

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LA PIEDAD (1623), ESTADO DE
MICHOACÁN**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

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.....	8
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural	14
4.3 Geología del subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1 Tipo de acuífero.....	15
5.2 Parámetros hidráulicos	15
5.3 Piezometría.....	16
5.4 Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	19
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1 Entradas.....	22
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.1.3. Recarga inducida (Ri)	24
7.2 Salidas	25
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	25
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.2.3. Descarga por manantiales (Dm)	25
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	26
8. DISPONIBILIDAD	27
8.1 Recarga total media anual (R).....	27
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	27
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	28
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	28
9. BIBLIOGRAFÍA	30

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-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y 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 de extracción de aguas subterráneas.

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 La Piedad, definido con la clave 1623 por la Comisión Nacional del agua, se localiza en la porción noroccidental este del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 57' y 20° 24' de latitud norte y los meridianos 101° 45' y 102° 11' de longitud oeste; cubriendo una superficie aproximada de 877 km². Limita al norte y al este con acuífero Pénjamo-Abasolo, del estado de Guanajuato; al sureste con el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad; al sur y al oeste con el acuífero Zamora, del estado de Michoacán; al noroeste con el acuífero Briseñas-Yurécuaro del estado de Michoacán y con el acuífero Jesús María, del estado de Jalisco (figura 1).

Geopolíticamente comprende totalmente los municipios de Numarán y Zináparo, la mayor parte de La Piedad de Cavadas, Penjamillo y Churintzio así como pequeñas porciones de Ecuandureo, Yurécuaro, Tlazazalca, Angamacutiro y Zacapu.

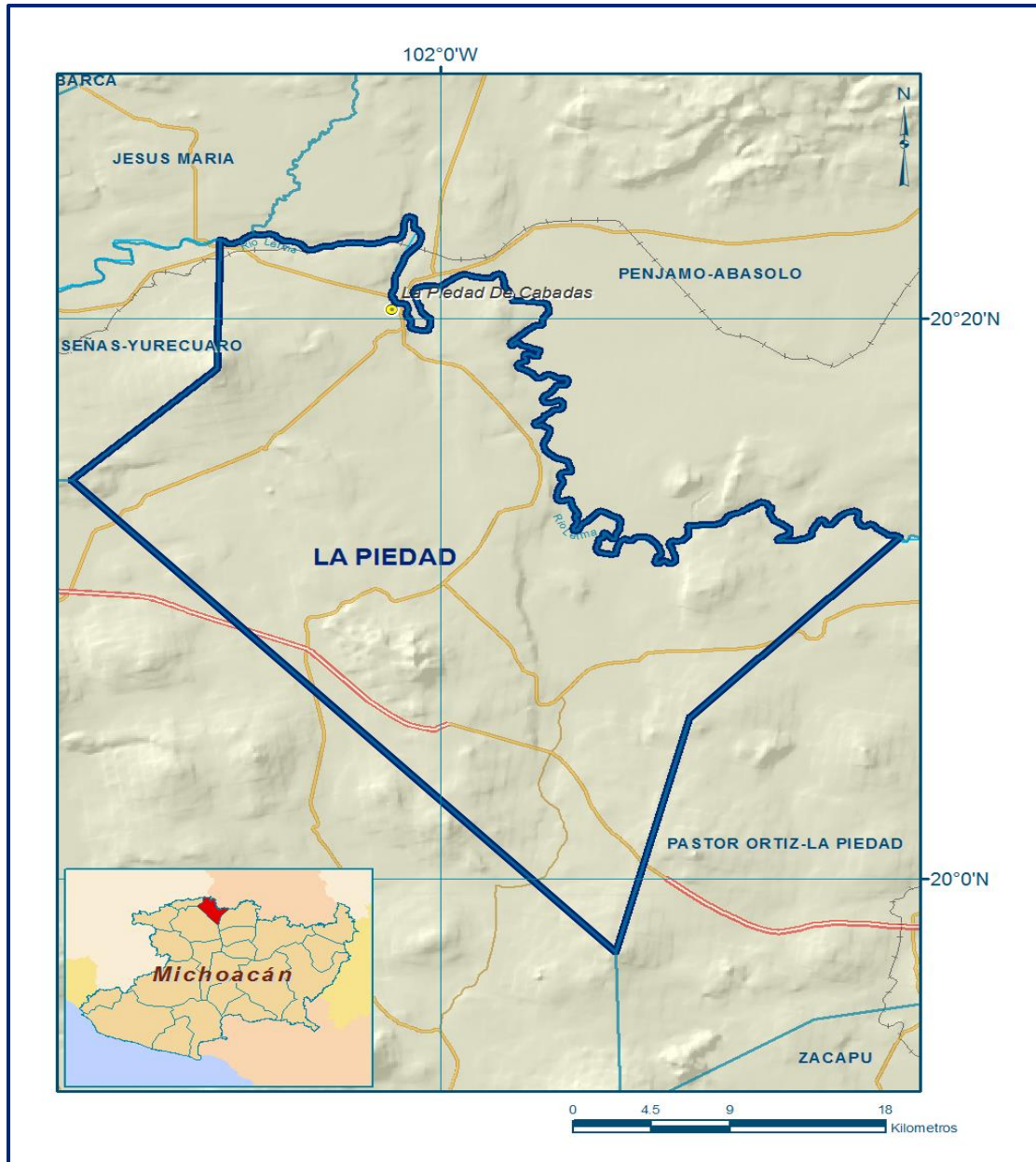


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1623 LA PIEDAD							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	11	25.0	20	14	14.0	
2	102	6	55.0	20	18	13.0	
3	102	6	47.9	20	22	49.1	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE ESTATAL
4	102	5	45.3	20	23	1.0	DEL 4 AL 5 POR EL LIMITE ESTATAL
5	101	45	44.5	20	12	11.0	
6	101	52	16.5	20	5	46.9	
7	101	54	33.0	19	57	24.8	
1	102	11	25.0	20	14	14.0	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero La Piedad pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Michoacán. Perteneció al Consejo de Cuenca Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. La porción occidental se encuentra sujeta al *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en los terrenos que ocupa y circundan la Ranchería del Salitre en el Estado de Michoacán”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 11 de febrero de 1956. Esta veda es de tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

La mayor parte del territorio se encuentra sujeta al *“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 (DOF) el 20 de octubre de 1987. Esta veda es de tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El principal usuario del agua subterránea es el agrícola. En la porción norte y nororiental se localiza parte del Distrito de Riego 087 Rosario-Mezquite, que comparte en el límite estatal con Guanajuato. A la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona en la que se ubica el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos de evaluación, algunos de ellos para determinar con el objetivo de evaluar su condición geohidrológica y para determinar la disponibilidad de aguas. A continuación, se mencionan los más recientes e importantes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA DE LA PIEDAD, Elaborado por la Coordinación Regional de Infraestructura Hidráulica del Centro de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en el año de 1988. Este trabajo constituye el primer estudio geohidrológico de esta zona, incluyó actividades como el censo e hidrometría, piezometría, exploración geofísica y perforaciones exploratorias para determinar la factibilidad de explotar el agua subterránea para uso urbano, agrícola y pecuario.

Las perforaciones sirvieron para definir las secuencias litológicas y calibrar las exploraciones geofísicas.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO LA PIEDAD MICHOACÁN, elaborado por la Empresa Desarrollo y Sistemas, S.A., para la Comisión Nacional del Agua en el año 2004. Este estudio tuvo como objetivo principal actualizar el conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero, con el propósito de establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles de agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea. Entre sus actividades de campo resaltan el censo e hidrometría, piezometría, ejecución de pruebas de bombeo y nivelación de brocales de pozos, mediante las cuales fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LA BARCA, SAN JOSÉ DE LA PILAS, SAN DIEGO DE ALEJANDRÍA Y JESÚS MARÍA. Realizado Proyectos, Trámites y Supervisión de Construcciones (PROTYC, S.A. de C. V.) en 2005 para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo principal fue determinar la condición geohidrológica de los acuíferos y obtener información básica para determinar su disponibilidad. Concluye que el acuífero Jesús María se encuentra en condición de subexplotación y que es posible incrementar la extracción de las aguas subterráneas, considerando necesario proteger los usos prioritarios.

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, en el 2007 para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo general fue conocer las condiciones actuales de explotación del agua subterránea y el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos; en particular para este documento es de interés los resultados en el acuífero Morelia-Queréndaro, que sirvieron para proponer las políticas de explotación adecuadas y optimizar el aprovechamiento del recurso subterráneo.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO LA PIEDAD, EN EL ESTADO DE MICHOACÁN. Realizado en el 2013 por BETSCO, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. De sus resultados se determinarán las causales de interés y de utilidad pública señaladas en la Ley de Aguas Nacionales, para establecer la medida regulatoria que proceda.

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

De acuerdo con la clasificación fisiográfica de E. Raisz (1964), la zona en la que se ubica el acuífero pertenece a la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico que se caracteriza por grandes expresiones de vulcanismo explosivo, originadas durante eventos relativamente recientes; el desarrollo significativo de sistemas de fallas asociados con manifestaciones volcánicas y grabens o fosas, así como planicies construccionales escalonadas o valles fluviales, aluviales y lacustres, poco disectados.

Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en la Subprovincia denominada “Sierras y Bajíos Michoacanos”, que abarca la totalidad de la superficie de los límites geográficos del acuífero.

La subprovincia de las Sierras y Bajíos Michoacanos se localiza en el centro de la cuenca del río Lerma, se extiende desde La Piedad de Cavadas, Michoacán, hasta Acámbaro, Guanajuato. En el oriente, las efusiones volcánicas generaron, por bloqueo de drenaje, los lagos Yuriria y Cuitzeo. En el área del acuífero se presenta como una franja orientada SE-NW que conforma una sierra volcánica de laderas ocasionalmente escarpadas y otras tendidas con desarrollo de lomeríos.

Los suelos de esta subprovincia son aluviales y residuales, desarrollados a partir de basaltos, brechas, tobas, andesitas y riolitas, todas ellas originadas en los periodos Paleógeno-Neógeno y Cuaternario.

En la porción sureste y suroeste del acuífero se observan sierras volcánicas de laderas escarpadas, con volcanes que alcanzan más de 2000 msnm. Al norte se localiza un estratovolcán conocido con el nombre de Cerro Grande de La Piedad, que es la topoforma más elevada de la zona, con una altura de 2517 msnm. También se presentan mesetas de laderas escarpadas con desarrollo de cañadas y llanuras.

En la zona se ha desarrollado una intensa actividad volcánica dando origen a una serie de volcanes y derrames lávicos, sobre los cuales se ha desarrollado un sistema de corrientes de tipo radial principalmente, aunque en la cabeceras se puede observar en algunos casos un drenaje dendrítico; en los materiales depositados sobre las laderas se han incrementado corrientes de tipo funiforme (pluma) debido a la consistencia de los materiales; así como de corrientes paralelas que se observan principalmente al sur.

3.2 Clima

Con base en la clasificación de climas elaborada por W. Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, se determina que en la superficie cubierta por el acuífero predomina el tipo de clima templado (C) semicálido con lluvias en verano, que se manifiesta en forma de 3 subgrupos: (A)C(wo) que corresponde a un tipo de clima semicálido subhúmedo, con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.

Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T (precipitación/temperatura) menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. C(w1) templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. C(w2) templado, subhúmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente hasta 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 40 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero, tanto en el estado de Michoacán como en Guanajuato y Jalisco. En Michoacán las estaciones Camécuaro, Carapán, Corrales, Cuimato, Chaparaco, Zamora, Huaniqueo, Jesús del Monte, La Estanzuela, Panindícuaro, Presa Gonzalo, Presa Guaracha, Presa Jaripo, La Piedad Cavadas, Puruándiro, San Cristóbal Ixtlán, Santa Fe del Río, Tangancícuaro, Urepetiro, Copándaro, El Rosario, Orandino, Emiliano Zapata, Villa Jiménez II, Las Cruces, Galena, El Pueblito, Caurio de Guadalupe y Huandacaraqueo. En Guanajuato las estaciones Mariano Abasolo, La Golondrina, Agua Tibia, Adjuntas y Cerano. En el estado de Jalisco las estaciones La Yerbabuena, El Fuerte, Jamay, Atotonilco El Grande y Jesús María.

Con los registros obtenidos para el periodo 1970-2012 y utilizando el método de Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **781 mm/año y 18.5 °C** respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio es de **1800 mm anuales**.

3.3 Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica RH12 Lerma-Santiago, Subregión Hidrológica Medio Lerma, dentro la subcuenca Lerma-Chapala, la cual está orientada de este a oeste, se inicia al norte de la localidad de Angamacutiro, en la confluencia de los ríos Lerma y Duero, y termina precisamente en la desembocadura del Lerma en la Laguna de Chapala.

Las corrientes se pueden agrupar en exorreicas, que drenan hacia el Océano Pacífico y en endorreicas, cuyo drenaje es hacia vertientes interiores y que descargan en vasos lacustres. La principal corriente exorreica es el Río Lerma, que nace en la Sierra del Ajusco y atraviesa por la parte norte del estado hasta la cuenca de Lago de Chapala, que es una fosa tectónica de reciente formación, continuando en el Río Grande de Santiago que atraviesa la Sierra Madre Occidental para descargar en el Océano Pacífico.

Entre sus principales afluentes michoacanos están los ríos Talpujahua, El Cachivi, El Tanhuato, El Angulo y El Duero. La corriente más importante es el Río Lerma con trayectoria aproximada sureste–noroeste, que representa el límite estatal entre Guanajuato y Michoacán y a su vez límite administrativo del acuífero La Piedad.

3.4 Geomorfología

Se distinguen varios rasgos geomorfológicos representativos: Las planicies o llanuras aluviales, lomeríos, sierras y mesetas. Predominan las sierras y mesetas y en menor proporción los lomeríos y la llanura. En la porción sureste del acuífero, existen lomeríos bajos que forman parte de aparatos volcánicos, que es una unidad miembro del evento volcánico Plio-Cuaternario.

Las sierras y mesetas disectadas se presentan principalmente al oriente y nororiente del acuífero y se correlacionan con el Subgrupo Volcánico Superior del evento que dio origen a la Sierra Madre Occidental en el Oligoceno-Mioceno. Las sierras volcánicas poco a poco disminuyen sus escarpes hasta dar lugar a un lomerío que representa la transición hacia las llanuras aluviales asociadas al cauce del Río Lerma y a una fosa tectónica denominada Graben de Penjamillo.

4. GEOLOGÍA

La región en la que se ubica el acuífero pertenece a la Provincia Geológica del Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana constituida por una franja volcánica que cruza transversalmente la República Mexicana a la altura del paralelo 19°, con una orientación este-oeste conformada por una gran variedad de rocas y aparatos volcánicos, entre las que predominan los derrames y productos piroclásticos de composición basáltica y andesítica, y en menor proporción rocas dacíticas, riódacíticas y manifestaciones locales aisladas de vulcanismo riolítico (figura 2).

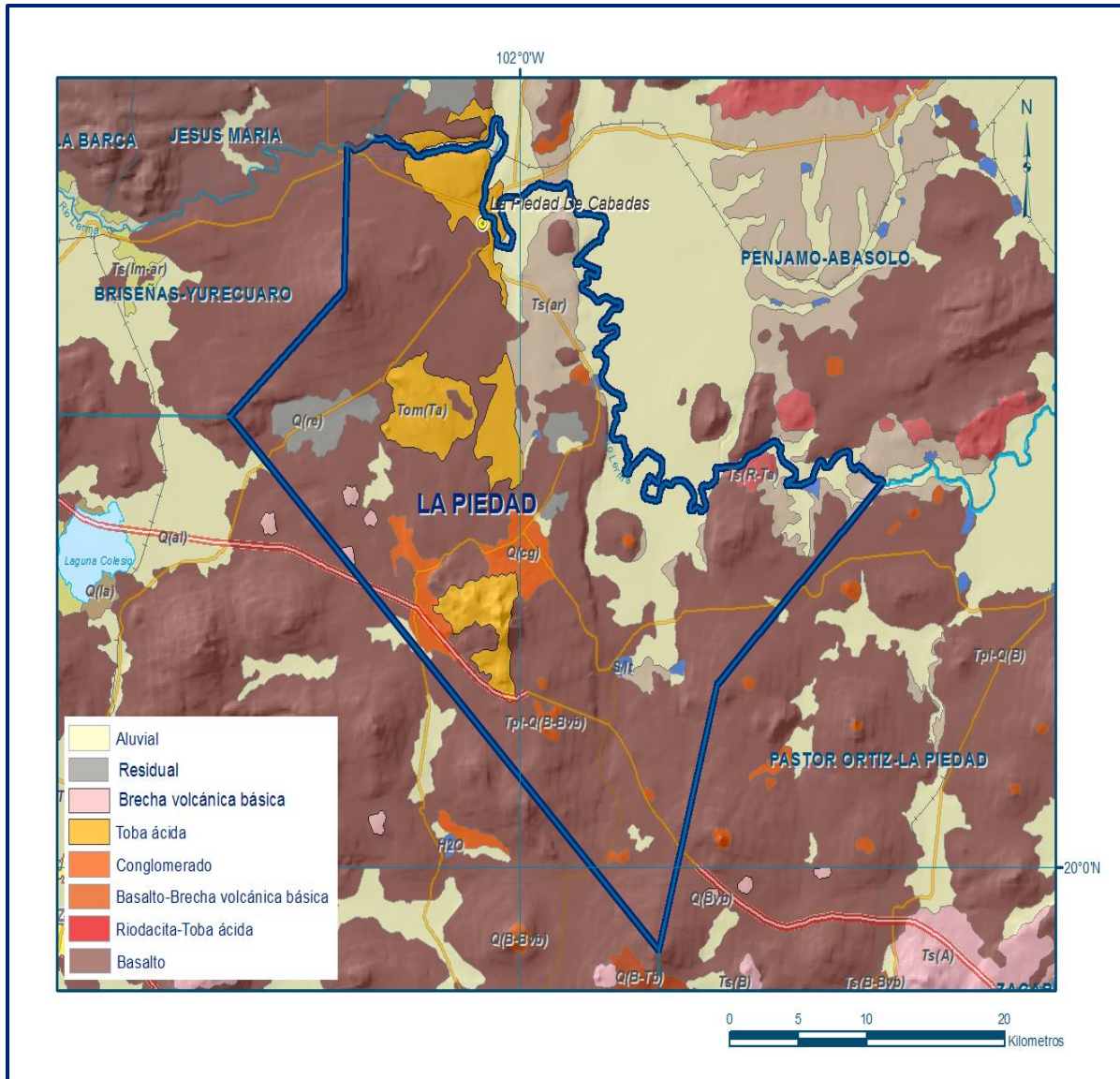


Figura 2. Geología general del acuífero

El inicio de la actividad volcánica del Eje Neovolcánico está relacionado a la subducción de la Placa de Cocos bajo la corteza continental mexicana. La mayor parte de los investigadores coinciden en que dicha actividad volcánica se inició en el Oligoceno y ha continuado hasta el Reciente, aunque estudios más detallados han demostrado que la edad más acertada de esta provincia se localiza en el intervalo Plio-Cuaternario.

Por ser una de las provincias más jóvenes del país, traslapa o cubre discordantemente a otras provincias geológicas, como es la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur y

Sierra Madre Occidental. Su contacto con ésta última es de tipo tectónico, mediante fallamiento transcurrente localizado en el denominado Río Grande de Santiago.

Los Valles La Piedad, Ciénega de Chapala y La Barca-Yurécuaro, pertenecen a la Cadena Transmexicana Oeste, por lo que los eventos en tiempo y espacio son comunes.

El estado de Michoacán y la porción sur de Jalisco se caracterizan por la gran actividad volcánica Plio-Cuaternaria, que varía en composición de basaltos a dacitas, riodacitas y riolitas; sin embargo, estas últimas se encuentran preferentemente en su porción oriental.

Por otra parte, el vulcanismo en el estado de Michoacán, cubre una superficie aproximada de 20,000 km², sobre la cual se localizan más de 3,000 volcanes que se encuentran limitados al sur por la cuenca del Balsas; al norte por la depresión del Bajío y el sistema de fracturas Querétaro-San Miguel; el anticlinal de Tzitzio-Huetamo al oriente, y al occidente por las rocas volcánicas Oligo-Miocénicas del Lago de Chapala.

4.1 Estratigrafía

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas volcánicas y sedimentarias, cuyo registro estratigráfico comprende del Paleógeno-Neógeno al Reciente. A continuación, se presenta la descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

Basamento

No aflora ni ha sido detectado mediante perforaciones. De acuerdo a la estratigrafía de la región corresponde al Conglomerado Rojo, de Edad Paleógeno-Neógeno, y a sedimentos calcáreos del Cretácico.

TERCIARIO (NEÓGENO)

Toba ácida

Secuencia conformada principalmente por ignimbritas riolíticas y riodacíticas, tobas líticas y riolíticas que presenta estructura esferulítica y fluidal con fracturas que originan lajas; su textura es merocrystalina y piroclástica; de coloración rosada característica con tonalidades beige claro.

A escala regional se ha identificado que esta unidad sobreyace en discordancia a rocas sedimentarias del Cretácico Superior y subyace a rocas volcánicas básicas del Plio-Cuaternario. Estudios cronométricos efectuados en la localidad de la presa Santa Rosa, en el estado de Jalisco, por la Universidad de Arizona determinaron una edad de 16.9 $\pm$ 5 millones de años, correspondiente al Mioceno; su morfología típica es de sierras altas con laderas de pendiente abrupta.

Riolita-Toba ácida

Unidad volcánica compuesta por una secuencia arrítmica de tobas y derrames riolíticos. Las tobas tienen textura cristalina y lítica, se presentan compactas en pseudocapas de aspecto masivo, de color rosa a pardo claro con intercalaciones de derrames de riolitas fluidales.

Se correlaciona con el Subgrupo Volcánico Superior del evento que originó la Sierra Madre Occidental durante el Oligoceno-Mioceno, según datación por el método K-Ar, en tanto que el SGM le asigna una edad a partir del Mioceno hasta el Plioceno. Bengoechea y otros (1963) le asignan una edad Plioceno.

A nivel regional, cubre en forma discordante a unidades cretácicas y de la misma manera subyace a rocas de edad Plio-Cuaternario Morfológicamente se caracterizan por manifestarse en forma de sierras con mesetas disectadas.

Areniscas

Unidad clástica continental, de textura de grano fino a grueso que varía de subangulosos a subredondeados, con granos de cuarzo, plagioclasas y partículas de roca con cementante calcáreo. Presenta estratificación delgada.

La unidad sobreyace discordantemente a riolitas y tobas ácidas del Neógeno y subyace a la unidad volcánica del Plio-Cuaternario. Su expresión morfológica es de lomeríos de pendiente moderada; por sus características físicas se le asigna permeabilidad baja a media, de acuerdo al contenido de arcillas.

Basaltos-brecha volcánica

Unidad volcánica piroclástica de composición básica y derrames de basalto de color negro. Los productos piroclásticos forman pseudocapas de hasta 1 m de espesor; las brechas volcánicas, con lapilli y cenizas forman principalmente conos volcánicos y se observan además productos de explosión como bombas.

Los derrames basálticos son de color negro y estructura vesicular, ocasionalmente de coloración rojiza. Su expresión morfológica es de cerros bajos que constituyen parte de aparatos volcánicos.

Esta unidad es miembro del evento volcánico Plio-Cuaternario y aflora principalmente en la porción sureste del área. Por sus características litológicas que le confieren baja permeabilidad, en sus afloramientos se presentan áreas de escurrimiento superficial.

CUATERNARIO

Basaltos

Unidad constituida por basalto, basalto andesítico y esporádicamente andesita basáltica; de estructura vesicular, amigdaloides y compacta; presenta fallamiento de tipo normal escalonado. Cubren a rocas sedimentarias e ígneas intrusivas del Cretácico y a rocas volcánicas ácidas del Oligoceno-Mioceno y subyacen a depósitos clásticos del Cuaternario. Forman parte de los eventos volcánicos de composición basáltica intermedia del Eje Neovolcánico y se le asigna una edad del Plioceno-Cuaternario (Demant 1978). Esta unidad se caracteriza por derrames lávicos que forman mesetas, corrientes lávicas, conos cineríticos y estratovolcanes como el cerro Grande de La Piedad. En superficie constituyen excelentes zonas de recarga y en el subsuelo conforma acuíferos de permeabilidad media a alta.

Aluvión

Unidad detrítica no consolidada constituida por gravas, arenas, limos y arcillas; procedentes de distintos tipos de litología y con diversos grados de redondez. Ocasionalmente a esta unidad se le adiciona material producto de alteración meteórica principalmente de rocas de composición básica.

Morfológicamente se presenta conformando planicies aluviales que rellenan los valles, por lo que se encuentra ampliamente distribuida en el área. Su potencialidad hidrogeológica está en función de su espesor, la heterogeneidad de los clastos y su contenido de arcillas. En general, presenta permeabilidad media.

Depósitos residuales y lacustres

Están constituidos por depósitos residuales y lacustres, constituidos por limos y arcillas, de baja permeabilidad que se han acumulado en algunas depresiones topográficas.

4.2 Geología estructural

El marco geológico-estructural del área es producto de los esfuerzos que dieron origen al Eje Neovolcánico y los diferentes eventos distensivos que se manifestaron en el Cenozoico. Los principales rasgos estructurales de la zona están representados por fallas de tipo normal y fracturas. Las fallas normales de gran magnitud probablemente están asociadas con la formación del Eje Neovolcánico, las principales a un sistema de que define dos grabens y un horst.

El primero está representado por el Valle de Numarán, limitado por dos fallas normales orientadas en dirección norte a sur que representan un sistema de fracturamiento tanto local como regional.

El segundo graben se localiza hacia al norte y continúa fuera de la zona en el Estado de Guanajuato, dando origen al valle de Pénjamo– Abasolo, limitado por dos fallas orientadas NE-SW.

Entre los dos grabens descritos, se forma el horst denominado de Tacubaya, en el cual afloran rocas sedimentarias lacustres del Paleógeno-Neógeno.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica generada durante el 2013 y en estudios previos, así como por correlación con acuíferos vecinos, se concluye que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulare

s de granulometría variada, conglomerados y areniscas que rellenan los valles. Esta es la principal unidad que comúnmente se utiliza para satisfacer las necesidades de agua de la zona, su espesor supera los 100 m y en general presenta permeabilidad media. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición basáltica, en forma de basaltos, brechas y tobas, y en menor proporción tobas y riolitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

La región está afectada por sistemas de fallas normales, con orientación norte-sur; oriente-poniente y noreste-sureste; cuyos desplazamientos relativos, han originado discontinuidades laterales entre las diferentes unidades de la columna estratigráfica local; definiendo con esto, una distribución espacial compleja de los horizontes productores.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento a profundidad, así como por la secuencia vulcanosedimentaria constituida por areniscas y conglomerados rojos formados por clastos de tobas y calizas

La interpretación de los sondeos eléctricos permite identificar la existencia de grabens extensionales a profundidades que varían de 200 a 400 m, delimitados por altos estructurales en las rocas volcánicas que constituyen su basamento, rellenos de depósitos areno-arcillosos, gravas y conglomerados.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, de granulometría variada, conglomerados, areniscas y ocasionalmente por depósitos lacustres, cuyo espesor supera los 100 m al centro de los valles.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. El acuífero puede presentar condiciones de semiconfinamiento debido a la presencia de depósitos lacustres en superficie y a la existencia de interestratificaciones de arcillas sobre las rocas volcánicas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2013, se ejecutaron 5 pruebas de bombeo de corta duración (6 a 12 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Neuman, Theis y Jacob. Adicionalmente, en el estudio realizado en 2004, se realizaron 10 pruebas de bombeo de corta duración también en etapas de abatimiento y recuperación.

Los resultados de su interpretación indican que los valores obtenidos de transmisividad son muy variables de 4.1×10^{-5} a 41.0×10^{-3} , en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de 1.4×10^{-6} a 1.5×10^{-3} m/s. Los valores más altos de

conductividad hidráulica y de transmisividad se asocian a depósitos clásticos de mayor granulometría y rocas volcánicas fracturadas (basaltos, andesitas, brechas y tobas ácidas); en tanto que los más bajos corresponden a sedimentos finos y a rocas con bajo grado de fracturamiento. Ambos parámetros son representativos de materiales de granulometría heterogénea.

Sólo una prueba de bombeo realizada en 2013 contó con pozo de observación; obteniéndose un valor de rendimiento específico de 0.07.

Geohidrológicamente las unidades con mayor potencial son los depósitos granulares y las rocas fracturadas; los primeros por su porosidad y consecuente permeabilidad, se localizan preferentemente dentro del graben de Numarán, extendiéndose este acuífero granular hacia el acuífero de Pénjamo-Abasolo. Por lo que respecta en rocas fracturadas, su potencialidad es alta y depende de la intensidad y frecuencia del fracturamiento, así como de las estructuras regionales que las afectan, conforman los flancos del Graben de Numarán, justo en donde se localizan las localidades La Piedad y Numarán.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades de los estudios realizados en 2004 y 2013.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2013 presenta valores que varían de 15 a 170; los valores más someros, de 15 a 40 m, se registran en la zona cercana al cauce del Río Lerma, en la parte baja de la cuenca, entre las poblaciones Cañada de Ramírez, Numarán y Zerécuato, desde donde se incrementan gradualmente hacia el sur y occidente del acuífero donde se localizan las estribaciones de las sierras que lo delimitan, y hacia el oriente del río, en el acuífero vecino Pénjamo-Abasolo, en el estado de Guanajuato.

En la zona comprendida entre Río Grande y Colonia Melchor Ocampo, y entre La Cuestita y San José de Rábago, se registran niveles freáticos someros menores de 10 m, que son explotados mediante norias. Debido a que se ubican en las cercanías del cauce del Río Lerma y en zonas agrícolas, es posible que estén induciendo flujo de la

corriente superficial del río, o se trate de niveles colgados alimentados por los retornos del riego agrícola.

Los valores más profundos se presentan en Ziquitaro, ubicado al sur del acuífero, y hacia los poblados Paredones y El Guaje, ubicados en la porción occidental (figura 3).

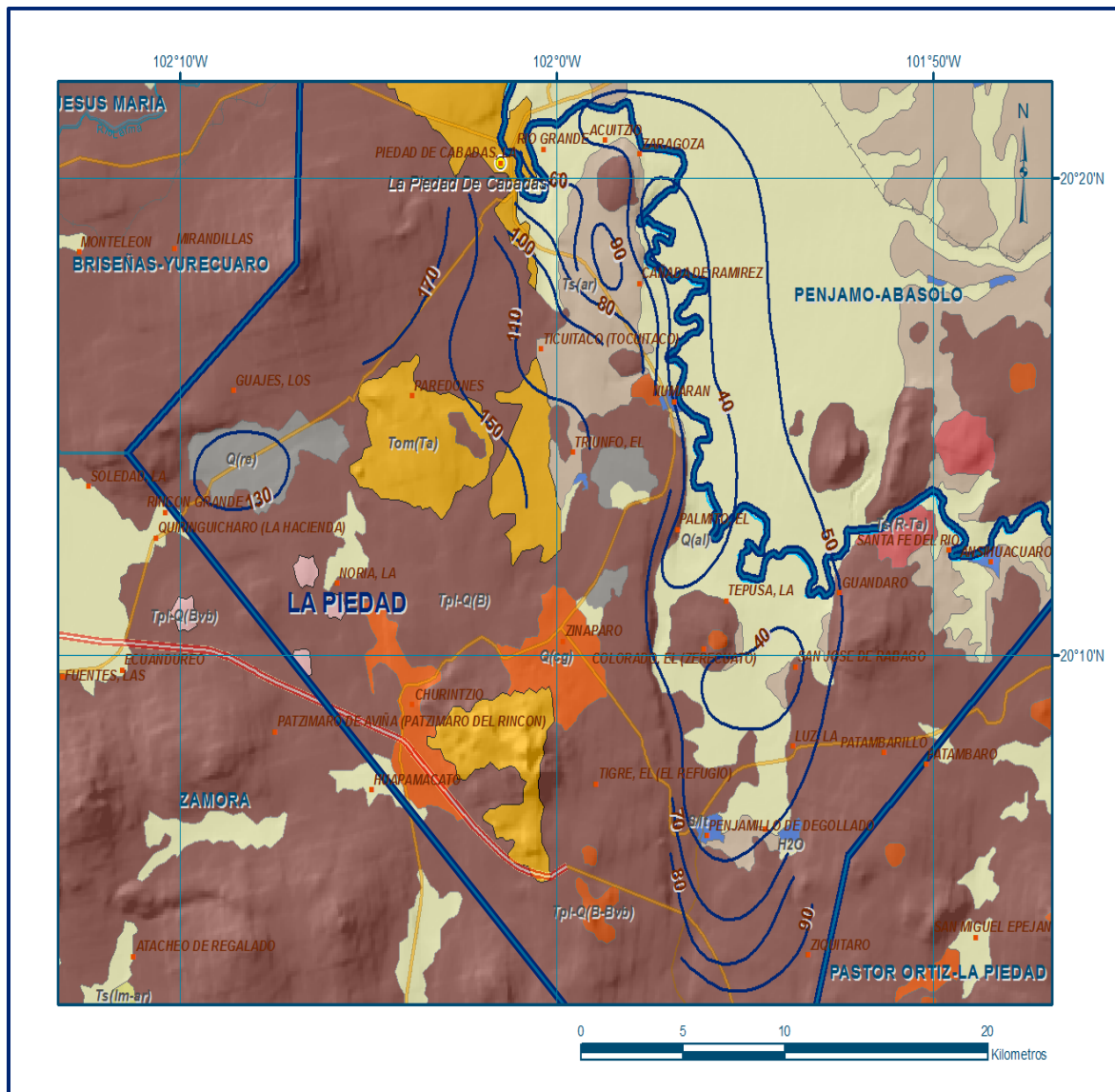


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para el año 2013, registra valores que varían de 1600 a 1750 msnm.

Las menores elevaciones, de 1600 a 1620 msnm, se registran en la porción norte y nororiental del acuífero, a lo largo del cauce del Río Lerma; en tanto que las mayores elevaciones, de 1670 a 1750, se registran en las porciones altas de la cuenca, desde donde descienden gradualmente, al igual que la profundidad, por efecto topográfico hacia la porción baja (figura 4), mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo de sur a norte, alimentada por los flujos provenientes de los flancos de las sierras que delimitan los valles.

En el extremo occidental del acuífero, se identifica un parteaguas superficial y subterráneo hacia el acuífero vecino Zamora.

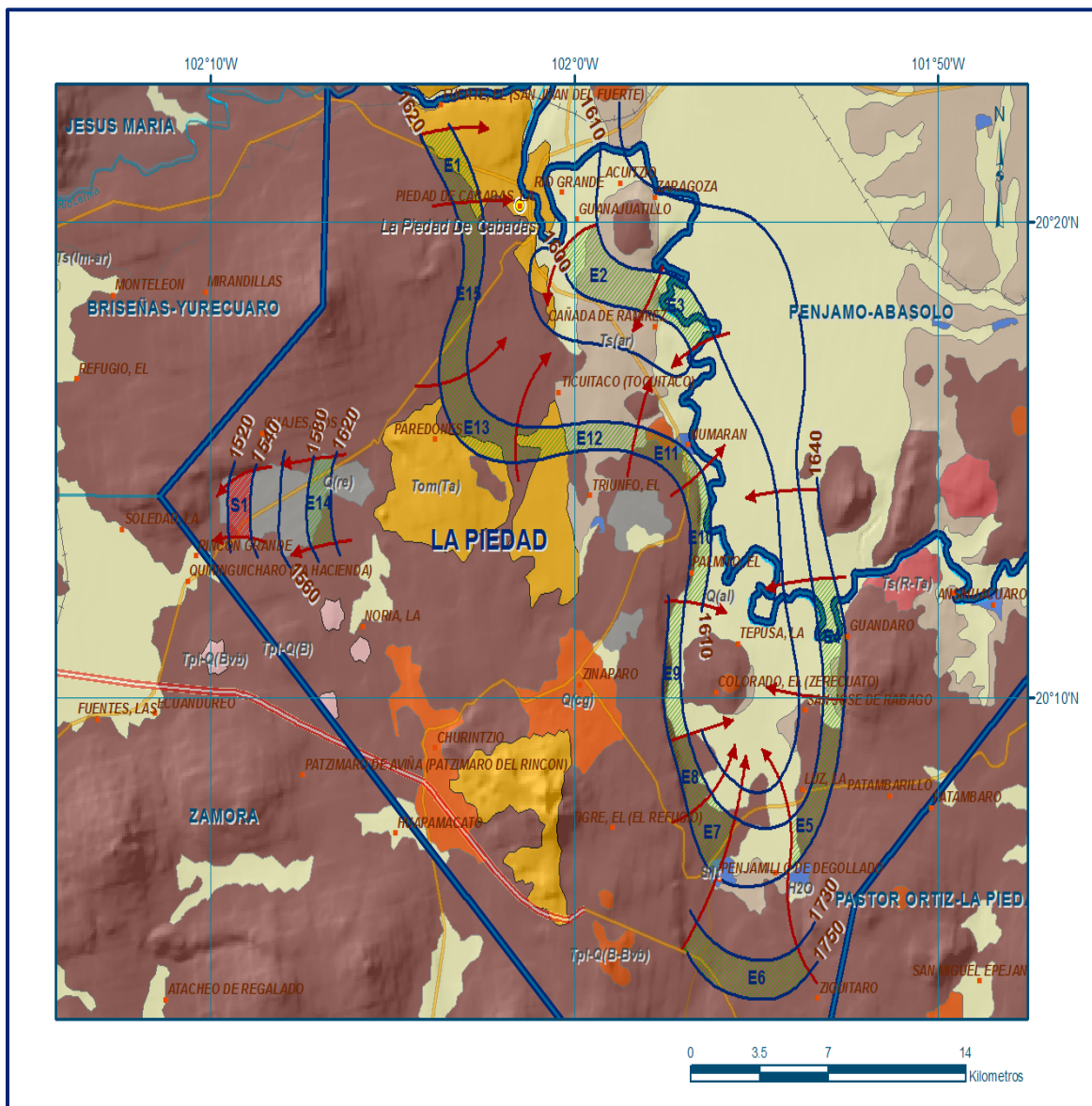


Figura 4. Elevación del nivel estático msnm (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2004-2013, se observa que se registran abatimientos de 2 a 12 m, que representan un promedio anual de 0.2 a 1.3 m. Los mayores abatimientos se registran en las inmediaciones del poblado Zerécuato, y al sur de La Piedad, donde se localiza la zona agrícola (figura 5).

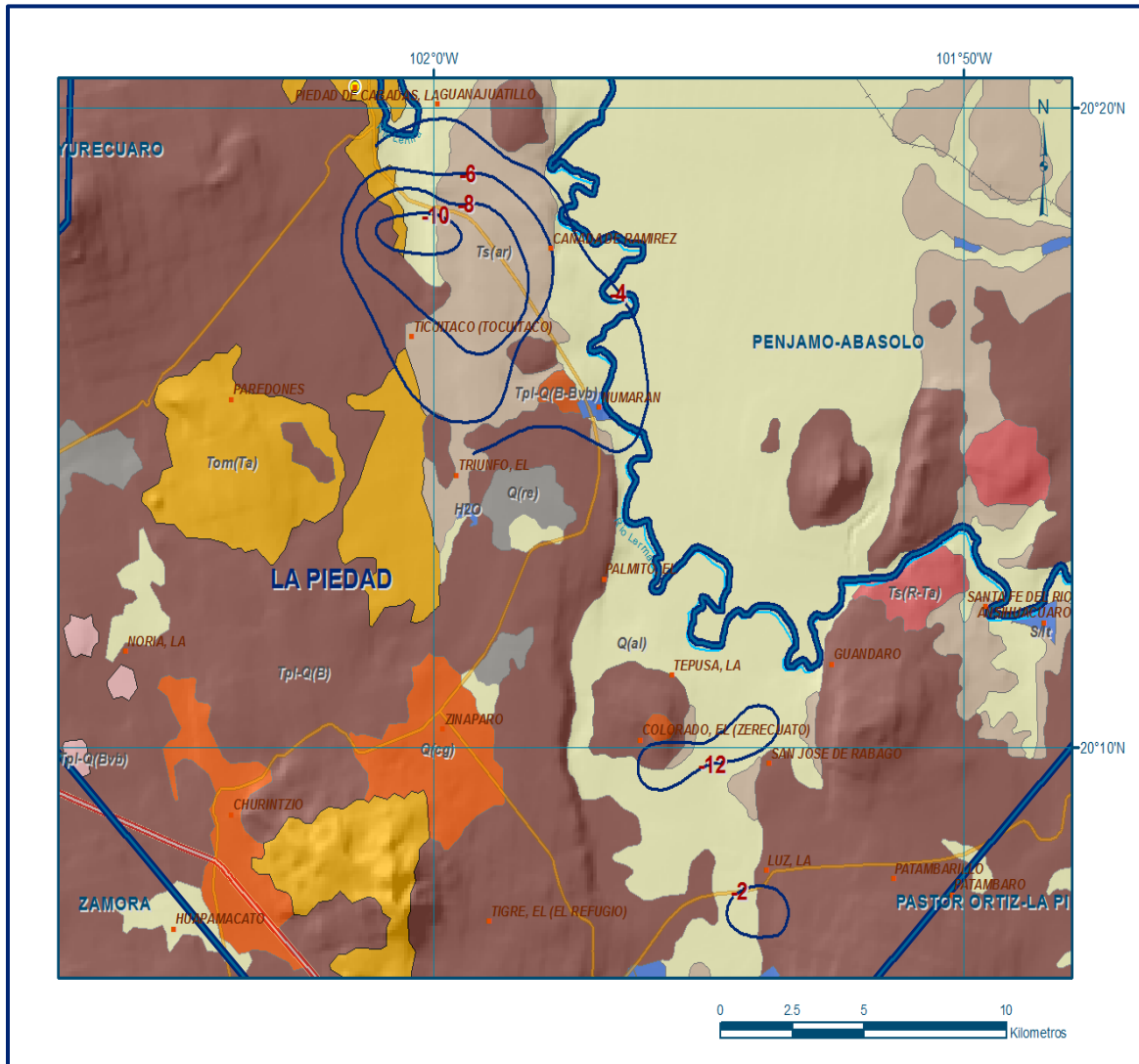


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2004-2013)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en los estudios realizados en 2004 y 2013, se tomaron 115 y 15 muestras de agua subterránea, respectivamente, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación.

Las determinaciones en 2004 sólo incluyeron sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica y temperatura. Las muestras obtenidas en 2013 se enviaron al laboratorio para su análisis fisicoquímico correspondiente; las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio, potasio, manganeso, fierro y sílice. Esta información servirá para la caracterización hidrogeoquímica.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que de manera general los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) varían de 100 a 1000 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD, para el agua destinada al consumo humano. Sólo una muestra presenta una concentración de 1123 mg/l de STD.

Los valores más altos, de 500 a 1000 mg/l, se registran en la porción norte del acuífero, confirmando la dirección preferencial del flujo subterráneo, y de manera puntual en algunos aprovechamientos someros a lo largo del cauce del Río Lerma, posiblemente asociados a la presencia de los contaminantes que éste conduce.

De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica no rebasan el límite de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sus valores extremos son de 126 y 1852 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las temperaturas registradas varían de 7.8 a 56.0 °C y el pH varía de 6.4 a 8.6.

Con respecto a las familias del agua por iones dominantes, predomina la familia bicarbonatada cálcica y en menor proporción la familia a bicarbonatada-sódica; ambas representan el agua de reciente infiltración, con tiempos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas volcánica, que constituyen las zonas de recarga ubicadas en las sierras que delimitan el acuífero.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la mayoría de las muestras se clasifican como C2-S1 que representan contenido medio de sales y baja concentración

de sodio intercambiable, y C2-S2 que representa contenido medio de sales y concentración media de sodio, que se consideran aptas para el uso agrícola, en suelo con buen drenaje.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2013, se registraron un total de 455 obras que aprovechan el agua subterránea y se identificaron de la base del REPDA 220 más; es decir un total de 675, de los cuales 642 pozos, 31 norias y 2 manantiales.

Del total de obras, 577 están activas, 32 están inactivas temporalmente por deficiencias del equipo de bombeo y los 66 restantes se consideran inactivas de manera permanente. Del total de obras activas, 297 se destinan al uso agrícola, 142 al uso público-urbano, 67 para uso doméstico, 46 más para uso pecuario, 11 para servicios y 14 para usos múltiples.

El volumen de extracción asciende a **69.2 hm³ anuales**, de los cuales 49.4 hm³ (71.4 %) se destinan al uso agrícola, 12.0 hm³ (17.3 %) para uso público-urbano, 6.6 hm³ (9.5 %) para uso pecuario, 1.1 hm³ (1.6 %) para uso de servicios y 0.1 (0.2 %) para usos múltiples.

Adicionalmente, a través de los 2 manantiales se descarga un caudal de 3.5 lps, que representa un volumen anual de 0.1 hm³, destinado al uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2004-2013, en una superficie de 242 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 con la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

$$\begin{array}{ccccc} \text{Entradas} & & \text{Salidas} & & \\ \text{(E)} & - & \text{(S)} & = & \text{Cambio de almacenamiento} \end{array}$$

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:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

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

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_v = Sh + B + ETR + Dm - Eh - Ri \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

En la recarga vertical (R_v), se incluye la que ocurre por efecto de la lluvia sobre la superficie del acuífero y la que se produce a lo largo de los arroyos y ríos.

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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 del pie de monte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación localizada en la planicie.

Las entradas al acuífero, tienen su origen en las zonas de recarga localizadas en las sierras que rodean que al valle.

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 2004 (figuras 4) mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

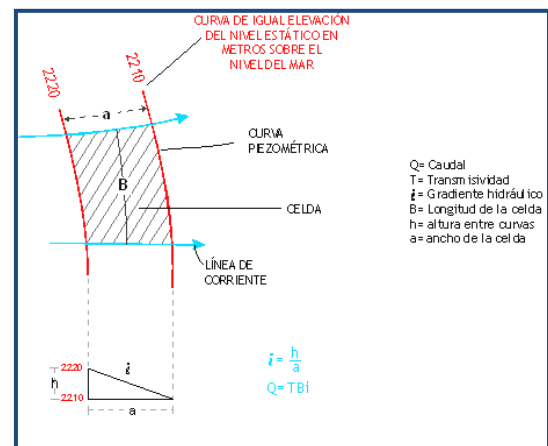
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m^2/s)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda.

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **37.0 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2013)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E1	3015	1510	10	0.0066	0.0020	0.0399	1.3
E2	4640	1855	10	0.0054	0.0001	0.0025	0.1
E3	3245	1625	10	0.0062	0.0005	0.0100	0.3
E4	4640	1390	20	0.0144	0.0010	0.0668	2.1
E5	6030	1045	20	0.0191	0.0015	0.1731	5.5
E6	6260	1390	20	0.0144	0.0015	0.1351	4.3
E7	2320	1970	20	0.0102	0.0020	0.0471	1.5
E8	2900	810	20	0.0247	0.0020	0.1432	4.5
E9	5335	695	20	0.0288	0.0010	0.1535	4.8
E10	5220	930	10	0.0108	0.0020	0.1123	3.5
E11	3245	1160	10	0.0086	0.0005	0.0140	0.4
E12	6030	1390	10	0.0072	0.0022	0.0954	3.0
E13	4405	1855	10	0.0054	0.0022	0.0522	1.6
E14	3480	1160	40	0.0345	0.0005	0.0600	1.9
E15	6955	1045	10	0.0096	0.0010	0.0666	2.1
Total entradas							37.0

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en 2004 y 2013, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

7.1.3. Recarga inducida (R_i)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, por correlación con acuíferos vecinos, se consideró que un 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo.

El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 192.7 hm^3 anuales, de los cuales 49.4 hm^3 son agua subterránea y 143.3 hm^3 agua superficial (promedio

utilizado en los dos últimos ciclos anuales agrícolas en la superficie del Distrito de Riego que se localiza en el acuífero). Si consideramos que el 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero, obtenemos un volumen de **19.3 hm³ anuales** de recarga por retornos de riego.

Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y de alcantarillado es del orden del 20 al 45 %.

Para este caso se consideró que el 15% del volumen destinado al uso público urbano (12.3 hm³ anuales) se infiltra como recarga efectiva al acuífero. Es decir que la recarga inducida de esta manera es de 1.8 hm³ anuales.

Por lo tanto, el volumen total por recarga inducida es: **Ri = 21.1 hm³/año.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre mediante bombeo (B); de manera natural a través de flujo subterráneo (Sh) y por manantiales (Dm). No existe descarga por evapotranspiración (ETR) ni por flujo base (Dfb) en el Río Lerma.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría el volumen de extracción por bombeo es de **69.2 hm³/año.**

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2013; su valor estimado es de **3.15 hm³/año**, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo subterráneo horizontal (2013)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	2320	1160	20	0.0172	0.0025	0.1000	3.15
TOTAL							3.15

7.2.3. Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 2 manantiales que en conjunto des-cargan 3.5 lps, es decir un volumen estimado de **0.1 hm³ anuales.**

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2004-2013 (figura 5). Con base en ella y considerando un coeficiente de almacenamiento $S = 0.07$, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 242 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V_S = S * A * h$$

Donde:

ΔV_S = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

h= Valor de la variación piezométrica en el período (m);

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2004-2013 se pueden observar en la tabla 4.

El volumen anual del cambio de almacenamiento para este periodo es de -35.1 hm³, que representa un promedio anual de **-3.9 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2004-2013)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-8 a -10	-9	15.0	0.07	-9.5
-6 a -8	-7	19.0	0.07	-9.3
-4 a -6	-5	28.0	0.07	-9.8
-2	-2	2.0	0.07	-0.3
-10	-10	3.0	0.07	-2.1
-12	-12	5.0	0.07	-4.2
0	0	170.0	0.07	0.0
Área de balance		242.0	TOTAL	-35.1
		Promedio anual		-3.9

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical (Rv). De la ecuación (2), se obtiene que:

$$\begin{aligned} R_v &= Sh + B + ETR + D_m - E_h - R_i \pm \Delta V(S) \quad (2) \\ R_v &= 3.15 + 69.2 + 0.0 + 0.1 - 37.0 - 21.1 - 3.9 \\ R_v &= 10.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

De esta manera el valor de la recarga total R es:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 10.4 + 37.0 + 21.1 \\ R &= 68.5 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{DISPONIBILIDAD MEDIA} & = & \text{RECARGA} & - & \text{DESCARGA} & - & \text{EXTRACCIÓN DE} \\ \text{ANUAL DE AGUA DEL} & & \text{TOTAL} & & \text{NATURAL} & & \text{AGUAS} \\ \text{SUBSUELO EN UN} & & \text{MEDIA} & & \text{COMPROMETIDA} & & \text{SUBTERRÁNEAS} \\ \text{ACUÍFERO} & & \text{ANUAL} & & & & \end{array}$$

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
R = Recarga total media anual
DNC = Descarga natural comprometida
VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **68.5 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base 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 La Piedad, su valor es de **DNC = 0.1 hm³ anuales** que corresponden a la descarga a través de manantiales.

La salida por flujo subterráneo hacia el acuífero Zamora, no se considera comprometida porque no existe infraestructura para su aprovechamiento aguas abajo.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **54,903,848 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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 extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 68.5 - 0.1 - 54.903848 \\ \text{DMA} &= 13.496152 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **13,496,152 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

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.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Coordinación Regional de Infraestructura Hidráulica del Centro, 1988. Estudio Geohidrológico de la Zona de La Piedad, Michoacán.