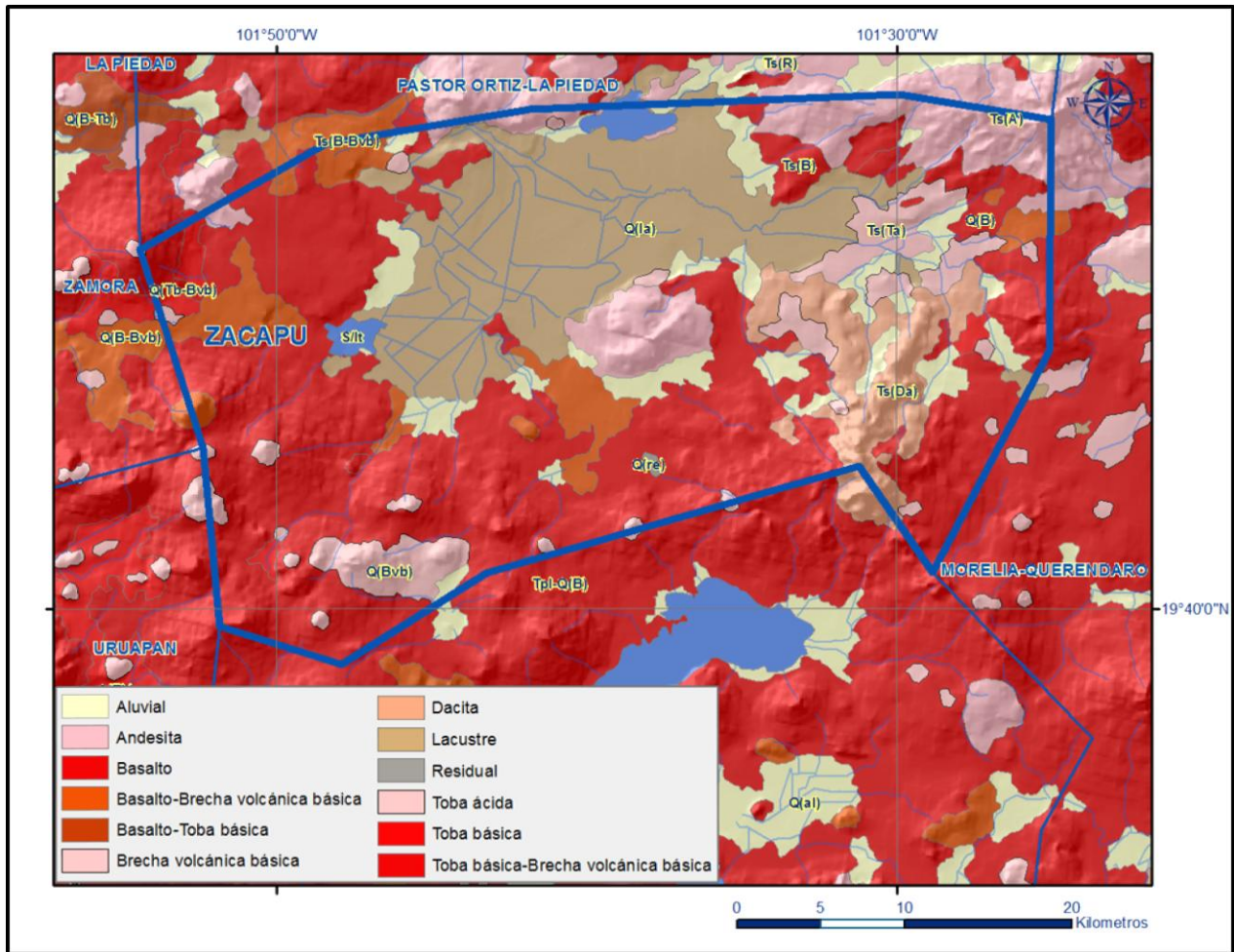


Figura 2. Mapa Geológico

#### 4.1. Estratigrafía

De acuerdo con información litológica, afloran rocas ígneas extrusivas del Eje Neovolcánico, del Neógeno al Cuaternario, la información es muy general, a escala regional.

##### Rocas ígneas Paleógeno-Neógenas

Las rocas más antiguas expuestas corresponden a tobas ácidas **Ts(Ta)** que están cubiertas por dacitas **Ts(Da)**, sobre las que descansan brechas basálticas **Ts(Bvb)** y una alternancia de basaltos y brechas **Ts(B-Bvb)**, que a su vez taparon los derrames andesíticos **Ts(A)** y de basalto **Ts(B)**, por último las manifestaciones basálticas del plioceno **TplQ(B)** cubrieron las unidades anteriores.

##### Rocas ígneas Cuaternarias

Durante el Cuaternario se cubrió la secuencia Paleógena-Neógena por un vulcanismo esencialmente de composición basáltico, constituido en forma alternante por tobas **Q(Tb)**,

piroclásticos, tobas básicas y brechas volcánicas **Q(Tb-Bvb)** y **Q(Bvb)**, y por derrames **Q(B)** y **Q(B-Bvb)**.

Tienen distribución amplia, forman estructuras cónicas compuestas y cineríticas.

#### **Sedimentos lacustres Q(la)**

Sobre los derrames y piroclásticos basálticos se depositaron sedimentos lacustres de limo y arcilla, de espesor y compacidad variable; se observan en el valle.

#### **Suelos residuales Q(re)**

Son producto de la alteración de rocas basálticas, están constituidos por arcilla y arena fina, con empaquetamiento de fragmentos de diverso tamaño, alterados, afloran localmente al sur de la colonia Benito Juárez.

#### **Aluvión Q(al)**

Se ubican en las partes bajas, consisten de arena, limo y arcilla, tienen unos cuantos cm a decenas de metros de espesor.

### **4.2. Geología Estructural**

El acuífero está inmerso en la tectónica y estructura geológica del Eje Neovolcánico, representada por grandes estratovolcanes, al sur, asentados en lineamientos con orientación noroeste-sureste, y por fosas tectónicas en su porción norte.

Los estratovolcanes se originan a través de fracturamientos corticales.

El vulcanismo también se relaciona con la subducción de la Placa de Cocos, modelo de arco magmático intra-cratónico sin deformación compresional, solo afectado por una fase de tensión a causa de la inestabilidad sísmica de la actual margen convergente Pacífica.

Esa fase tensional originó fallas, fisuras y aparatos volcánicos como estratovolcanes y conos cineríticos a través de los cuales surgieron grandes masas de roca calco-alcalina basalto andesita dacítica.

Por otro lado, la geotectónica distensiva Plio-cuaternaria, en el norte de Michoacán, es tipo vertical diferencial con fallas corticales escalonadas, dando lugar a la formación de cuencas endorreicas y fosas tectónicas.

El acuífero Zacapu pertenece a estas últimas estructuras, con fallas de tipo normal, rumbo noreste-suroeste e inclinaciones no mayores a 55°.

### 4.3. Geología del subsuelo

La descripción estratigráfica descrita, proporciona una base de lo que se puede encontrar en el subsuelo del área. Se presentan secciones geológicas esquemáticas en las Figuras 3 y 4.

El basamento litológico está constituido por rocas marinas de origen carbonatado y clástico, **Ks**, como caliza, lutita y margas, ubicadas a unos 1000 m de profundidad, se originaron en el Cretácico Superior.

Sobreyacen discordantemente rocas Paleógenas-Neógenas de composición basáltica **Ti(B)** de unos 200 m de espesor. En la parte oriental del acuífero se acuña una estructura formada por derrames y piroclastos andesíticos **Ti(A)**.

Igualmente, con geometría irregular descansan de manera discordante depósitos lacustres **Tl(cg)**, con abundancia de conglomerados rojos de poco espesor. En forma alternante se infieren los mismos depósitos lacustres con intercalaciones de clásticos medios a finos **Tl(arc-ars)**, los cuales afloran al oeste de Huaniqueo, su espesor estimado es 500 m.

Cubren los lacustres un lente de tobas pumíticas **Tl(tbpu)** de igual origen, con unos 200 m de espesor. Les siguen piroclastos **Ts(R)**, derrames, ignimbritas y vidrios volcánicos de composición riolítica, de hasta de 500 m de espesor.

Del Neógeno se tienen derrames y piroclastos basálticos **Ts(B)** de gran espesor. Finalmente, arriba de la secuencia general referida se encuentran basaltos y sedimentos lacustres del Cuaternario **Q (hola)**, bien expuestos en las zonas bajas.



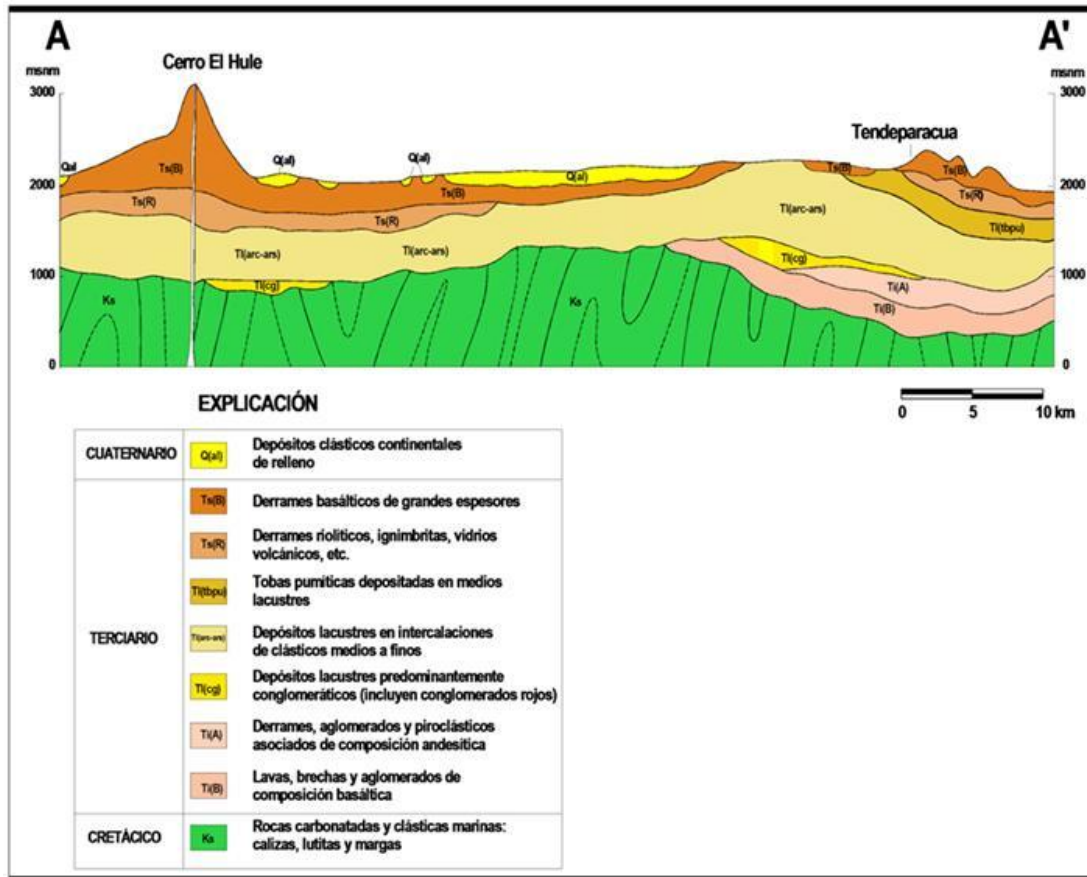


Figura 3. Sección geológica A – A'

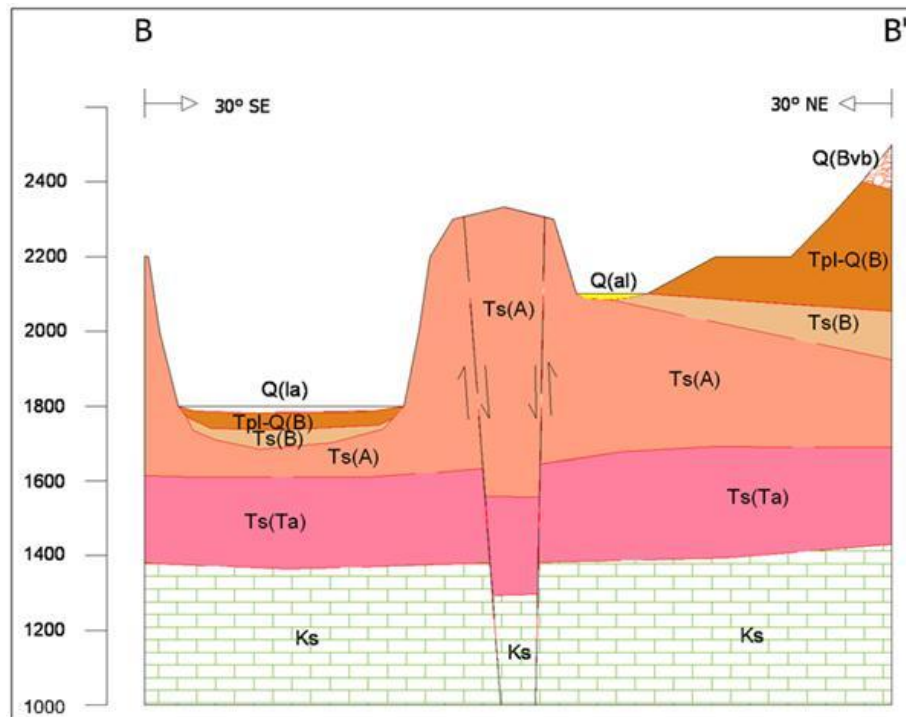


Figura 4. Sección geológica B – B'

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1. Tipo de acuífero**

En función del análisis geológico, geofísico, hidrodinámico y piezométrico se determina que el acuífero es de tipo libre o freático a escala regional, con presencia de semiconfinamiento local.

Probablemente los tipos de material encontrados en el subsuelo saturado y permeable se encuentran interconectados hidráulicamente funcionando como una sola unidad hidrogeológica.

Por sus enormes dimensiones y grado de fracturamiento relativamente desarrollado, revisten más importancia hidrológica las rocas de origen volcánico que los materiales lacustres o de relleno.

### **5.2. Parámetros hidráulicos**

Las características hidráulicas se estimaron a partir de pruebas a gasto constante y escalonado, en régimen transitorio, para acuíferos confinados o libres de espesor saturado mucho mayor que los descensos provocados por el bombeo, las pruebas corresponden a pozos representativos del acuífero.

Son ensayos útiles para estimar la conductividad hidráulica horizontal, el coeficiente de transmisividad, las pérdidas de carga de formación y construcción, así como el grado de eficiencia del pozo de bombeo en relación con aspectos de diseño o problemas de obturación y deterioro de la rejilla.

Se realizaron con motivo de la actualización del estudio de 2007, cinco pruebas a gasto constante, con duración variable, tendiendo a lo mayor posible, lo que obedeció a la disponibilidad del equipo del pozo

#### **Transmisividad (T)**

El coeficiente de transmisividad representa la cantidad de agua que fluye en el subsuelo saturado, es función directa del espesor saturado y la conductividad hidráulica, el rendimiento de pozos mucho depende de este parámetro.

En la porción centro poniente del acuífero, varía entre 2 y 20, con distribución local de  $40 \text{ a } 90 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , de  $1.5 \text{ a } 30 * 10^{-3}$  en la parte sur oriental, entre 2 y  $15 * 10^{-3}$  en la zona norte, y de 2 a  $5 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  en el límite noreste.

El promedio regional es  $6.8 * 10^{-3}$  y  $35.1 * 10^{-3}$ , ó  $20.95 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  como media global.

***Coefficiente de almacenamiento y rendimiento específico (S y Sy)***

El coeficiente de almacenamiento se define como la cantidad de agua que puede ser obtenida por bombeo o drenaje.

A nivel regional el acuífero es de tipo libre con 0.13 de rendimiento específico estimado.

Desde el punto de vista local se detectan acuíferos semi-confinados cuyo coeficiente de almacenamiento se aproxima a 0.0075.

Los primeros contienen o ceden mayores volúmenes de agua por superficie y descenso piezométrico unitario del acuífero, además de que se recargan más fácilmente.

**Conductividad hidráulica ( $K_H$ )**

En las porciones norte y oriente del acuífero varía entre  $1.0$  y  $5.0 * 10^{-5} \text{ m/s}$ , de  $5.0$  a  $20.0 * 10^{-5}$  en la zona de riego de la porción central del valle, hacia el sur entre  $2.0$  y  $30.0 * 10^{-5}$ , y entre  $2.0$  y  $50.0 * 10^{-5} \text{ m/s}$  en la porción oeste, hacia Zacapu se encuentran las rocas más permeables. Los promedios son  $3.64 * 10^{-4}$  para las pruebas de aforo y  $8.86 * 10^{-5}$  para las de bombeo, con  $22.63 * 10^{-5} \text{ m/s}$  de valor medio general.

El caudal específico y gasto de pozos es directamente proporcional a la permeabilidad.

Los resultados descritos varían conforme a la naturaleza desigual de los materiales acuíferos.

**5.3. Comportamiento hidráulico**

A escala regional, el acuífero es de tipo libre, y localmente es de tipo semiconfinado. Las rocas de origen volcánico, por su amplia distribución y grado de fracturamiento muy desarrollado, son las que presentan mayor importancia hidrológica, por encima de los materiales lacustres o de relleno.

**5.4. Piezometría**

Se utiliza la información piezométrica obtenida durante el levantamiento del censo de pozos, actividad realizada durante los meses de noviembre y diciembre de 2007, y los niveles estáticos anteriores disponibles de obras piloto que se correlacionaron razonablemente con la numeración actual asignada.

### 5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para 2007 se presenta en la Figura 6. Los niveles se encuentran a muy poca profundidad en la mayor parte del acuífero, varía entre 5 y 2 m en el límite norte, entre 3 y 10 en el lado sur, entre 3 y 10 en el lado oriente, y de 3 a 5 m de profundidad al occidente.

Como se puede deducir, la evapotranspiración de agua freática es una de las descargas principales del acuífero.

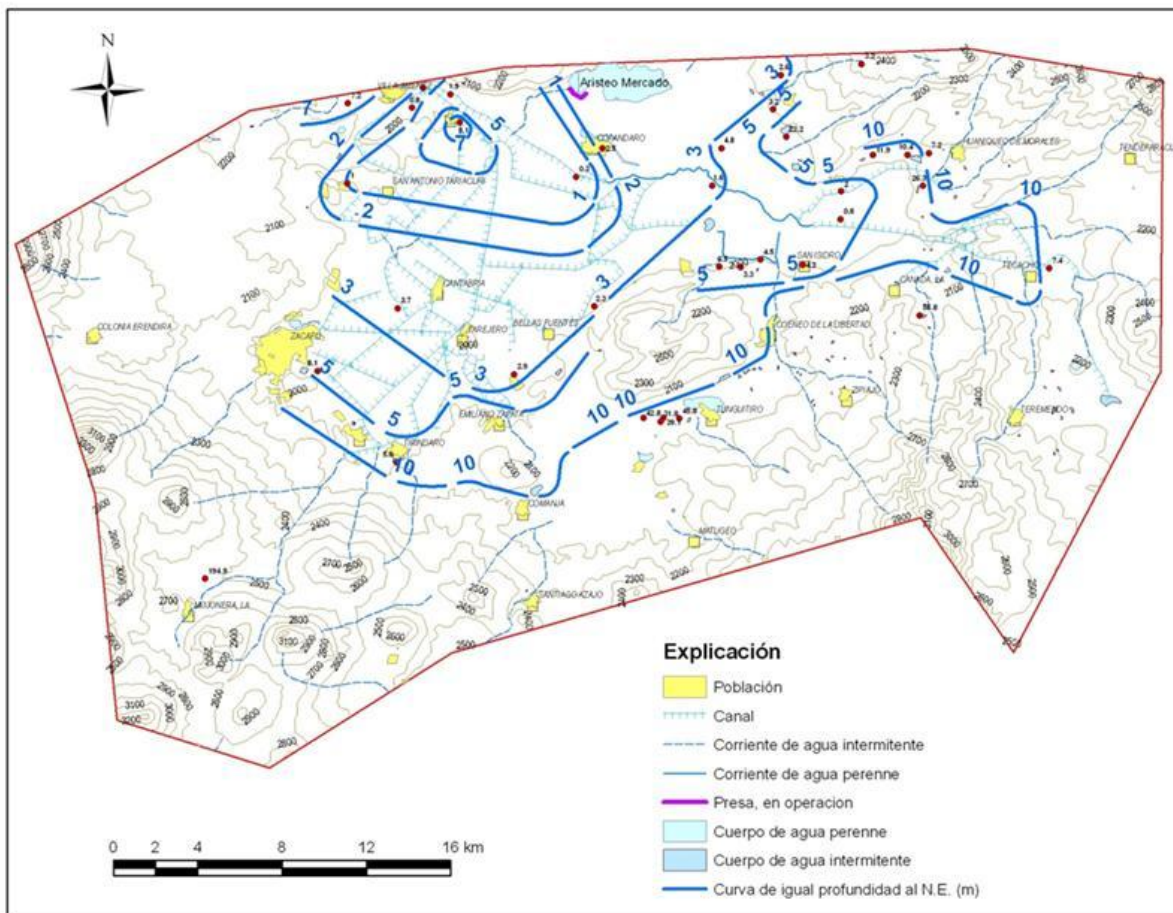


Figura 6. Profundidad al nivel estático (m), 2007

### 5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración del nivel estático, Figura 7, muestra que el flujo del agua subterránea es radial concéntrico, en los bordes del acuífero la equipotencial es 2015 y 1988 msnm en la zona central del mismo.

Se observa asimismo que no existen salidas subterráneas sino que el flujo de agua procedente de las porciones montañosas limítrofes va a parar al valle, siendo desalojado a través de manantiales y por evapotranspiración.

El esquema piezométrico revela condiciones estables o de equilibrio, y gradientes hidráulicos moderados o relativamente bajos debido a la buena permeabilidad del acuífero.

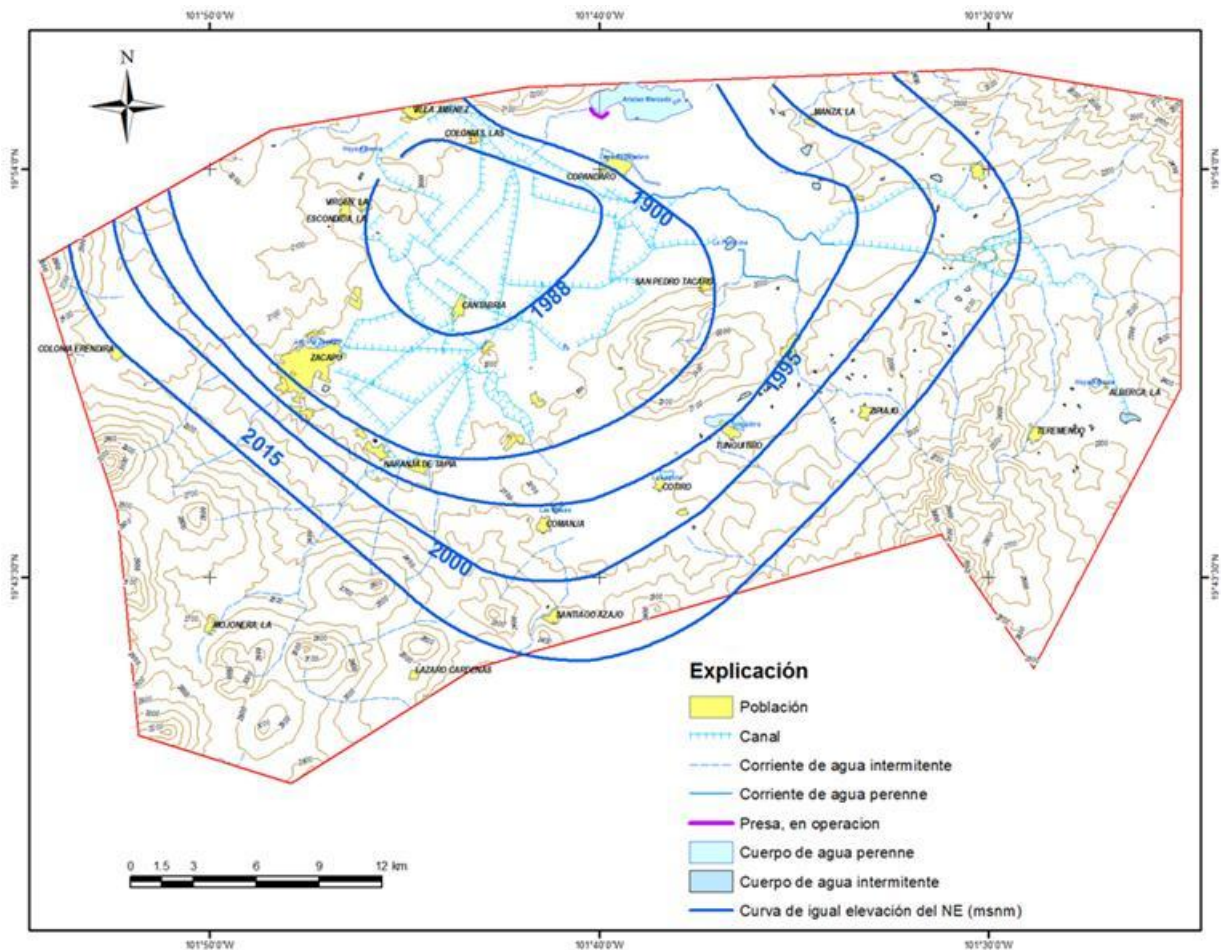


Figura 7. Elevación del nivel estático (msnm), 2007



### 5.4.3. Evolución de nivel estático

Existen pocos registros de niveles de agua, solo se identifican pozos aislados con datos piezométricos a partir de los cuales se elabora la configuración relativa al lapso 1982 - 2007, Figura 8.

La evolución piezométrica sugiere condiciones estables de la posición del nivel, o recuperaciones entre 0.5 y 5.0 m, entre 0.5 y 4.0 m y del orden de 0.5 m al noreste, sur y zona central del acuífero, respectivamente; en su flanco sur occidental se infiere una posición constante del nivel sin cambio apreciable.

En las partes altas se observa localmente 11.0, 5.35 y 6.28 m de recuperación, y 0.30 m en el valle; el periodo de análisis es 1982-2007.

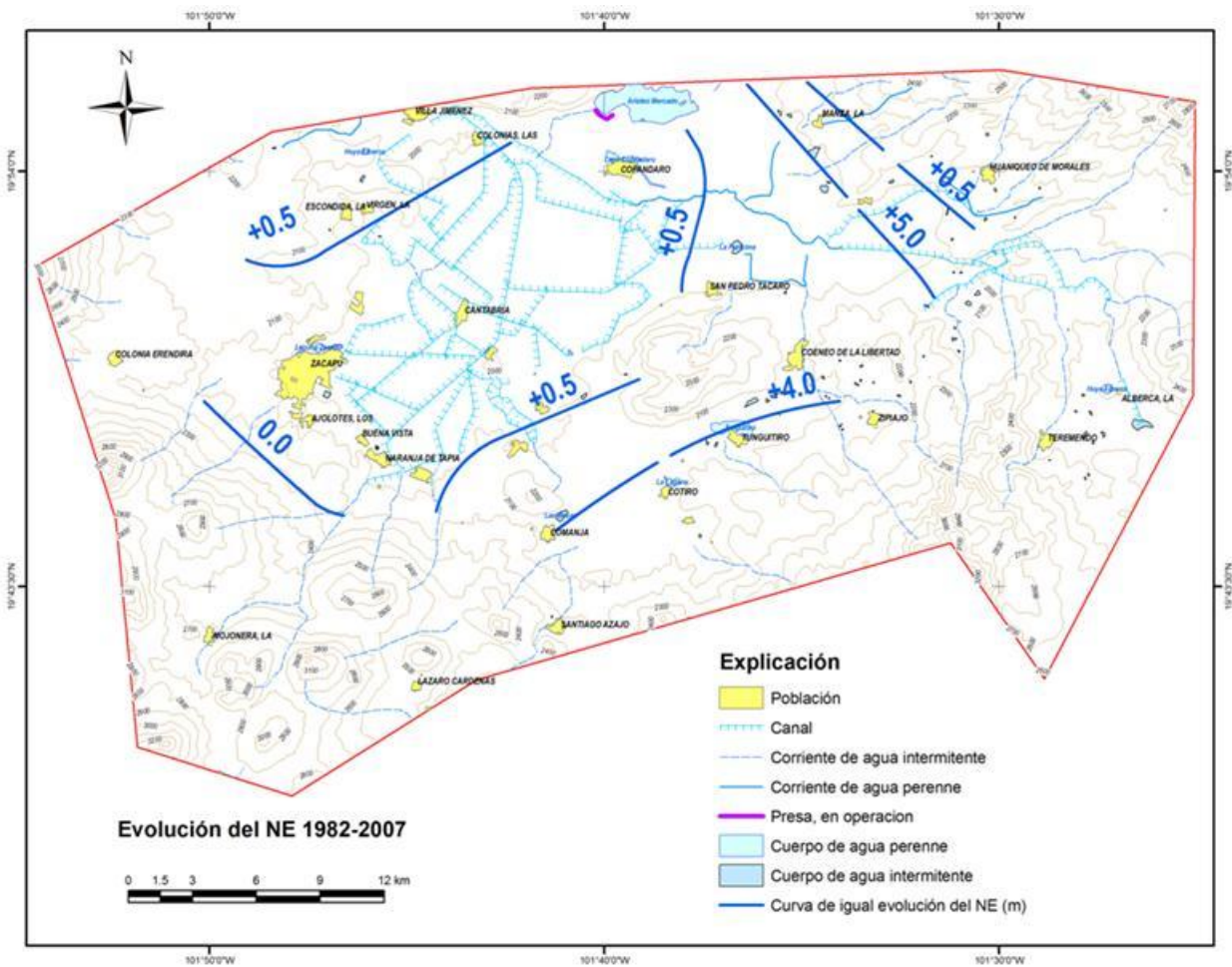


Figura 8. Evolución del nivel estático (m), 1982 – 2007

Los hidrógrafos a su vez manifiestan ascensos de nivel en los pozos 39, 52, 56, 62, 88, 90, 96, 116 y 142; su comportamiento es congruente y consistente con el de la evolución. Los pozos 63 y 132 muestran abatimiento de nivel.

No es posible concluir con suficiente confiabilidad, por la escases de datos, cual es el comportamiento estacional o periódico entre lapsos de recarga y descarga del acuífero; sin embargo, por el análisis hidrogeológico global, se estima que a largo plazo el esquema hidráulico se mantiene invariable, lo cual quiere decir que prevalece un escenario de equilibrio hidrodinámico.

Se deduce una evolución media regional de +0.25 para el lapso 2006 - 2007.

### **5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

El agua subterránea tiene baja salinidad, 375.5 ppm de SDT como promedio, lo que refleja poco tiempo en el subsuelo, distancias cortas de recorrido y la naturaleza volcánica del acuífero, la concentración de unos 200 mg/l corresponde a la zona montañosa, y de 250 a 400, a la parte baja donde ocurre la evapotranspiración.

Se detecta la interacción con minerales de rocas volcánicas; así, el calcio lo proveen las plagioclasas cálcicas, el vidrio volcánico y la atmósfera.

De acuerdo con el diagrama de *Piper*, el agua es bicarbonatada cálcica, que los solutos tienen origen volcánico y que esto es congruente con el marco físico del acuífero.

Los análisis sugieren en términos generales que el agua subterránea es apta para fines potables. Los contenidos de hierro y cadmio están por debajo de los límites permisibles, de acuerdo a la Norma de Calidad del Agua NOM-127-SSA1-1994.

La relación de adsorción de Na del agua subterránea, resultó tipo S1, baja en el mismo, por lo que puede usarse en la mayor parte de suelos con escasa posibilidad de alcanzar elevada concentración de este elemento. Se deduce del diagrama de Wilcox, que relaciona la salinidad y el índice RAS (Relación de adsorción de Sodio), la aceptación del agua para fines agrícolas.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS**

Como parte de las actividades del estudio de 2007, se censaron 155 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 67.74% son pozos, 17.42% manantiales y el 14.84% norias.

El 58.60% de los aprovechamientos son de uso público urbano o agua potable, 24.20% de uso agrícola, 4.46% para fines domésticos, 7.01% se destinan a actividades diversas y el 5.73% se encuentran inactivos. En cuanto a su equipamiento, el 85.16% de los aprovechamientos cuentan con motor eléctrico, 17.16% tiene motor a gasolina, 0.65% es de molino de viento y 13.55% no tienen.

El 48.39% de los equipos son sumergibles, 27.10% de turbina, 7.10% verticales, 1.94% motobombas, 1.94% caseras y 13.55% no tienen.

La profundidad de los pozos fluctúa entre 16 y 320 m, predomina la de 21 a 150 m de profundidad.

Los diámetros de descarga van de 1/2 a 12", aunque los que más abundan son de 3, 4 y 8".

Los caudales de extracción fluctúan entre 0.5 y 280.0 lps, predominando entre 5.5 y 20.0 lps.

Los gastos de cientos de lps corresponden a descarga de manantiales, estos participan de manera muy importante en las salidas totales de agua del acuífero.

Para determinar los volúmenes de extracción, se emplearon los métodos gasto-tiempo de operación, lámina media de riego aplicada, dotación doméstica y potable y aforo aproximado de manantiales.

El bombeo a través de pozos y norias se estima en 23.0 hm<sup>3</sup>/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:



### **Entradas (E) – Salidas (S) = Cambio de almacenamiento**

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:

### **Recarga total (Rt) – Descarga total (Dt) = Cambio de almacenamiento ( $\pm\Delta V_s$ )**

$\Delta V_s$  es el cambio de almacenamiento definido como  $\Delta V_s = A_B * h_N * S$ ,  $A_B$  es el área de balance geohidrológico,  $h_N$  es la evolución de nivel estático promedio relativa al intervalo y área considerados, positivo cuando sufre recuperación y negativa en caso contrario,  $S$  es el coeficiente de almacenamiento.

#### **7.1. Entradas**

Las entradas o recarga total (Rt) está dada por flujo horizontal (Eh), infiltración efectiva por lluvia (Rv), pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable (Rp) y por retornos de riego en la superficie agrícola (Rrr).

La recarga (Rt) del acuífero es la diferencia algebraica entre su descarga total y cambio de almacenamiento subterráneo relativo a un determinado intervalo de tiempo, generalmente un año para incluir periodos de estiaje y lluvia.

##### **7.1.1. Recarga vertical**

La principal fuente de recarga es la precipitación a través del mecanismo de la infiltración. Sin embargo es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

En términos explícitos, la ecuación de balance geohidrológico aplicable al acuífero Zacapu queda de la siguiente forma.

$$(Eh + Rv + Ri) - (B + Sh + ETR + Qb + Sm) = \pm\Delta V_s$$

$$Rv = (B + Sh + ETR + Qb + Sm) - (Eh + Ri) \pm\Delta V_s$$

$$R_t = R_v + E_h + R_i$$

La recarga total ( $R_t$ ), es la recarga natural o vertical ( $R_v$ ),  $E_h$  y  $S_h$  son las entradas y salidas subterráneas,  $B$  es el bombeo,  $R_i$ ,  $\Delta V_s$  y  $ETR$ , la recarga inducida abarca tanto las pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable, como los retornos de riego en la superficie agrícola, el cambio de almacenamiento subterráneo y la evapotranspiración real de la superficie freática, respectivamente.  $Q_b$  es la descarga por flujo base de corrientes perennes y  $S_m$  la salida a través de manantiales.

### 7.1.2. 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 llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos.

Para estimar las entradas por flujo lateral se aplica las ecuaciones de continuidad y Darcy, simplificando y agrupando términos tiene la representación final.

$$Q = T i B$$

$Q$  y  $B$  es el gasto y ancho de los canales de flujo,  $i$  su gradiente hidráulico horizontal definido como  $i = (h_2 - h_1)/L$  donde  $(h_2 - h_1)$  es la pérdida de carga y  $L$  la distancia mínima entre equipotenciales consecutivas,  $T$  es el coeficiente de transmisividad que le corresponde, las unidades de medida de las variables involucradas deben ser dimensionalmente homogéneas.

La Figura 9 muestra los canales de flujo para noviembre de 2007, el caudal total es la suma de los gastos individuales, la Tabla 2 presenta los parámetros, el gasto y volumen anual de cada canal. La entrada total por flujo horizontal es de  $\approx 81.2 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

La transmisividad se estimó a partir de la geología y de pruebas de aforo y bombeo, representa la cantidad de agua que fluye en el subsuelo saturado, es el producto de la conductividad hidráulica horizontal y el espesor efectivo. Se definieron 20 canales de flujo cuyas características geométricas e hidráulicas se presentan en la citada tabla.

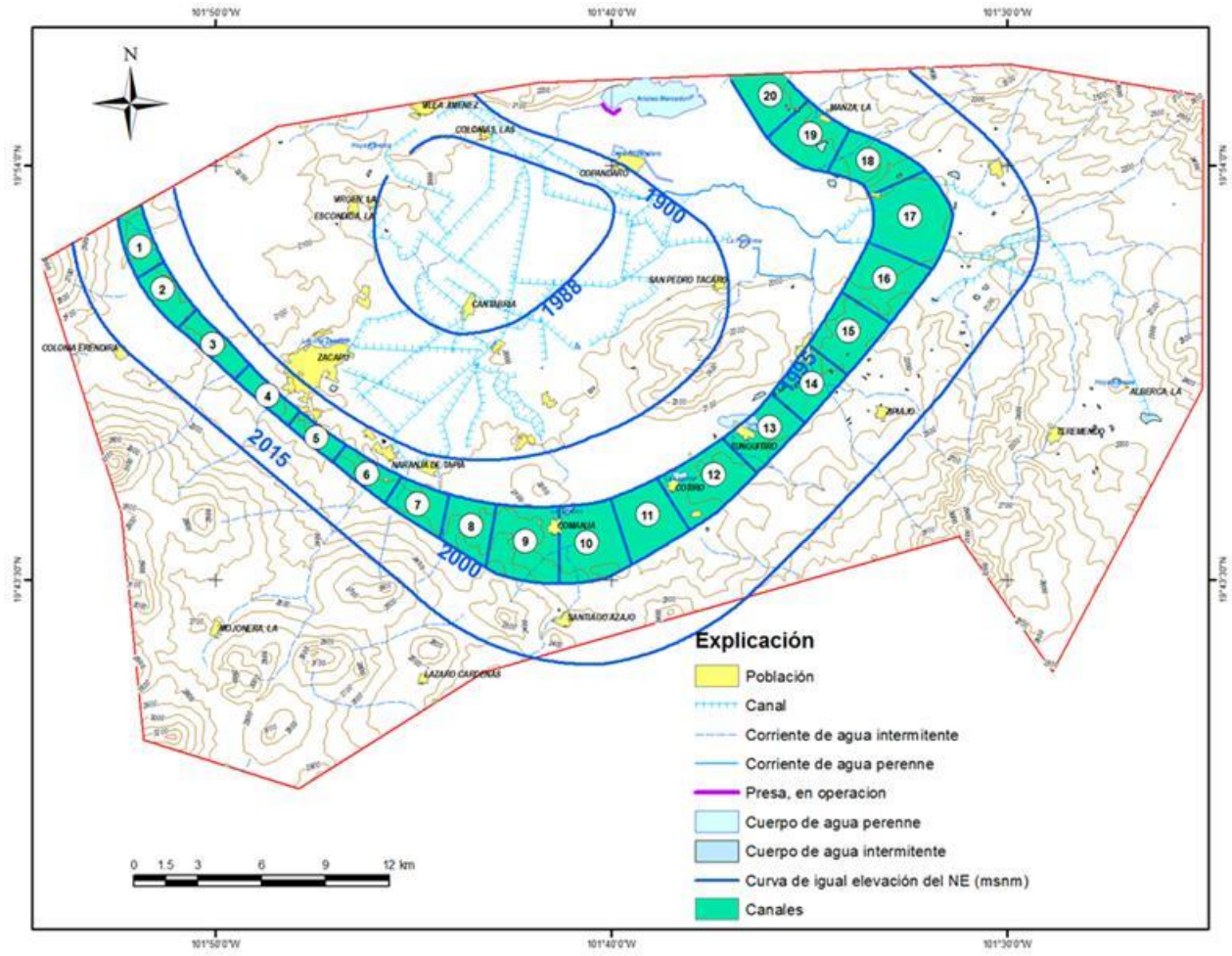


Figura 9. Red de flujo subterráneo (2007)

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo horizontal

Canal	Longitud	Ancho	delta h m	Gradiente	T	caudal (m <sup>3</sup> /s)	V
	[m]	[m]		[m/m]	[m <sup>2</sup> /s]		(hm <sup>3</sup> /año)
1	3000	1500	5	0.00333333	0.022	0.22	6.9
2	3000	1500	5	0.00333333	0.022	0.22	6.9
3	3000	1300	5	0.0038462	0.022	0.25	8.0
4	3000	1300	5	0.0038462	0.022	0.25	8.0
5	3000	1400	5	0.0035714	0.022	0.24	7.4
6	3000	1500	5	0.00333333	0.022	0.22	6.9
7	3000	1600	5	0.003125	0.013	0.12	3.8
8	3000	2500	5	0.002	0.013	0.08	2.5
9	3000	3700	5	0.0013514	0.013	0.05	1.7
10	3000	3700	5	0.0013514	0.013	0.05	1.7
11	3000	3000	5	0.0016667	0.013	0.07	2.0
12	3000	3100	5	0.0016129	0.013	0.06	2.0
13	3000	2300	5	0.0021739	0.029	0.19	6.0
14	3000	2300	5	0.0021739	0.029	0.19	6.0
15	3000	2700	5	0.0018519	0.029	0.16	5.1
16	3000	3000	5	0.0016667	0.029	0.15	4.6
17	3000	4000	5	0.00125	0.003	0.01	0.4
18	3000	2900	5	0.0017241	0.003	0.02	0.5
19	3000	2900	5	0.0017241	0.003	0.02	0.5
20	1500	2100	5	0.002381	0.003	0.01	0.3
							<b>81.2</b>

Como resultado se obtuvo un valor de **81.2 hm<sup>3</sup>/año** que representa las entradas por flujo horizontal a la zona de balance de aguas subterráneas.

### 7.1.3. Recarga inducida

Aun en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen de agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego. Para este caso, se aplican a la agricultura de riego aproximadamente 5.6 hm<sup>3</sup>/año de agua subterránea de pozos y manantiales; se supone que 15% de este volumen regresa al acuífero como recarga inducida natural. La recarga por retornos de riego equivale a  $R_{rr} = 0.8 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

El aprovechamiento del acuífero y de los manantiales para fines municipales o de uso público urbano y domestico es estimado en 47.52 hm<sup>3</sup>/año; de este volumen, se asume que 30% retorna al acuífero por fugas en las líneas de conducción y en las redes de distribución de los

abastecimientos potables. Lo que para los sistemas de aprovisionamiento representan pérdidas de agua, para el acuífero significan lo contrario; se considera una recarga inducida natural. Por lo tanto,  $R_p \approx 14.3 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

El total de la Recarga inducida es de **15.1  $\text{hm}^3/\text{año}$** .

## 7.2. Salidas

### 7.2.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración representa la cantidad de agua liberada del suelo a la atmósfera debido a la evaporación y transpiración de las plantas; es una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración, una considera el contenido de humedad en el suelo (evaporación potencial) y otra se refiere al uso consuntivo de las plantas (evapotranspiración real).

Hipotéticamente, a 10 m de profundidad al nivel freático, la evapotranspiración es nula, por el contrario, si el nivel se encuentra en la superficie del terreno es máxima.

Para el cálculo de la lámina de evapotranspiración real se utiliza la ecuación de *Turc* que toma en cuenta los valores medios anuales de temperatura y precipitación, de  $15.6^\circ \text{C}$  y  $748.2 \text{ mm}$ .

**Ecuación de Turc**

$$ETR \text{ ( mm )} = \frac{P \text{ ( mm )}}{\sqrt{0.90 + \left( \frac{P^2 \text{ ( mm )}}{L^2} \right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	16.12		
P(mm) =	766.32	P <sup>2</sup> =	587246.3424
L =	912.44	L <sup>2</sup> =	832551.583
AREA, KM <sup>2</sup>	538.07		
ETR, mm	604.82		78.92%

L es un parámetro adimensional definido por un polinomio cúbico, función de la temperatura anual media.

El 78.92% de la lluvia anual regresa a la atmósfera por el mecanismo de la evapotranspiración real, estimada en 604.82 mm.

La evapotranspiración corresponde a pérdida de agua freática somera, es una salida en la ecuación de balance geohidrológico, tiene influencia hasta 10 m de profundidad al nivel freático.

Se asume que la ETR y PNF siguen la relación lineal de la Figura 10.

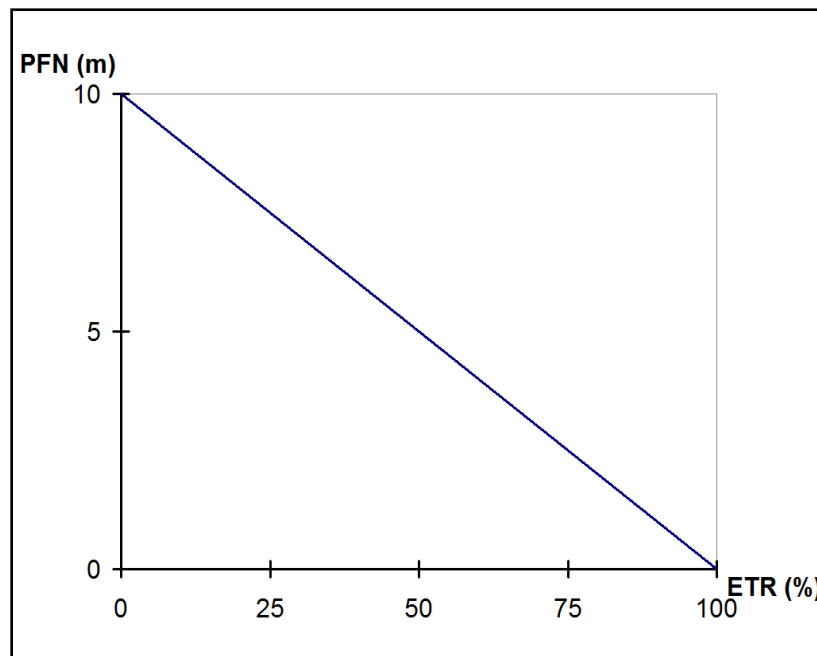


Figura 10. Relación entre la evapotranspiración real y la profundidad al NF.

A menor profundidad al nivel freático mayor será el % de ETR. Se adopta un promedio entre curvas de igual profundidad al nivel freático a partir del cual se determina el % de ETR del gráfico de arriba, se estima el área entre curvas y se obtiene el volumen correspondiente por medio del producto de ésta y la lamina y % de ETR.

La Tabla 3 muestra su procedimiento numérico y el resultado global de ETR.

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración.

Intervalo curvas (m)	$\bar{NF}$ , m	% DE AREA DE INFLUENCIA	AREA NETA, km <sup>2</sup>	% ETR	ETR, m	ETR, Mm <sup>3</sup> /año
0 - 1	0.75	10.00	53.81	60.00	0.605	19.53
1 - 2	0.75	15.00	80.71	60.00	0.605	29.29
2 - 3	2.50	20.00	107.61	50.00	0.605	32.54
3 - 5	4.00	20.00	107.61	40.00	0.605	26.03
5 - 10	7.50	35.00	188.32	20.00	0.605	22.78
<b>S</b>		100.00	538.07			130.174
$\bar{X}_p$	3.10			46.00	0.605	

ETR resulta de  $\approx 130.2 \text{ hm}^3$  anuales.

### 7.2.2. Bombeo

La salida del acuífero por el bombeo de pozos y norias es del orden de  $23.0 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

### 7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal

La red de flujo de la Figura 10 muestra la inexistencia de salidas subterráneas hacia acuíferos contiguos, por lo tanto, no existe flujo subterráneo de salida.

### 7.2.4. Flujo base

Son seis corrientes superficiales que tienen gasto base, la Tabla 4 muestra el nombre y la longitud media de cada una, se admiten características hidrogeológicas similares para todas.

Tabla 4. Corrientes perennes.

Corriente	Desarrollo, km
A. Grande	6
La Patera	11
La Cal	6
La Haciendita	4
La Manza	4
Los Cinco Sauces	3
<b>Total</b>	<b>34</b>

El flujo base es una salida de agua subterránea convertida en escurrimiento superficial, es máximo al inicio de estiaje, desciende o desaparece durante lluvias.

Eventualmente esos arroyos pueden convertirse en corrientes influentes si la posición relativa de los tirantes del río llegan a ascender por arriba de los niveles freáticos del acuífero marginal, lo que suele ocurrir en época de lluvias intensas.

La magnitud y funcionamiento del gasto base aportan información valiosa sobre las características hidrogeológicas de la cuenca, en particular sobre la capacidad de los acuíferos marginales.

Se supone que las corrientes perennes atraviesan el espesor de los acuíferos freáticos someros, que 50% de su caudal proviene de los excedentes de riego con agua superficial y que la diferencia corresponde al gasto base efectivo del acuífero.

En realidad, las curvas de recesión dependen del grado de penetración de la corriente en el acuífero.

La conductividad hidráulica promedio aproximada es  $5.0 \cdot 10^{-4}$  m/s, valor coherente con la litología de los materiales y con las estimaciones derivadas de los aforos y pruebas de bombeo, se asocia con arenas limpias uniformes de tamaño medio y grueso, o rocas volcánicas con fracturamiento avanzado.

No se dispusieron de datos hidrométricos directos a partir de los cuales se hace el análisis de hidrogramas, separando el escurrimiento directo del flujo base con mayor grado de exactitud.

Estudios de zonas similares arrojan un 30% de flujo base del total de una corriente, lo que manifiesta la importancia geohidrológica de la cuenca.

La capacidad de almacenamiento del acuífero marginal influye sobre el régimen de las avenidas y el gasto base durante los periodos de lluvia y estiaje, respectivamente.

La curva de recesión tiene la forma exponencial.  $Q_b = Q_0 C^t$

$Q_b$  es el gasto base en un tiempo  $t$  del estiaje,  $Q_0$  es el gasto base inicial para  $t = 0$ ;  $C$  es un coeficiente que depende de las características hidrogeológicas de la cuenca, se determina de la pendiente de la recta de recesión del hidrograma; para fines prácticos se aproxima a 0.93, es el parámetro de la ecuación con mayor sensibilidad y el que más influye.



$Q_0$  se considera  $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$  como gasto inicial del estiaje, se desconoce la exactitud de este dato, sin embargo, se asume un caudal conservador tomando en cuenta la notable permeabilidad de los escurrimientos, la variable que más influencia tiene sobre  $Q_b$  es el coeficiente C.

El promedio del estiaje es 240 días, de la segunda semana de octubre noviembre a la segunda de junio; se consideran 120 días para estimar el gasto medio.

Sustituyendo y operando términos Tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de flujo base.

$Q_b = Q_0 C^t$	
$Q_0, \text{ m}^3/(\text{s-m}) =$	0.025
C =	0.93
$t_{est}, \text{ dias} =$	120.00
$Q_b, \text{ m}^3/(\text{s-m}) =$	2.80E-06
$Q_b, \text{ m}^3/\text{s} =$	9.53E-02
$\forall, \text{ Mm}^3/\text{año} =$	3.00
<p><math>Q_b</math> varia en proporcion directa con <math>Q_0</math>, pero se incrementa en razon exponencial con el coeficiente C; por ejemplo, si C aumenta 3% <math>Q_b</math> se incrementa casi 35 veces</p>	

El flujo base aproximadamente es de  **$3.0 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

#### 7.2.5. Salida por manantiales

La salida a través de manantiales es del orden de  **$31.3 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

### 7.3. Cambio de almacenamiento

Con base en la evolución piezométrica relativa al lapso 1982 - 2007, suponiendo una variación lineal de niveles y en el comportamiento de los gráficos de los hidrógrafos de pozos, se deduce que la carga piezométrica promedio anual es +0.252 m y que el cambio de almacenamiento resulta de  $\approx 2.0 \text{ hm}^3$  entre 2006 y 2007.

La Tabla 6 muestra el procedimiento y los resultados numéricos.

Tabla 6. Cambio de almacenamiento subterráneo.

EVOLUCIÓN 1982 - 2007  $\Delta t \approx 25 \text{ años}$

Evolución m	% de Área de influencia	Area parcial, km <sup>2</sup>	Evolución promedio pesado m	S	$\Delta VS$ Mm <sup>3</sup> /año
0.00 A + 0.50	35.00	188.32	+ 0.200	0.10	3.766
+0.50 A + 4.00	25.00	134.52	+ 1.000	0.10	13.452
+0.50 A + 5.00	20.00	107.61	+ 1.100	0.10	11.838
+ 4.00	10.00	53.81	+ 2.000	0.10	10.761
+0.50 A + 5.00	10.00	53.81	+ 2.000	0.10	10.761
sumas	100.00	538.07			50.579
		promedio	+0.252	0.10	2.023

Por los resultados alcanzados hasta ahora se deduce que el acuífero se encuentra en equilibrio geohidrológico, con sus entradas y salidas numéricamente equivalentes, así que en teoría para ciclos completos de recarga y descarga promedios la evolución tiende a cero; no obstante, condiciones hidrodinámicas particulares inter-estacionales podrían alterar en un sentido u otro ese equilibrio.

#### Solución a la ecuación de balance

Regresando a las ecuaciones anteriores de balance geohidrológico.

$$(Eh + Rv + Ri) - (B + Sh + ETR + Qb + Sm) = \pm \Delta Vs$$

$$Rv = (B + Sh + ETR + Qb + Sm) - (Eh + Ri) \pm \Delta Vs$$

$$Rt = Rv + Eh + Ri$$

Sustituyendo y operando términos:

$$Rv = (23.0 + 0.0 + 130.2 + 3.0 + 31.3) - (81.2 + 15.1) + 2.0$$

$$Rv = 187.5 - 96.3 + 2.0$$

$$Rv = 93.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La recarga total por lo tanto es  $Rt = Rv + Eh + Ri = 93.2 + 81.2 + 15.1$

$$Rt = 189.5 \text{ hm}^3/\text{año}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

La disponibilidad media anual de agua subterránea, DAS, se obtiene del procedimiento y de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000; se determina por medio de la expresión:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS$$

DAS	Disponibilidad anual media de agua subterránea en la unidad hidrogeológica
Rt	Recarga total anual
DNCOM	Descarga natural comprometida
VCAS	Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

### 8.1. Recarga total anual

La recarga total anual  $Rt$ , es la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida.

La recarga total es la suma de la recarga natural, las entradas horizontales y la recarga inducida.

$$Rt = 189.5 \text{ hm}^3/\text{año}.$$

## 8.2. Descarga natural comprometida

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de manantiales y caudal base de ríos que están comprometidos como agua superficial pero que son alimentados por aguas subterráneas, y, en su caso, las descargas que se deben conservar para no afectar a acuíferos adyacentes, para sostener el gasto ecológico y para prevenir la migración de agua de mala calidad hacia las fuentes del subsuelo que están siendo aprovechadas.

Para el acuífero Zacapu es inviable interceptar volumen alguno del gasto base  $Q_b$ , así como, de la descarga de manantiales  $D_m$ , y se propone aprovechar de forma controlada solo 30% de ETR para no afectar adversamente el entorno natural.

Por lo tanto:  $DNCOM = D_m + Q_b + ETR (70\%)$

$$DNCOM = 31.3 + 3.0 + 91.1 = 125.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

## 8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas

El volumen anual de extracción, de acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua, REPDA, de la Subdirección General de Administración del Agua, de CONAGUA, con fecha de corte al **31 de marzo de 2009 es de 20.527636 hm<sup>3</sup>/año.**

## 8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas

La disponibilidad de aguas subterráneas está representada por el volumen medio al año 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 los ecosistemas.

De acuerdo con lo anterior la DAS se obtiene como la diferencia entre el volumen de recarga total y la descarga natural comprometida y el concesionado e inscrito en el REPDA.

$$\begin{aligned} \mathbf{DAS} &= \mathbf{R_t - DNCOM - VCAS} \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{189.5 - 125.4 - 20.527636} \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{43.572364 \text{ hm}^3/\text{año}} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe actualmente un volumen de **43'572364 m<sup>3</sup> anuales** para otorgar nuevas concesiones.

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, se podrá hacer una evaluación posterior.

## **9. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS**

Comisión Nacional del agua. 1975. Estudio de la Cuenca Lacustre Terciaria del Altiplano Mexicano.

Comisión Nacional del Agua. 1981. Estudio Geohidrológico de los valles de Zacapu y Pátzcuaro, estado de Michoacán.

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