

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Maravatío-Contepec-
Epitacio Huerta (1601), 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.**

DXVI REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "LERMA-SANTIAGO-PACÍFICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE MICHOACÁN							
1601	MARAVATÍO-CONTEPEC-E. HUERTA	182.2	95.3	65.117379	45.5	21.782621	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
MARAVATÍO-CONTEPEC-EPITACIO HUERTA
(1601), 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.....	6
3.1. Provincia Fisiográfica	6
3.2. Clima	7
3.3. Hidrografía.....	7
3.4. Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA	8
4.1. Estratigrafía	8
4.2. Geología estructural	11
4.3. Geología del subsuelo	12
5. HIDROGEOLOGÍA	14
5.1. Tipo de acuífero	14
5.2. Parámetros hidráulicos	14
5.3. Piezometría	17
5.4. Comportamiento hidráulico.....	17
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	21
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS	21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	22
7.1. Entradas.....	22
7.1.1. Recarga vertical.....	22
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal.....	23
7.1.3. Recarga inducida.....	27
7.2. Salidas	27
7.2.1. Evapotranspiración	28
7.2.2. Bombeo	29
7.2.3. Salida por flujo subterráneo horizontal	29
7.2.4. Flujo base.....	30
7.2.5. Salidas a través de manantiales	30
7.3. Cambio de almacenamiento	30
8. DISPONIBILIDAD.....	31
8.1. Recarga total promedio anual.....	32
8.2. Descarga natural comprometida.....	32
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas	32
8.4. Disponibilidad de agua subterránea	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 Maravatío–Contepec–Epitacio Huerta, definido con la clave 1601 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la parte noreste del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 40' y 20° 18' de latitud norte y los meridianos 100° 04' y 100° 42' de longitud oeste, abarca una superficie aproximada de 2108 km², abarca la totalidad de los municipios Maravatío, Contepec, Epitacio Huerta, Tlalpujahuá y Senguio, y una pequeña porción de Irimbo, Zinapécuaro, Aporo e Hidalgo. Figura 1.

El acuífero colinda al norte con los acuíferos Valle de Acámbaro y Valle de la Cueva, del estado de Guanajuato y Valle de Huimilpan del estado de Querétaro; al este con el acuífero Valle de Amealco del estado de Querétaro; al sureste con Ixtlahuaca-Atacomulco del estado de México; al suroeste con el acuífero Ciudad Hidalgo-Tuxpan del estado de Michoacán; y al oeste con los acuíferos Morelia-Queréndaro del estado de Michoacán y Lago de Cuitzeo de Guanajuato.

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

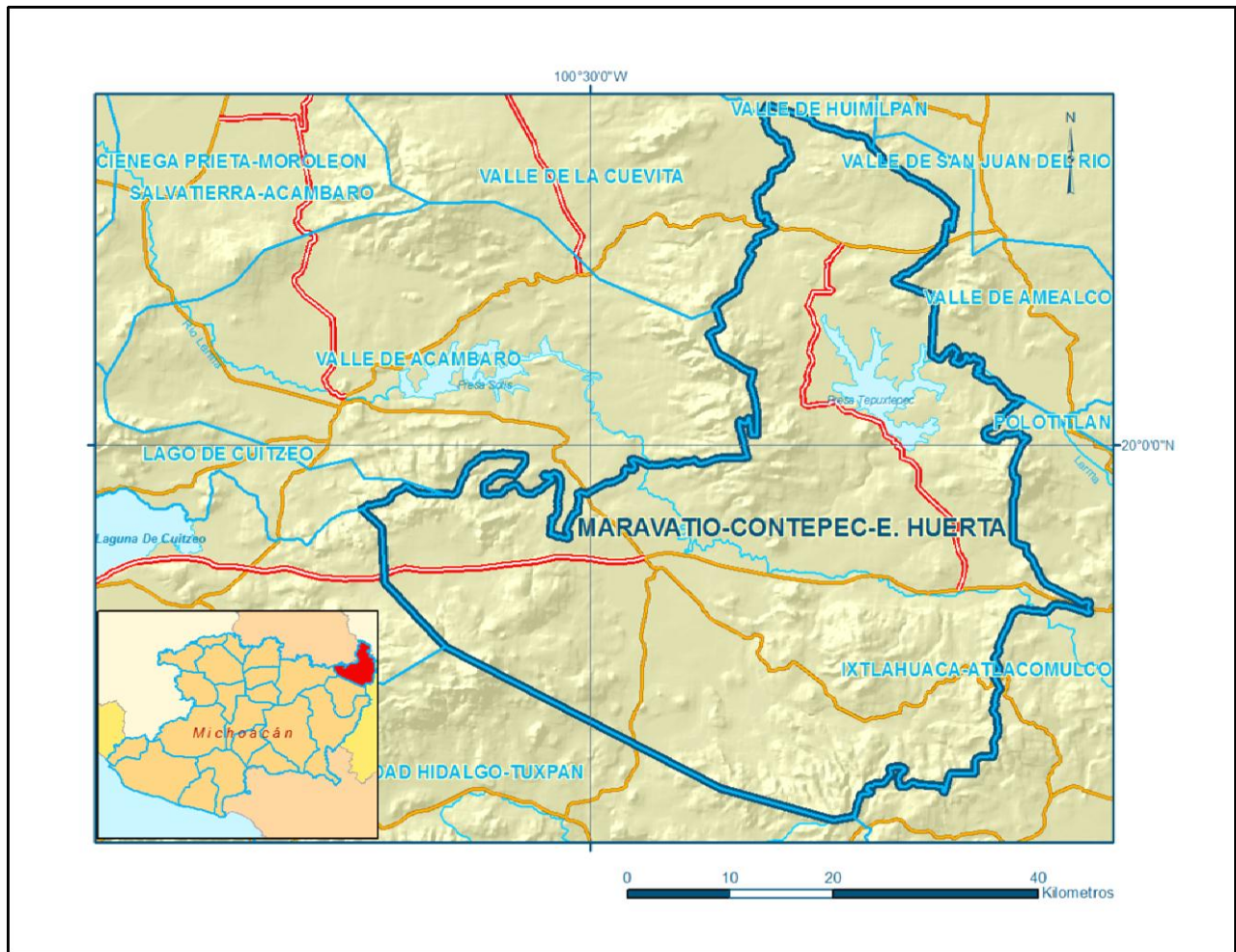


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUIFERO 1601 MARAVATIO-CONTEPEC-E. HUERTA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	21	0.0	20	17	16.1	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	100	15	9.2	20	15	31.8	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	100	7	20.2	20	2	21.7	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE ESTATAL
4	100	16	10.5	19	40	30.1	
5	100	17	16.1	19	40	19.4	
6	100	23	11.3	19	41	59.7	
7	100	37	36.9	19	49	25.0	
8	100	40	49.5	19	52	45.2	
9	100	40	58.1	19	55	39.9	
10	100	42	2.1	19	56	36.2	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE ESTATAL
11	100	37	38.1	19	57	23.7	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	100	23	25.6	20	7	7.1	DEL 12 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	100	21	0.0	20	17	16.1	

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 sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda.

La porción Oeste del territorio del acuífero se encuentra sujeto al Decreto de veda tipo III “*que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de los terrenos que ocupa la Laguna de los Azufres, en el estado de Michoacán*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 13 de febrero de 1956, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Y la porción Este, bajo el Decreto de tipo II “*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, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2009, los municipios que involucra el acuífero se ubican en la zona de disponibilidad 7.

Dentro de los límites del acuífero se localizan los módulos de riego I, derivación del río Lerma, II, Laguna Fresno, y III, Tercer Mundo, pertenecientes a la unidad de riego Maravatío, del Distrito de Riego No. 045, Tuxpan. A la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca (15) Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993.

Una pequeña porción al este y sur del acuífero pertenecen a la reserva de la biósfera “Mariposa Monarca”, creada el 10 de noviembre de 2000.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

El acuífero ha sido estudiado a diferente nivel de detalle; en particular, los expedientes técnicos de pozos aportan información muy valiosa de carácter cuantitativo y cualitativo.

Existen diferentes reportes sobre reconocimientos geohidrológicos, realizados para diversas comunidades ubicadas dentro de los límites del acuífero, los cuales detallan la necesidad de agua para cada una de ellas. El objetivo fue conocer el comportamiento geológico estructural del área, proponer sitios favorables para investigación geofísica y proyectar la construcción de un pozo profundo mediante el cual la comunidad pudiera resolver sus conflictos de agua.

ESTUDIO DE DIAGNOSTICO DE LAS CONDICIONES GEOHIDROLÓGICAS ACTUALES Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN DEL ACUÍFERO DE EPITACIO HUERTA, MICHOACÁN. CNA 1993.

El área de este estudio alcanzó 460 km² de extensión superficial, está enclavada en el límite noreste de la entidad.

Se concluye que el acuífero está constituido por materiales granulares de origen aluvial, fluvial y lacustre, y por rocas ígneas extrusivas fracturadas, conformando una sola unidad geohidrológica.

En la porción central del valle se detectan los espesores más gruesos, se reducen hacia los flancos del mismo y son de naturaleza predominantemente arcillosa en las proximidades del vaso de la presa Tepuxtepec.

La extracción por bombeo es 6 hm³/año, 7 hm³/año es la pérdida por evapotranspiración de agua freática, 2 hm³/año descargan subterráneamente de forma natural a la presa Tepuxtepec.

Los promedios de los coeficientes de transmisividad y almacenamiento del acuífero son 0.003 m²/s y 0.07 respectivamente, éste quizás se incremente significativamente para tiempos prolongados de bombeo.

El acuífero se encuentra en equilibrio hidrológico, lo que significa que son iguales su recarga y extracción, resultantes en 15 hm³/año.

La operación de un modelo matemático de flujo permitió realizar el pronóstico piezométrico para un incremento de bombeo de 10 hm³/año, adicionales a la extracción real y distribuidos en la parte central del valle; dicha predicción determina que la descarga natural hacia la presa Tepuxtepec es interceptada en su totalidad, que se invierte el gradiente hidráulico y el flujo subterráneo de ésta hacia los acuíferos vecinos, que se provocan de 1 a 14 m de abatimiento piezométrico en la zona de pozos al cabo de dieciocho años con este nuevo esquema de bombeo, que la rapidez de descenso de niveles es más intensa en los primeros tres a cuatro años en que inicia el bombeo y posteriormente se atenúa a medida que el tiempo transcurre y se ensancha el radio del cono de influencia por la propagación lateral de los efectos de la explotación.

Se determina además que las condiciones hidrogeológicas del acuífero Maravatío - Contepec - Epitacio Huerta resultaron favorables y por lo mismo que es oportuno establecer las bases del manejo racional de esta valiosa fuente, encaminadas a la utilización eficiente de los recursos hídricos totales disponibles.

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 Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta (1601), 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 se encuentra ubicado en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, subprovincia Mil Cumbres (INEGI, 1991). Localmente se caracteriza por estratovolcanes, calderas, montañas y perfiles ondulados o planos, que en conjunto evidencian una intensa actividad tectónica.

Las áreas abruptas están constituidas por basaltos, andesitas y riolitas, los valles tienen forma alargada semi-plana, están limitados por volcanes y conos cineríticos cuaternarios de paisaje accidentado.

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

La subprovincia Mil Cumbres tiene poca extensión, relieve montañoso y entorno complicado por la diversidad de sus geoformas; se constituye por sierras volcánicas, mesetas lávicas escalonadas, lomeríos basálticos y por el ancho valle a través del cual pasa el río Lerma.

3.2. Clima

Con base en datos de estaciones climatológicas, con periodo de registro de 1979 a 2006, se deduce que el clima es de tipo templado y cálido subhúmedo, con valores anuales promedio de 808.0 mm, 11.7° C y 528.94 mm, de precipitación, temperatura y evapotranspiración real, respectivamente; el régimen de lluvias se presenta entre junio y octubre.

3.3. Hidrografía

El acuífero está ubicado en la Región Hidrológica 12, Lerma-Chapala-Santiago, subregión Alto Lerma, cuenca río Lerma–Toluca. El Río Lerma es el escurrimiento superficial más importante.

La obra hidráulica relevante es la presa Tepuxtepec que domina los módulos de riego I, derivación del río Lerma, II, laguna Fresno, y III, tercer Mundo, pertenecientes a la unidad de riego Maravatío, del Distrito de Riego No. 045, Tuxpan; el vaso de la presa abarca 32.6 ha.

Los arroyos tienen escorrentía rápida, longitudes cortas y régimen intermitente; en cambio, otros de mayor tamaño, desarrollo y cuenca poseen flujo base apreciable. Casi todos son tributarios del Lerma, con flujo general al SW. La densidad del drenaje es moderada o reducida lo que revela buena capacidad de infiltración de las rocas volcánicas y lacustres.

3.4. Geomorfología

Las efusiones volcánicas de diversa composición, antiguas o no, surgidas a través de fisuras, fallas y chimeneas, conformaron el marco geomorfológico actual, tienen orientación N-S y cubren

relieves anteriores para formar otros representados por conos volcánicos, derrames lávicos, brechas y ceniza de origen basáltico andesítico riolítico.

Se encuentran en el subsuelo y en los aparatos volcánicos de los cerros limítrofes, con más de 3000 msnm de altitud y 200 m de desnivel provocado por zonas de falla abruptas.

Esta geomorfología contrasta con la de planicie o llanura de inundación de piso rocoso en torno a la presa Tepuxtepec con lomeríos de poca pendiente en su porción centro oriental.

Otros rasgos sobresalientes corresponden a la parte de Contepec, en la subprovincia sierra mil cumbres, donde aparecen estructuras amesetadas basálticas con rumbo E-W, conos volcánicos monogenéticos y cuencas endorreicas colmatadas por ceniza.

4. GEOLOGÍA

La geología del acuífero está constituida preponderantemente por rocas volcánicas.

Las características físicas de cada una están estrechamente vinculadas a su origen y proceso tectónico acaecido posteriormente, eventos que ocasionaron cambios de su porosidad y permeabilidad originales.

Entre las rocas ígneas extrusivas se encuentran además dacitas, riolitas, ignimbritas, brechas volcánicas básicas, derrames de basalto y tobas arenosas de composición riolítica. Figura 2.

Se observan también rocas metamórficas, conglomerados, depósitos lacustres, aluviones y calizas alteradas por metamorfismo, con fallas que forman una micro-fosa rellena por material arcilloso.

4.1. Estratigrafía

Rocas metamórficas

Forman el basamento profundo, están representadas por esquistos, pizarras y calizas pizarrosas recristalizadas, con metamorfismo regional de bajo grado; poseen amplia distribución espacial.

Derrames andesíticos-basálticos

Afloran en varios sectores, tienen color gris verdoso o gris oscuro, fracturamiento moderado y fuerte espesor, constituyen el piso del acuífero, se encuentran en forma alternada discordante.

Los basaltos poseen estructura vesicular compacta, y buena porosidad, pseudoestratificación y alto grado de compacidad los aglomerados, la escoria, ceniza, brecha, tobas y piroclastos asociados.

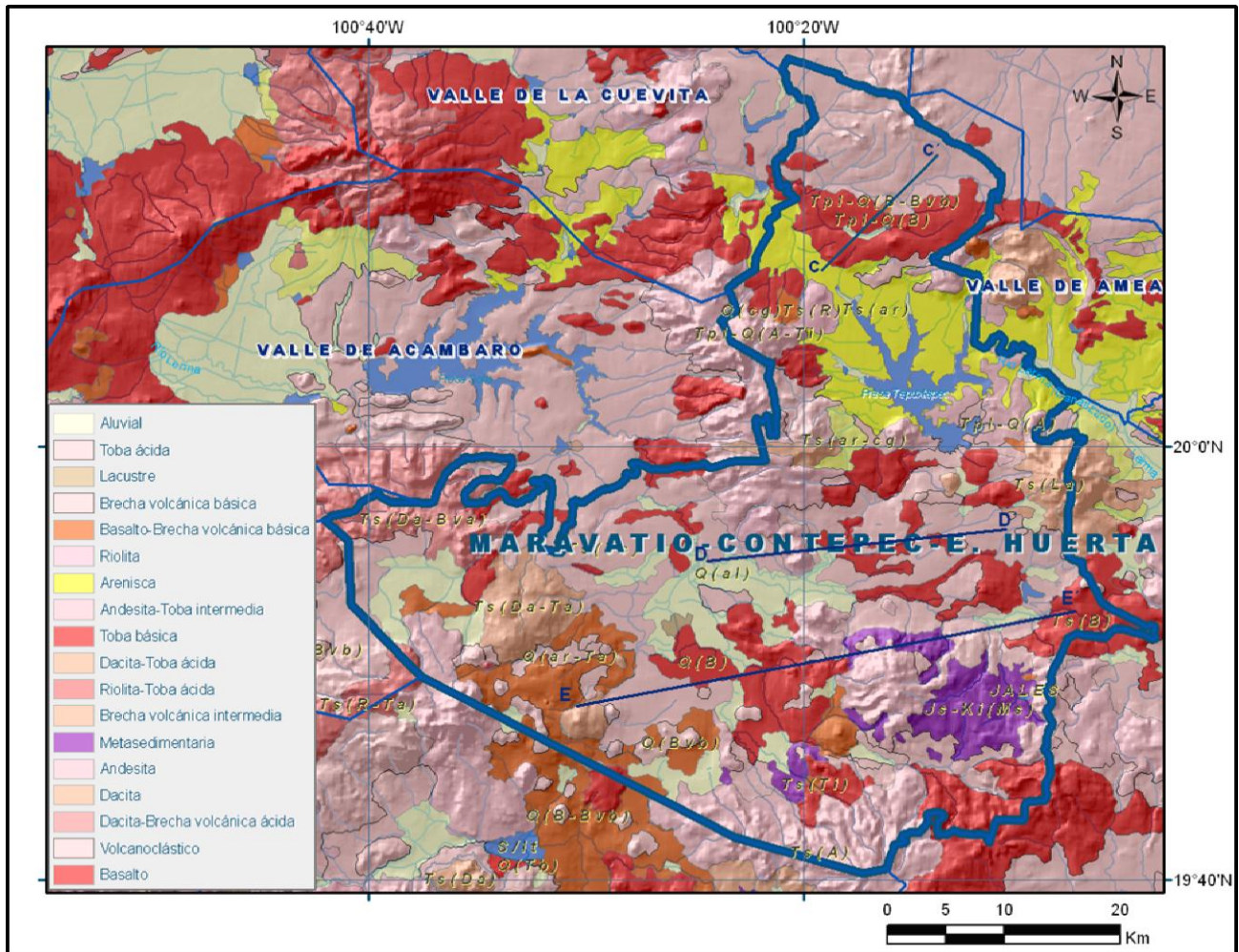


Figura 2. Mapa Geológico

La andesita se presenta con estructura lajeada, en grandes derrames frontales originando relieves escarpados. El conjunto de masa rocosa tiene más de 300 m de espesor.

Tobas brechoides y pumicíticas

Cubren la roca andesítica basáltica, contienen fragmentos de andesita basáltica, cementados con ceniza, con más de 50 m de espesor.

Riolitas, tobas ignimbríticas, brechas y tobas pumicíticas

Afloran en los cerros colindantes, se trata de una alternancia de derrames de riolita y flujos piroclásticos tobáceos. La riolita se presenta en bloques aglutinantes sobre trazas de falla. Su grosor llega a sobrepasar 300 m.

Andesitas

De color gris verdoso y oscuro, textura fanerítica y alteración hidrotermal moderada, aparecen en las estructuras limítrofes y se observan intercaladas con tobas y brechas de igual composición, poco fracturadas, llegando a formar paquetes de cientos de metros de espesor.

Basaltos

Afloran extensamente derrames vesiculares y piroclastos basálticos, en el valle y en las faldas de los cerros del noroeste y sureste, tienen color negro o gris oscuro, capas masivas moderadamente fracturadas, estructura alargada en dirección de las fallas por su origen fisural, e intercalaciones de tobas y brechas.

Escoria volcánica, andesitas y basaltos

Emergen en los cerros de la parte central del acuífero, traen consigo brechas, aglomerados y cenizas volcánicas de color negro rojizo y textura granuda, con pseudoestratificación en el afloramiento, están fracturados, dispuestos en forma alternada, con 20 a 50 m de potencia.

Areniscas

De textura fina a gruesa, subangulosa o subredondeada, con cementante calcáreo, aparecen en lomas de poca pendiente, presentan pseudoestratificación, tienen color gris claro, crema o café.

Riolitas

Derrames fluidales vesiculares alineados, de textura porfirítica holocristalina y color gris con tono rosado, cubren las areniscas, definen formas dómicas, afloran en los cerros y otros amplios espacios.

Dacitas

Aparecen al este y sur del acuífero, tienen color gris verdoso, en general presentan estructura cerrada cuarzosa.

Tobas intermedias

Compuestas por trozos andesíticos de matriz vítrea, afloran en Contepec en capas de espesor masivo, con fracturamiento moderado.

Brecha volcánica basáltica

Constituida por intercalaciones de basalto y brecha volcánica, está compuesta por fragmentos de roca cementados, con vesículas; aflora en áreas reducidas.

Basaltos de olivino

Asumen textura afanítica y porfirítica, color negro o gris, escaso fracturamiento y alteración, cubren discordantemente las unidades pre-cuaternarias, pertenecen al vulcanismo del Eje Neovolcánico; surge en amplias porciones del acuífero.

Arenisca-toba

Emergen por diversas localidades, se encuentran en forma alternada con tobas arenosas, tienen fracturamiento moderado, textura granuda cohesiva que se comporta como tepetate.

Conglomerado

Depósitos continentales poco compactos con clastos sub-redondeados de roca ígnea extrusiva ácida y matriz arcillo arenosa, color café claro, sobreyace en discordancia angular a rocas paleógenas-neógenas, forma los abanicos aluviales del valle.

Suelo y aluvión

Depósitos recientes de arcilla, limo, arena, aglomerado y grava, derivados de la erosión de las rocas de las partes altas, se encuentran en los valles y en las márgenes de los escurrimientos. Tienen unos 10 m de espesor.

4.2. Geología estructural

La mayor parte del acuífero se caracteriza por estructuras volcánicas y un valle aluvial extenso, serpenteado por ríos y arroyos que descienden de las montañas y se abren paso hacia las partes bajas.

Numerosos conos cineríticos y volcanes compuestos influyen en la litología del subsuelo porque sus componentes rocosos se intercalan con los aluviones.

Los volcanes se alinean en dirección noreste-suroeste, sobre posibles zonas de debilidad.

Las laderas de los volcanes, constituidas por abanicos fluviales o depósitos de pie de monte, tienen granulometría y una matriz robusta, por lo mismo son permeables y están saturados en su porción intermedia inferior, cuyos mantos acuíferos colgados se explotan por medio de buen número de captaciones someras con niveles freáticos locales.

4.3. Geología del subsuelo

De cortes de pozos, coherentes con la geología general, se infieren abundantes intercalaciones de roca andesítica, riolítica, basáltica, de estructura compacta, fracturada, con su secuencia asociada de piroclastos, tobas, escoria y brechas de composición equivalente, así como de material arcillo arenoso lacustre, o aluvión y suelo de grano fino, de poco espesor, en la parte superior.

El subsuelo de la porción oriental también contiene capas de arenisca de unos 200 m de espesor.

Asimismo, se interpretan cambios de facie en distancias cortas por la presencia de fallas normales escalonadas, lo que imprime una estructura y geometría irregular al subsuelo.

La secuencia de rocas volcánicas tiene varios cientos de metros de espesor, amplias zonas de afloramiento, influencia definitiva en el marco geológico subterráneo y en términos generales condiciones acuíferas favorables.

Los cortes verticales de las secciones del mapa de la Figura 2, se muestran en las Figuras 3 a la 5.

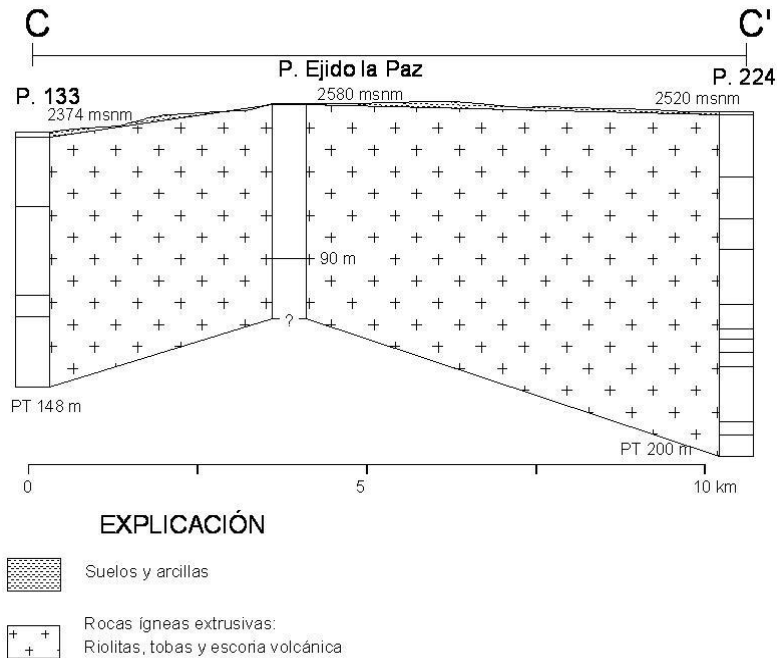


Figura 3 . Sección geológica C – C'

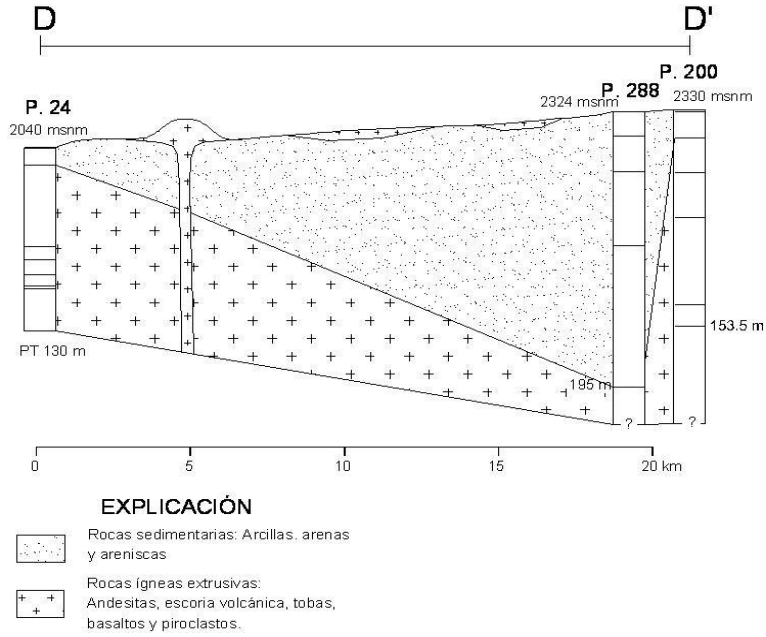


Figura 4 . Sección geológica D – D'

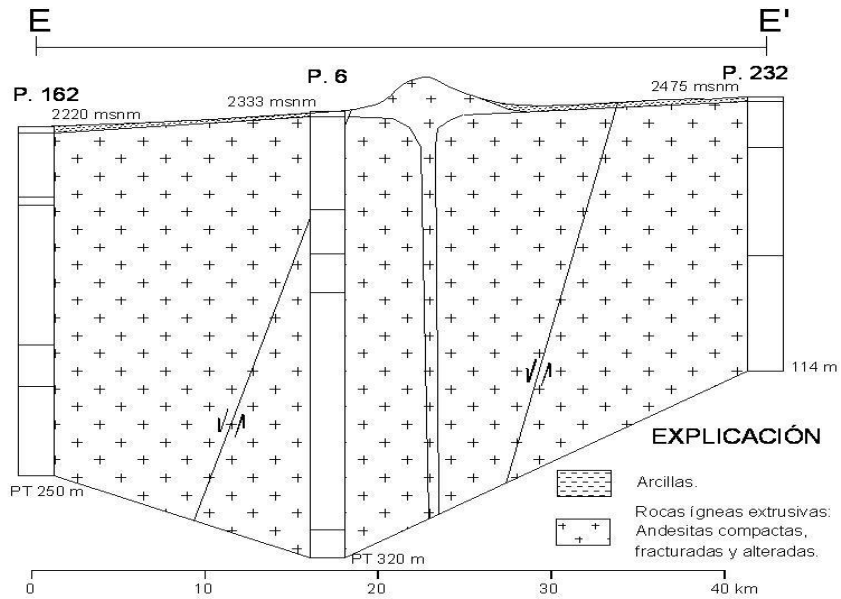


Figura 5 . Sección geológica E – E'

Estos perfiles confirman la descripción anterior; es decir, las rocas volcánicas juegan el rol principal en la hidrogeología del subsuelo ya que aparecen en amplias extensiones con grandes espesores, diverso grado de fracturamiento y compacidad, y enorme potencial acuífero, la secuencia volcánica no es completamente atravesada por los pozos y consecuentemente su dimensión vertical se desconoce.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

El acuífero con la mayor capacidad de aporte se encuentra en rocas volcánicas fracturadas, de extensión regional y buena característica de porosidad y permeabilidad, relativamente uniforme.

Es de tipo libre o semiconfinado con 0.10 o 0.05 de rendimiento específico y coeficiente de almacenamiento; para tiempos largos de bombeo podrían aumentar significativamente, arrojando volúmenes de agua superiores por área superficial y descenso unitario.

El primero se encuentra en Vulcano-clastos y aluviones poco consolidados, y en basalto, andesita, piroclastos, tobas y areniscas el segundo, localizado a mayor profundidad y con mejor potencial.

Se suponen interconectados hidráulicamente formando una vasta unidad hidrogeológica, conteniendo agua de buena calidad.

El acuífero granular libre tiene unos 100 m de espesor y más de 300 el volcánico, ambos con irregularidades geométricas y estructurales, al igual que sus propiedades hidráulicas de recarga, aportación y almacenamiento.

La precipitación es la fuente primaria de recarga, se infiltra en montañas, valles y lechos de cauces de ríos y arroyos, otra aportación al acuífero es por fugas en redes de agua potable, retornos de riego y entradas laterales. La descarga del acuífero es por bombeo, manantiales, flujo lateral, evapotranspiración y gasto base.

Las riolitas y dacitas fluidales sanas conforman los límites del acuífero; las rocas metamórficas, el basamento impermeable regional profundo.

5.2. Parámetros hidráulicos

Las características hidráulicas del acuífero se estiman de pruebas de bombeo a gasto constante y variable, las primeras se obtuvieron con motivo de la actualización del estudio de 2007 y de la recopilación de información previa en oficinas de la CNA las segundas.

Se utiliza el método de interpretación de *Jacob*; las ecuaciones básicas $a_T = BQ + CQ^2$ y $a = (2.3 Q / 4\pi T) \log (2.25Tt / r^2S)$ se aplican para flujo no estable; la ubicación de los pozos de prueba abarca la mayor parte del acuífero.

Las Tablas 2 y 3, muestran los resultados de las pruebas de bombeo.

El caudal de operación varía entre 5 y 60 lps, depende de la terminación y capacidad del equipo del pozo, así como de los parámetros hidráulicos del acuífero; la distribución de caudal corresponde a pozos de 100 a 300 con 200 m de profundidad promedio; el gasto medio es 34.2 lps.

El coeficiente de transmisividad varía de 0.5 a $84 \cdot 10^{-3}$, con $7.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ de promedio pesado. Bajo condiciones de semi-confinamiento el coeficiente de almacenamiento es 0.05, con cambios espaciales apreciables en el entorno del acuífero; si el sistema de flujo es libre el rendimiento específico es 0.10, corresponde a la zona intermedia superior.

En la mayor parte del acuífero la permeabilidad varía entre 1.0 y 2.0 con máximos de 80.0 y $136.0 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$; de ordinario, adopta valores aceptables.

El gasto específico varía entre 0.5 y 2.0 al norte, de 0.5 a 5.0 al sur, entre 0.5 y 2.0 al este y es 2.0 al oeste y centro, con un máximo de 40.0 lps/m. El promedio es 11.2 lps/m, en Maravatío fluctúa de 50.0 a 15.0 con más de 100.0 puntualmente.

Tabla 2. Resultados de pruebas de bombeo a gasto constante

No.	MUNICIPIO	LOCALIDAD	TIPO DE OBRA	USO	RESULTADOS DE PRUEBAS DE BOMBEO							COORDENADAS		
					NE, m	PROF., m	GASTO, lps	ND, m	q, lps/m	T, m^2/s	K, m/s	LATTUD	LONGITUD	ALTITUD
4	MARAVATIO	EL ZAPOTE	POZO	POTABLE	6.50	150	37.50	17	3.57	4.45E-03	3.35E-05	19°49'54"	100°22'24"	2076
77	MARAVATIO	RANCHO LA FLORESTA	POZO	RIEGO	98.00	160	41.00	98	107.89	2.59E-02	4.20E-04	19°55'42"	100°28'12"	2113
105	EPITACIO HUERTA	PUEBLO NUEVO	POZO	RIEGO	68.00	*200	64.00	102	1.87	1.70E-03	1.73E-05	20°04'36"	100°18'24"	2396
221	EPITACIO HUERTA	PALOS ALTOS Y TENENCIA DE GUERRERO	POZO	POTABLE	67.50	200	2.00	94	0.07	2.28E-04	2.10E-06	20°11'24"	100°16'24"	2477
265	CONTEPEC	CLUB DE GOLF	POZO	POTABLE/IRGO.	3.88	*250	16.00	82.40	0.20	1.48E-04	1.00E-06	19°53'36"	100°08'24"	2313
					192.0	32.1	78.9	22.7	6.480E-03					

Tabla 3. Resultados de pruebas de bombeo escalonado

No. CENSO	MUNICIPIO	NOMBRE DE LA OBRA	RESULTADOS DE PRUEBAS DE AFORO								LATITUD	LONGITUD
			N. E., m	FECHA	PROF., m	GASTO, lps	ND, m	q, lps/m	T, m ² /s	\bar{K}_{hi} , m/s		
1	MARAVATÍO	GUAPAMACÁTARO	6.00	23.05.00	143	34.13	105.00	3.54	3.54E-03	9.32E-05	19°49'44.4"	100°22'39.6"
6	MARAVATÍO	TENERÍAS	175.00	19.12.02	320	7.07	192.50	0.43	8.95E-04	7.02E-06	19°50'13.0"	100°10'42.2"
16	MARAVATÍO	POZO 16 (ACTUAL) SN MIGUEL EL ALTO	12.28	02.06.82	104	111.00	48.22	5.26	5.26E-03	7.92E-05	19°52'30.0"	100°20'57.8"
20	MARAVATÍO	HACIENDA DE APEO (20 ACTUAL)	7.07	21.05.80	150	100.30	25.24	6.44	6.44E-03	6.44E-05	19°53'36.7"	100°20'37.6"
24	MARAVATÍO	EJIDO SAN NICOLASITO, P22 (ANT) (24 ACTUAL)	22.40	25.05.82	150	20.15	90.00	0.34	3.38E-04	4.20E-06	19°55'13.0"	100°20'10.7"
25	MARAVATÍO	SN. N. TOLENTINO	25.00	20.12.05	130	26.25	112.00	0.30	2.87E-04	1.60E-05	19°55'23.9"	100°20'44.4"
29	MARAVATÍO	CAMPO HERMOSO	30.00	15.03.00	150	7.73	72.74	0.19	1.52E-04	1.97E-06	19°50'16.8"	100°20'43.6"
61	MARAVATÍO	URIPITIO	57.00	24.03.06	215	12.91	203.00	1.56	1.56E-03	1.94E-05	19°57'38.8"	100°30'42.4"
80	MARAVATÍO	LOMA DE LA ROSA	142.00	05.03.97	200	36.80	163.90	5.48	5.48E-03	1.22E-04	19°56'19.0"	100°20'15.5"
89	MARAVATÍO	ENCINILLAS	93.00	25.04.02	180	37.76	94.85	26.53	2.65E-02	3.12E-04	19°56'43.8"	100°20'33.9"
94	MARAVATÍO	EX-HACIENDA DE HUARACHA	18.00	09.05.03	86	47.60	24.00	84.12	8.41E-02	1.36E-03	19°54'27.8"	100°20'22.5"
104	CONTEPEC	MOGOTES	21.50	12.10.00	200	57.63	22.60	66.00	6.60E-02	3.67E-04	20°00'41.5"	100°10'47.0"
129	E. HUERTA	LOS TEJOCOTES (E. DOLORES)	30.00	26.03.05	200	64.90	94.00	2.27	2.27E-03	2.16E-05	20°03'44.2"	100°10'40.6"
133	E. HUERTA	P. No. 2	35.00	09.09.98	150	37.20	80.00	1.41	1.03E-03	1.14E-05	20°07'47.0"	100°10'59.3"
144	E. HUERTA	CANADA DE GARCÍA (144 ACTUAL)	35.00	12.07.94	145	50.00	43.00	3.34	3.34E-03	3.34E-05	20°06'21.8"	100°10'25.7"
147	E. HUERTA	SN. A. MOLINOS	24.00	19.11.05	150	39.60	38.00	3.16	3.16E-03	2.68E-05	20°04'35.7"	100°10'54.1"
155	MARAVATÍO	POZO 14 (ANT) SN CRISTOBAL DE LAS PIEDRAS (155 ACTUAL)	8.40	17.12.81	78	54.93	13.95	35.25	3.52E-02	3.52E-04	19°54'15.9"	100°20'18.9"
160	MARAVATÍO	CLISERIO VILLAFUERTE	150.00	27.03.01	220	15.37	151.48	20.85	2.08E-02	2.97E-04	19°49'50.4"	100°30'09.8"
162	MARAVATÍO	CORRAL FALSO	156.00	12.04.06	250	15.75	163.00	2.69	2.69E-03	2.95E-05	19°48'54.2"	100°20'04.7"
197	CONTEPEC	EMBOTELLADORA GUGAR	30.00	18.12.05	200	45.99	140.00	0.69	6.94E-04	7.30E-06	19°55'44.8"	100°10'28.0"
198	CONTEPEC	PARQUE INDUSTRIAL	8.00	21.04.05	250	40.16	140.00	0.64	6.43E-04	5.85E-06	19°55'11.0"	100°10'31.6"
220	E. HUERTA	EX-HACIENDA LA PAZ	59.00	12.02.02	300	42.00	111.50	0.63	6.34E-04	3.10E-06	20°10'55.2"	100°10'51.9"
224	E. HUERTA	EL ASTILLERO DE BOTIJA	12.30	14.10.02	200	33.30	89.29	1.57	1.57E-03	1.41E-05	20°12'27.7"	100°10'28.4"
225	E. HUERTA	LAS HORMIGAS 2	33.00	17.08.02	200	20.30	76.00	0.74	7.43E-04	6.00E-06	20°11'56.7"	100°10'10.7"
243	MARAVATÍO	POMOCA	7.00	20.12.02	200	17.15	100.00	0.90	9.02E-04	1.00E-05	19°52'41.8"	100°10'48.5"
280	CONTEPEC	EL MILAGRO	15.00	08.01.01	200	18.64	29.50	1.84	1.84E-03	1.06E-05	20°04'16.4"	100°10'53.6"
281	E. HUERTA	MOLINOS DE CABALLERO	28.00	02.09.02	150	37.00	47.00	2.27	2.27E-03	2.20E-05	20°04'27.9"	100°10'03.5"
288	CONTEPEC	EL SOMBRERITO	28.00	12.10.01	201	32.57	115.00	2.28	2.28E-03	2.65E-05	19°55'46.9"	100°10'39.3"
293	E. HUERTA	EJIDO LA PAZ	120.00	08.04.02	300	9.90	137.50	2.50	2.50E-03	1.50E-05	20°09'39.0"	100°10'46.2"
E. POMOQUITA	MARAVATÍO	EJIDO POMOQUITA	10.00	21.07.82	100	10.00	70.00	0.15	1.46E-04	2.90E-06	19°53'18.7"	100°22'00.5"
L. CÁRDENAS	CONTEPEC	LÁZARO CÁRDENAS	30.00	11.04.00	200	25.33	90.00	0.43	3.66E-04	4.40E-06	19°57'09.0"	100°09'40.6"
SANTA RITA	MARAVATÍO	SANTA RITA	103.00	27.01.95	175	56.42	106.50	15.28	1.33E-02	1.95E-04	19°52'37.5"	100°29'24.2"

5.3. Piezometría

La información piezométrica utilizada corresponde a la del censo de pozos de diciembre de 2007, así como a mediciones anteriores disponibles desde 1987, representa 20 años de periodo de análisis, suficiente para obtener un grado de confianza admisible del balance geohidrológico.

5.4. Comportamiento hidráulico

A escala regional el acuífero es de tipo libre con semi-confinamiento local por la heterogeneidad litológica de las rocas del subsuelo, en especial las de origen volcánico y lacustre.

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático varía de 70 a 20 m en el centro y norte del acuífero, de 40 a 100 en su lado occidental, entre 30 y 45 al oriente, tiene 10 m o menos por la presa Tepuxtepec, al sur fluctúa de 80 a 150, entre 5 y 20 por Maravatío, Campo Hermoso y Apeo, entre 60 y 90 al noroeste de Maravatío, y de 30 a 25 m en Epitacio Huerta y Ejido Ojo de Agua, Figura 6.

Niveles piezométricos de acuíferos confinados de 5 a 10 m de profundidad parecen detectarse en la fracción sur-sureste.

En la zona agrícola, en particular cerca de canales, drenes y corrientes perennes, el nivel freático se encuentra entre 0.5 y 10 m de profundidad.

La posición de nivel está influida principalmente por la topografía, es una condición natural.

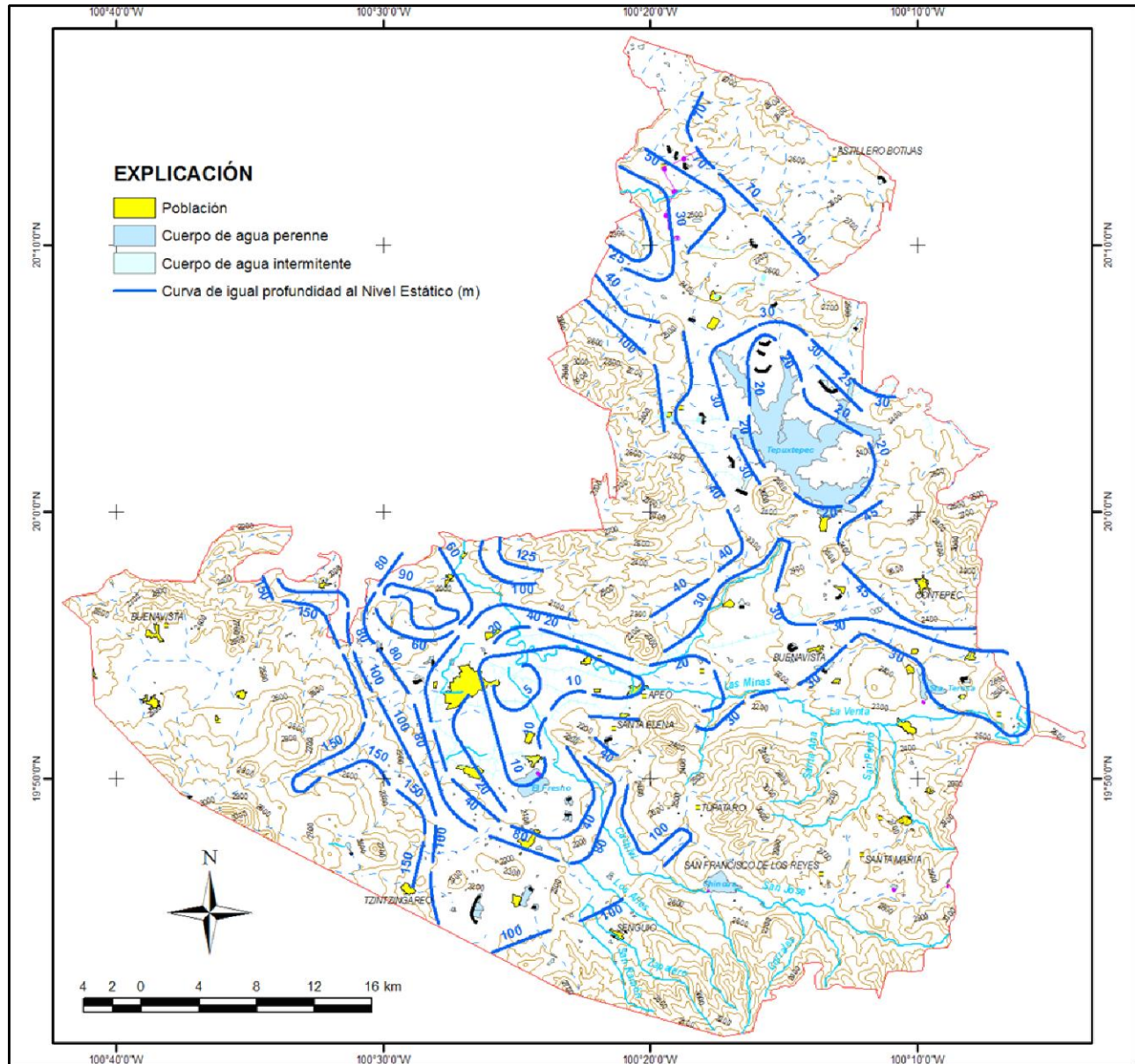


Figura 6. Profundidad al nivel estático (m), 2007

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración piezométrica define flujos laterales provenientes de las rocas volcánicas permeables colindantes, un parteaguas hidrodinámico por el poblado Epitacio Huerta desarrollado por topografía y bombeo, gradientes hidráulicos de 4.525 a 68.493, con 24.831 m/km de promedio, cuya variación es por cambios de gasto y permeabilidad, así como una dirección general de flujo norte-sur, oriente a poniente y sur-noroeste, las equipotenciales van de 2500 a 1960 m, de las partes elevadas a la salida de la cuenca, Figura 7.

No se registran conos de abatimiento por explotación del acuífero.

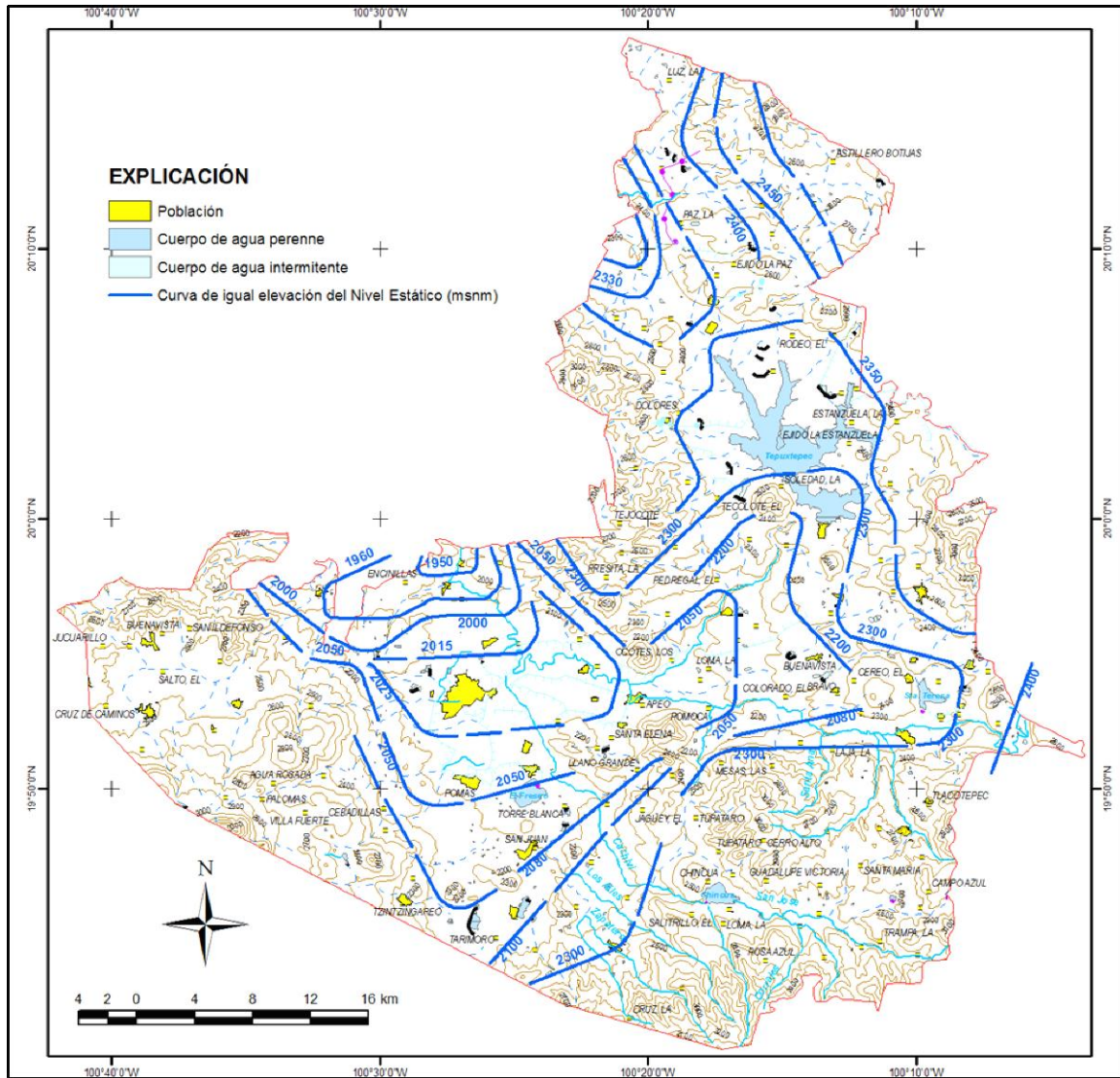


Figura 7. Elevación del nivel estático (msnm), diciembre 2007

5.4.3. Evolución de nivel estático

La Figura 8 presenta la evolución piezométrica relativa al lapso enero 1987 – diciembre 2007, comprende periodos de recarga y descarga del acuífero.

El nivel permanece estable para el intervalo considerado y seguramente para plazos mayores, la evolución media regional es nula o exhibe recuperaciones, especialmente cerca de drenes, canales, cuerpos de agua superficial y en los bordes del valle.

La evolución positiva registrada varía de 0.5 a 1.0 m, o es localmente mayor, representa la resultante neta del conjunto de esfuerzos a los que es sometido el acuífero.

Los hidrógrafos son consistentes con la evolución de niveles estáticos; en otras palabras, su descenso es insignificante, o se observan ciclos de descenso y recuperación equivalentes, producto de los periodos de descarga y recarga del acuífero, bajo un régimen de equilibrio hidrodinámico; por el amplio intervalo de análisis considerado, el comportamiento descrito es prudentemente confiable, se puede concluir que el acuífero no tiene síntoma alguno de sobre-explotación.

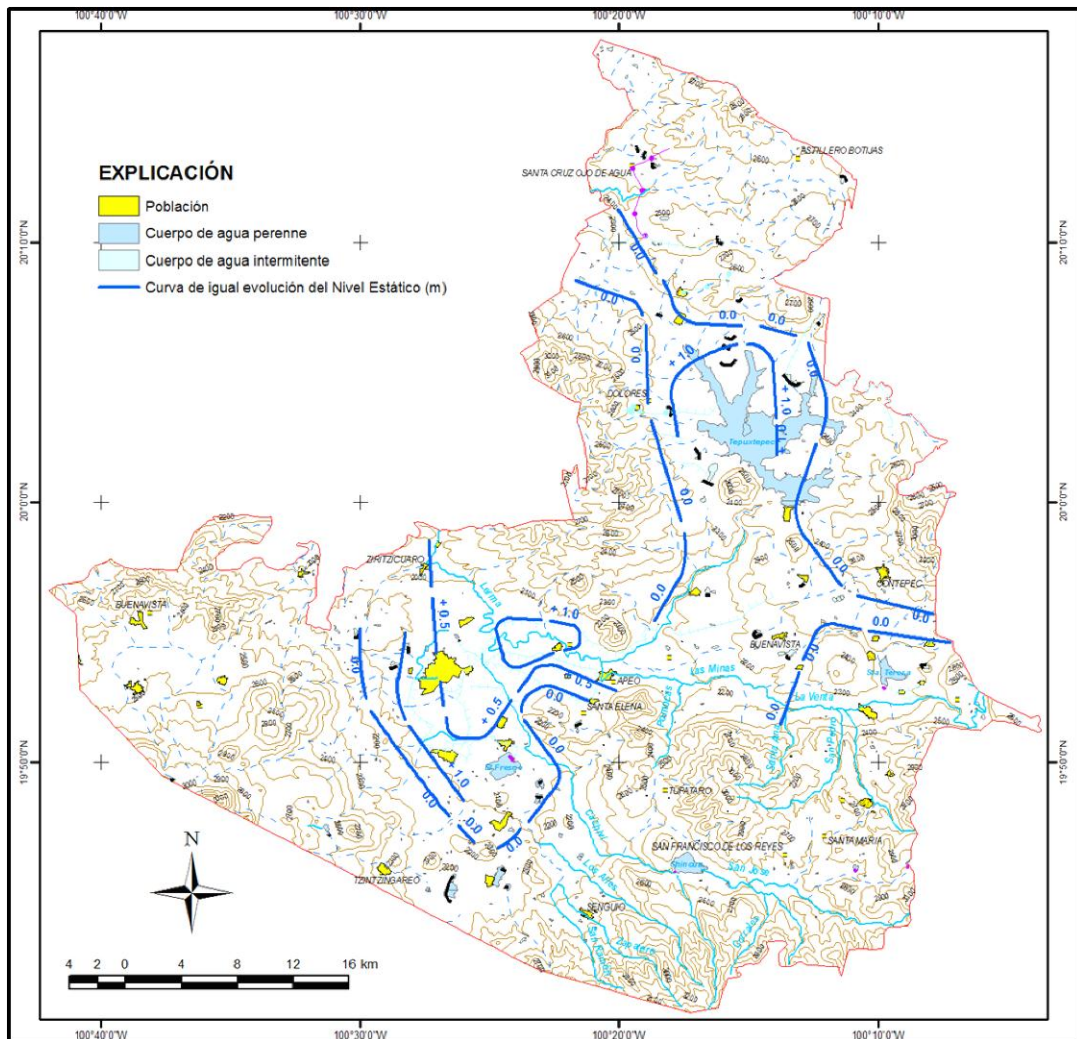


Figura 8. Evolución de nivel estático (m), 1987-2007

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2007 se tomaron diez muestras de agua para su análisis fisicoquímico correspondiente; se observa consistencia e invariabilidad entre los obtenidos de fechas anteriores y los actuales.

El agua subterránea se clasifica como cálcico magnésica sulfatada clorurada, y sódico bicarbonatada, tiene 256.79 $\mu\text{mho/cm}$ de promedio de conductividad eléctrica, baja concentración de sales, en consecuencia poco tiempo de haberse infiltrado hasta la zona saturada y cortas distancias de recorrido a través del acuífero con buena permeabilidad.

Su salinidad varía de 230 a 1120 con 470.45 ppm de promedio de sólidos disueltos totales, es químicamente apropiada para abastecimientos potables.

La salinidad del agua y el sodio limitan su uso para fines agrícolas, en este sentido se clasifica C2-S1, lo que significa bajo índice RAS y peligro de sodio, y salinidad media.

Los análisis químicos previos y los obtenidos con motivo de la actualización del estudio manifiestan que la calidad de las fuentes del subsuelo es aceptable para cualquier fin y ha permanecido sin modificaciones significativas a lo largo de 10 años aproximadamente.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS

En 2007 se censaron 300 obras de agua subterránea; 76% son pozos y 24% manantiales; 47.78% de las obras tienen uso agrícola, 38.52% se destina al abastecimiento de agua potable, 2.59% para uso recreativo y riego, 0.37% recreativo, 0.37% industrial, 3.7% doméstico, 5.56% para usos potable y riego y 1.11 para usos de abrevadero y riego.

El 96% de los pozos tienen motor eléctrico, 3% está sin motor y 1% es de combustión interna; 59% de los equipos son sumergibles, 40% de turbina y 1% centrífugo.

La extracción total es 64.5 $\text{hm}^3/\text{año}$, del cual 19.0 $\text{hm}^3/\text{año}$ corresponde a descarga de manantiales y 45.5 $\text{hm}^3/\text{año}$ a la extracción por bombeo; el 70.87% se destina a riego, 13.45% a agropecuario, abrevadero y doméstico, 7.93% a fines potables y 7.75% a recreativos.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó únicamente para el año 2008, en una superficie de 4.2 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. 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 masa se expresa como:

$$\text{Entradas (E) – Salidas (S) = Cambio de almacenamiento}$$

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 una unidad hidrogeológica:

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos de los arroyos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

7.1.1. Recarga vertical

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

- Rv: Recarga vertical
- Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri: Recarga inducida
- B: Bombeo
- Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR: Evapotranspiración
- Qb: Flujo base
- Dm: Salidas a través de manantiales
- $\Delta V(s)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2007 (figura 7). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

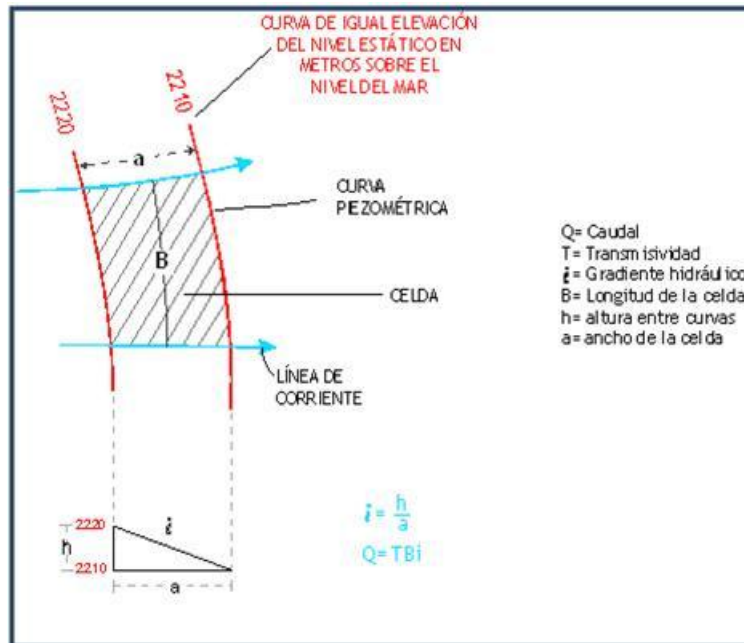
Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$) Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad tenemos que:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$



Ya que la transmisividad $T = K \cdot a$, la ecuación queda reducida a:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

T = Transmisividad en m^2 / s

B = Longitud de la celda en m

i = Gradiente Hidráulico, en m

La Figura 9 muestra el plano de la red de flujo subterráneo en diciembre 2007, el flujo de los canales de entrada y salida se estiman con base en la ecuación de continuidad y Darcy, $Q = Av$ y $v = Ki$; sustituyendo y simplificando términos $Q = TiB$.

B es el ancho, i el gradiente hidráulico y T la transmisividad de cada canal de flujo.

La Tabla 4, muestra los parámetros hidráulicos y geométricos, el gasto y volumen anual de los canales de flujo, así como el total.

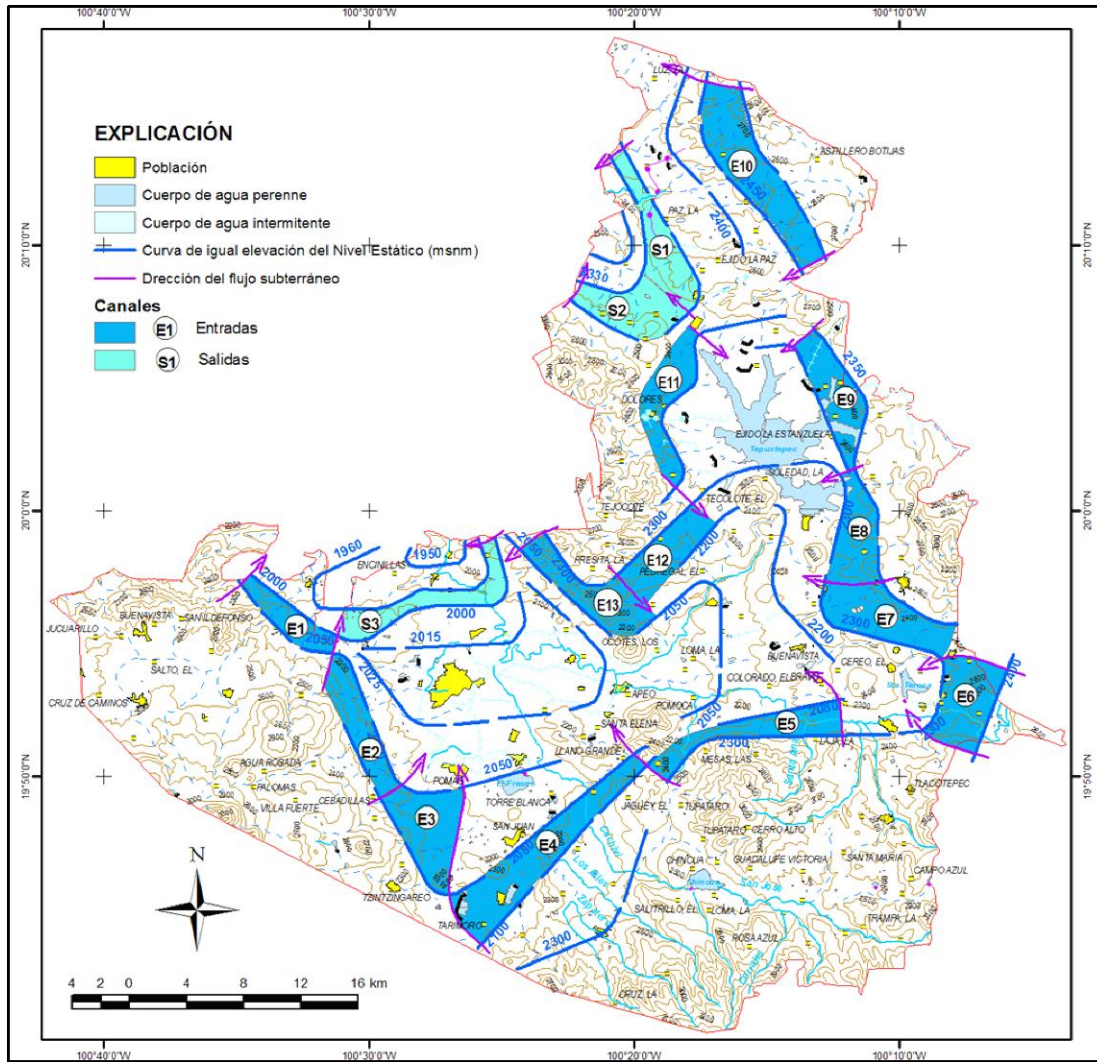


Figura 9. Red de flujo subterráneo (diciembre 2007)

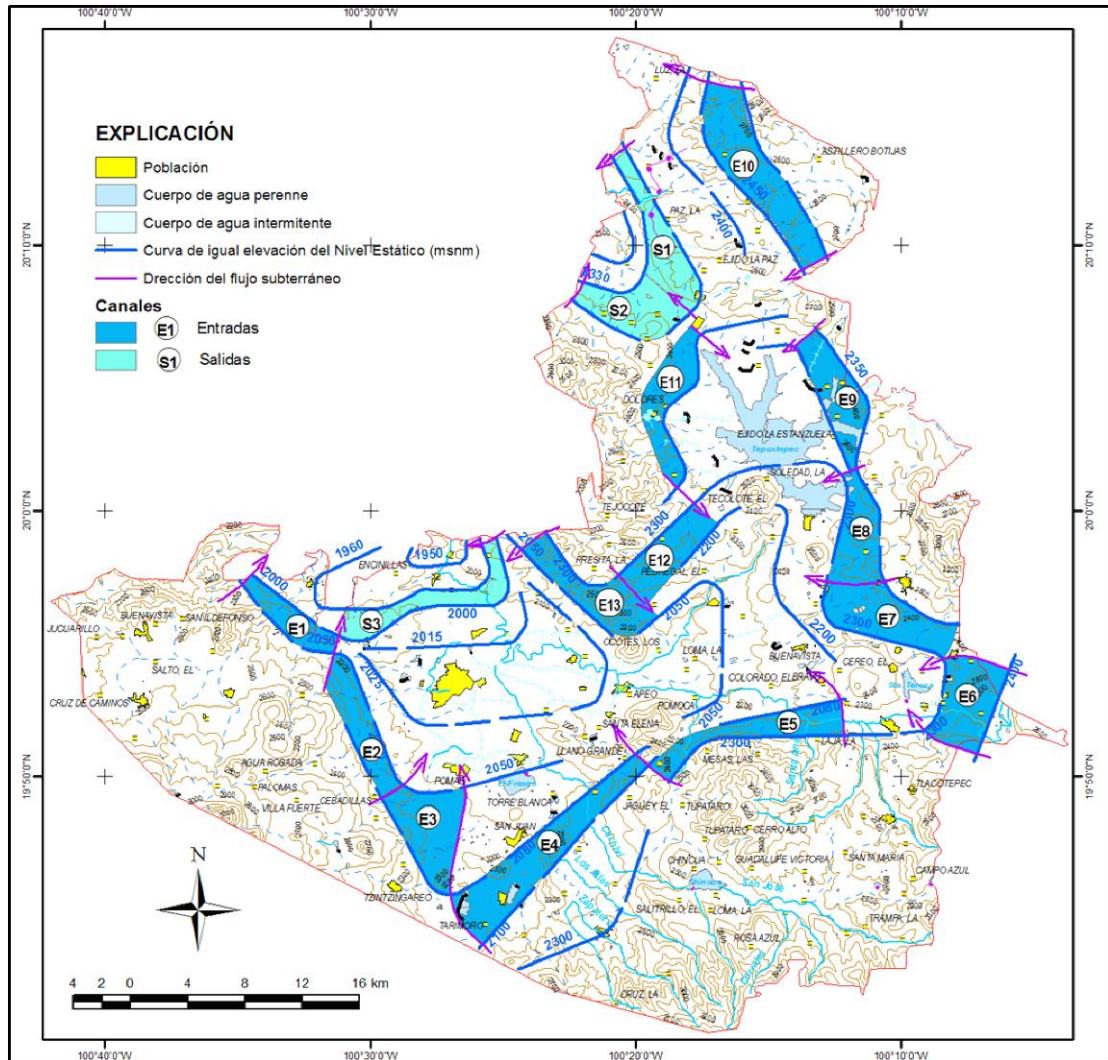


Tabla 4.

Figura 9. Red de flujo subterráneo (diciembre 2007)

Tabla 4. Cálculo de entradas por flujo horizontal

Canal	T m ² /s * 10 ⁻³	Ah m	L km	i	B km	Q m ³ /s	V hm ³ /año
E1	1.5	50	1.82	27.473	7.80	0.330	10.4
E2	3.1	30	1.95	15.385	9.75	0.462	14.6
E3	1.5	30	3.75	8.000	5.20	0.064	2.0
E4	2.3	20	2.08	9.615	17.55	0.390	12.3
E5	1.0	100	2.00	50.000	14.30	0.716	22.6
E6	0.4	100	3.50	28.571	6.50	0.072	2.3
E7	0.9	50	3.25	15.385	9.43	0.134	4.2
E8	0.9	50	2.43	20.576	8.45	0.161	5.1
E9	1.2	10	2.21	4.525	10.40	0.058	1.8
E10	0.8	50	3.00	16.667	14.63	0.188	5.9
E11	1.7	10	0.65	15.385	11.37	0.298	9.3
E12	1.9	100	2.34	42.735	7.15	0.471	14.8
E13	0.8	250	3.65	88.493	9.42	0.497	15.7
							120.9

Las entradas subterráneas horizontales representan el 7.10% del volumen de precipitación y 66.32% del coeficiente de infiltración efectiva.

7.1.3. Recarga inducida

El agua aplicada en exceso del uso consuntivo de los cultivos se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, se conoce como retorno de riego; se destinan 45.71 hm³/año, para fines agrícolas y se asume que 15% de este volumen alcanza al acuífero lo que arroja 6.86 hm³/año.

El volumen destinado para uso público urbano es 10.48 hm³/año, se supone 30% de fugas que llegan también al acuífero; así que el volumen es 3.14 hm³/año. El total de la Recarga inducida, es **10.0 hm³/año**.

7.2. Salidas

Representadas por bombeo (B); evapotranspiración (ETR); flujo horizontal subterráneo (Sh), flujo base de corrientes perennes, (Qb) y salidas a través de manantiales (Dm).

7.2.1. Evapotranspiración

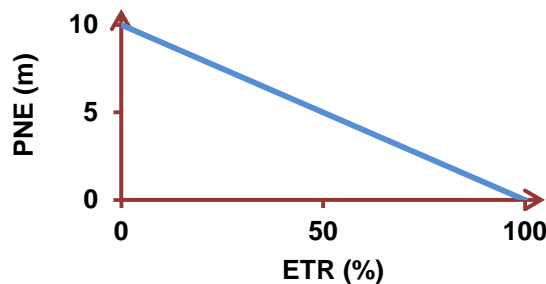
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera 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.

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

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 el % 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.



De la configuración de profundidad al NE, correspondiente a diciembre de 2007, se consideran las curvas menores e iguales a 10 m, se calcula el área entre ellas y se toma el valor promedio (entre las curvas de 4 y 6 m en valor promedio será 5). El resultado de multiplicar el valor promedio por

el área entre las curvas, deberá ponderarse de acuerdo a la relación lineal mencionada, la Tabla 5 muestra el cálculo de *ETR*.

Tabla 5. Volumen evapotranspirado

Intervalo curvas (m)	\bar{NF} , m	% DE AREA DE INFLUENCIA	AREA NETA, km ²	% ETR	ETR, m	ETR, Mm ³ /año
0.00 a 10.00	5.00	3.50%	73.78	50.00	0.529	19.51
	Area Balance		73.78		ETR =	19.51

Por lo tanto el valor de la evapotranspiración calculado es $\approx 19.5 \text{ hm}^3/\text{año}$.

7.2.2. Bombeo

La extracción total por bombeo es $45.5 \text{ hm}^3/\text{año}$.

7.2.3. Salida por flujo subterráneo horizontal

Análogamente a la Eh se estiman las salidas laterales, el valor total calculado es de $63.6 \text{ hm}^3/\text{año}$ de los cuales $3.8 \text{ hm}^3/\text{año}$ son hacia el acuífero La Cueva y los restantes $59.8 \text{ hm}^3/\text{año}$ hacia el acuífero Valle de Acámbaro, ambos del estado de Guanajuato.

Tabla 6. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

Canal	T m ² /s * 10 ⁻³	Ah m	L km	i	B km	Q m ³ /s	V hm ³ /año
S1	0.75	20	2.67	7.491	12.25	0.069	2.2
S2	0.75	20	2.10	9.524	7.15	0.051	1.6
S3	5.1	40	2.13	18.779	19.83	1.899	59.8
							63.6

7.2.4. Flujo base

El desarrollo total de las corrientes perennes es 218.85 km, se admiten características físicas similares para todas ellas, su análisis aporta información valiosa sobre la capacidad de los acuíferos ribereños, la conductividad hidráulica promedio considerada es $5.0 \cdot 10^{-4}$ m/s, la curva de recesión sigue la igualdad $Q_b = Q_0 K^t$, Q_b es el gasto base en un tiempo t del estiaje, Q_0 es el gasto base inicial para $t = 0$, adjudicado en $0.075 \text{ m}^3/\text{s}$; K 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 0.90, es el más sensible de los términos involucrados en la ecuación, el estiaje tarda de noviembre a mayo, 200 días en promedio pero se toman 97 días para estimar el gasto base medio.

Sustituyendo y operando términos, el flujo base resulta $\approx 18.8 \text{ hm}^3/\text{año}$, Tabla 7.

Tabla 7. Flujo base

$Q_b = Q_0 K^t$	
$Q_0, \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m}) =$	0.075
$K =$	0.90
$t_{ef}, \text{ dias} =$	97.00
$Q_b, \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m}) =$	2.73E-06
$Q_b, \text{ m}^3/\text{s} =$	5.98E-01
$V, \text{ Mm}^3/\text{año} =$	18.84
El gasto base Q_b es mayor si Q_0 aumenta y, principalmente, t_{ef} disminuye	

7.2.5. Salidas a través de manantiales

De los 72 manantiales existentes dentro de los límites del acuífero, se tiene un volumen de **19.0 $\text{hm}^3/\text{año}$** .

7.3. Cambio de almacenamiento

La Tabla 8 muestra la obtención del cambio de almacenamiento anual según la evolución de niveles de la Figura 8, asumiendo 0.05 de coeficiente de almacenamiento.

La evolución piezométrica neta del acuífero resulta +0.33 m y $\Delta V_s = +15.8 \text{ hm}^3/\text{año}$, como volumen anual promedio.

Tabla 8. Cambio de almacenamiento (dic. 2006 – dic. 2007)

Evolución m	% de área de influencia	Area parcial km2	S	Evolución promedio m	Cambio de almacenamiento hm3/año
0.00	70	1479.6	0.05	0	0.0
0.00-0.50	15	316.2	0.05	-0.25	4.0
-0.50-1.00	15	316.2	0.05	-0.75	11.8
					15.8

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones:

$$R_v = S_h + B + ETR + Q_b + D_m - \Delta V(S) - E_h - R_i$$

$$R_v = 63.6 + 45.5 + 19.5 + 18.8 + 19 + 15.8 - 10.0 - 120.9$$

$$R_v = 51.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera la recarga total media anual $R_t = R_v + E_h + R_i = 51.3 + 120.9 + 10.0 = 182.2 \text{ hm}^3$

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:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS$$

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 promedio 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 **182.2 hm³/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 Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, el volumen de las descargas naturales comprometido es de **95.3 hm³/año**, que corresponde a lo siguiente.

Se aplican las siguientes premisas para la estimación de la DNCOM, pensando en la conservación del ecosistema y en el aprovechamiento racional del recurso. El 75% de las Salidas horizontales no se considera aprovechable, así la DNCOM = 47.7 hm³/año. El 50% de la evapotranspiración es factible utilizar, por lo tanto la DNCOM = 9.8 hm³/año. El 100% de la descarga a través de manantiales es inviable su intercepción, entonces la descarga natural comprometida por descarga de manantiales es de 19.0 hm³/año. El 100% del caudal base, por lo que el valor es de 18.8 hm³/año. Por lo tanto la **Descarga Natural Comprometida es de 95.3 hm³/año**.

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 54'493,332 m³ 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, 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.

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

$$DAS = 182.2 - 95.3 - 54.493332$$

$$\mathbf{DAS = 32.406668}$$

La cifra indica que existe un volumen de **32,406,668 m³** anuales para otorgar nuevas concesiones, en el acuífero denominado Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, estado de Michoacán.

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 una superficie mayor ni 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, Diversa información geológica y geohidrológica, estudios preliminares y expedientes técnicos. Dirección Local en Michoacán, Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico.

Comisión Nacional del Agua. Diversa información piezométrica, pruebas de aforo, análisis físico químico, cortes constructivos y registros eléctricos de pozos, estudios preliminares previos y expedientes técnicos, jefatura de proyecto de Aguas Subterráneas, Dirección Local en Michoacán.

Comisión Nacional del Agua. 1993. Estudio de Diagnóstico de las Condiciones Geohidrológicas Actuales y Análisis de Alternativas de operación del acuífero de Epitacio Huerta, Michoacán.

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. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Subcoordinación de Hidrología Subterránea. Coordinación de Hidrología.