

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE (1119), ESTADO DE
GUANAJUATO**

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. Provincias fisiográficas.....	6
3.2. Clima.....	8
3.3. Hidrografía.....	9
3.4. Geomorfología.....	10
4. GEOLOGÍA.....	11
4.1. Estratigrafía.....	14
4.2. Geología estructural.....	22
4.3. Geología del subsuelo	23
5. HIDROGEOLOGÍA.....	24
5.1. Tipo de acuífero	24
5.2. Parámetros hidráulicos.....	25
5.3. Piezometría	25
5.4. Comportamiento hidráulico.....	26
5.4.1 Profundidad al nivel estático	26
5.4.2 Elevación del nivel estático	27
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	28
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	29
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	31
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	31
7.1. Entradas	32
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	32
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	33
7.1.3 Recarga incidental (Ri)	35
7.2. Salidas.....	35
7.2.1 Bombeo (B).....	35
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	36
7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm).....	36
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	36
8. DISPONIBILIDAD	37
8.1. Recarga total media anual (R).....	38
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	38
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	38
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	39
9. BIBLIOGRAFÍA	40

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 Irapuato-Valle, definido con la clave 1119 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo sur del estado de Guanajuato, en el límite con el estado de Michoacán, entre los paralelos 20°12' y 20°53' de latitud norte y los meridianos 101°01' y 101°33' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,437 km². Limita al norte con el acuífero Silao-Romita, al noreste con Cuenca Alta del Río Laja, al este con Valle de Celaya, al sur y sureste con Ciénega Prieta-Moroleón, al oeste con Pénjamo-Abasolo, todos ellos pertenecientes al estado de Guanajuato; el suroeste con el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad, del estado de Michoacán (figura 1).

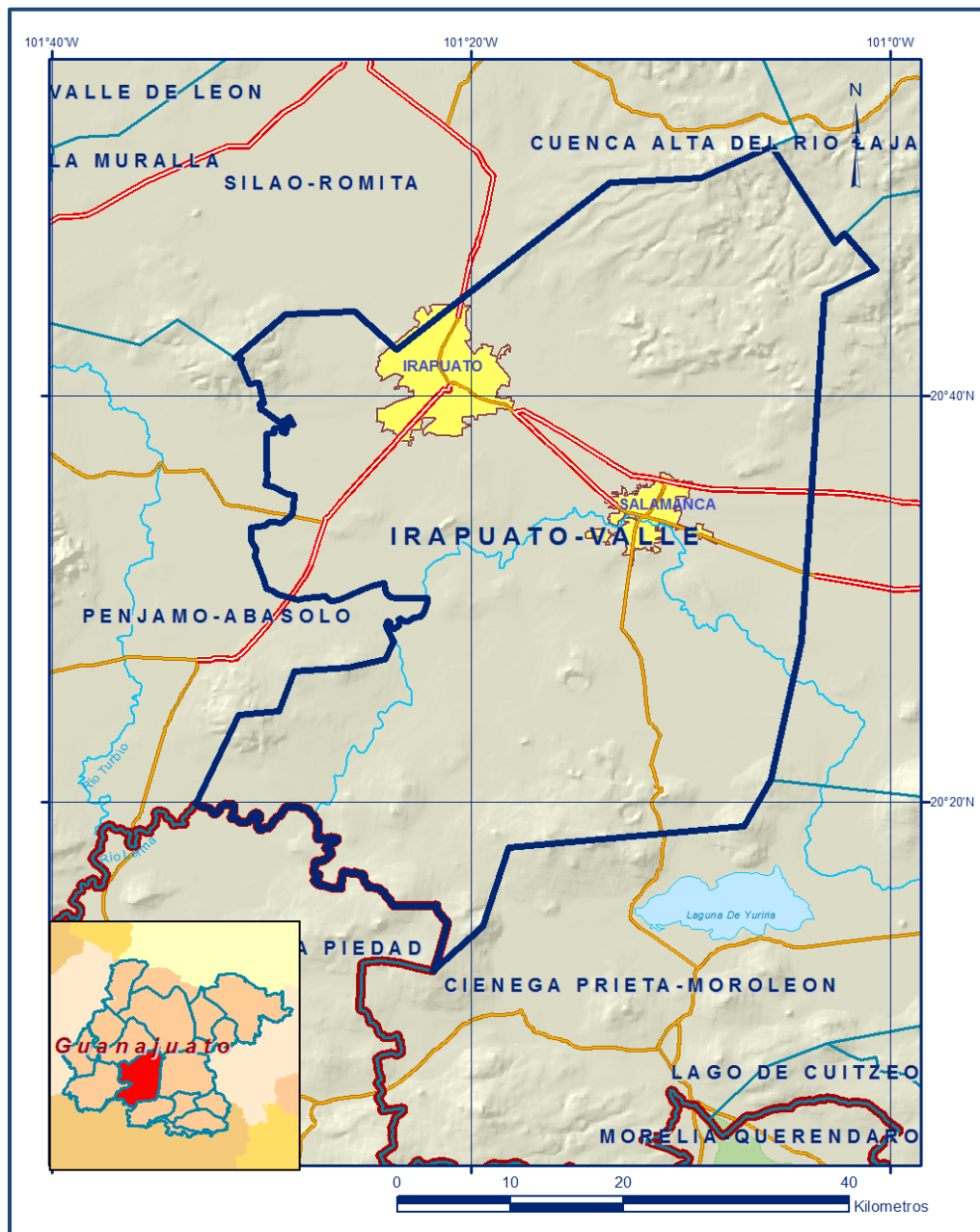


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, la superficie del acuífero comprende la totalidad del municipio Pueblo Nuevo, casi la totalidad de Salamanca, Irapuato, Valle de Santiago y Huanímaro; parcialmente los municipios Yuriria, Jaral del Progreso, Villagrán y Santa Cruz de Juventino Rosas; así como porciones muy pequeñas de Guanajuato, Dolores Hidalgo y Allende.

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

ACUÍFERO 1119 IRAPUATO-VALLE							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	31	16.0	20	41	54.6	
2	101	28	51.6	20	44	2.1	
3	101	25	33.3	20	44	1.4	
4	101	23	32.5	20	42	1.0	
5	101	13	22.8	20	50	33.1	
6	101	9	2.1	20	50	45.7	
7	101	5	38.0	20	52	1.1	
8	101	2	37.2	20	47	34.3	
9	101	2	9.4	20	48	13	
10	101	0	40.0	20	46	1.8	
11	101	3	9.0	20	45	19	
12	101	4	13.8	20	27	54.3	
13	101	5	42.7	20	21	7.5	
14	101	6	57.1	20	18	48.7	
15	101	18	13.0	20	17	46.5	
16	101	19	27.3	20	13	52.9	
17	101	21	49.2	20	11	42.0	DEL 17 AL 18 POR EL LIMITE ESTATAL
18	101	33	9.6	20	19	54.7	
19	101	31	6.3	20	24	19.6	
20	101	29	11.5	20	24	31.2	
21	101	28	26.8	20	26	26.8	
22	101	25	53.0	20	26	39.5	
23	101	24	6.8	20	27	2.5	
24	101	23	42.6	20	27	56.2	DEL 24 AL 1 POR EL LIMITE
1	101	31	16.0	20	41	54.6	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”, al consejo de Cuenca Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guanajuato. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de cuatro decretos de veda.

La mayor parte de está sujeta a las disposiciones del “Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las zonas de Silao, Irapuato y Salamanca, en el estado de Guanajuato”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de junio de 1957, esta veda se clasifica como tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En la porción nororiental está vigente el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las zonas de Silao, Irapuato y Salamanca, en el estado de Guanajuato”, publicado en el DOF el 12 de junio de 1958, esta veda se clasifica como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En el extremo oriental del acuífero, rige el “Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región El Bajío, Zona Celaya”, publicado en el DOF el 29 de octubre de 1952; esta veda se clasifica como tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Por último, el área del extremo suroccidental está regida por el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en diversos Municipios del estado de Guanajuato”, publicado en el DOF el 14 de noviembre de 1983. Esta veda se clasifica como tipo II, en la 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 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El principal usuario del agua subterránea es el agrícola. En la porción central de su territorio, se localiza la mayor parte del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, que corresponde a los Módulos 3 Jaral del Progreso, 4 Valle de Santiago, 6 Salamanca y 7 Irapuato, que reciben agua de la Presa Solís. Los usuarios se encuentran organizados y constituidos en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de Irapuato-Valle de Santiago, A.C., instalado el 6 de noviembre de 1998.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de prospección y evaluación, los más relevantes se describen a continuación:

HERNÁNDEZ L. N., 1991. MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE LEÓN, GUANAJUATO. TESIS PROFESIONAL DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA GEOLÓGICA. FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM. Este es un buen trabajo de referencia porque describe el modelo conceptual del flujo subterráneo, identificando las propiedades de las diferentes unidades hidrogeológicas a partir de la interpretación y recopilación de pruebas de bombeo y aforos que permitieron asignar los parámetros hidráulicos a las principales unidades de mayor interés hidrogeológico.

Define también la columna estratigráfica, describiendo con detalle cada una de las unidades litológicas.

ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES GEOHIDROLÓGICAS ACTUALES Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE: ZONA DE RIEGO PRESA SOLÍS Y VALLE DE SALAMANCA. Realizado en 1992 por Ingeniería de Evaluación y Prospección, S.A. IEPSA, para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo definir la geometría, estructura y caracterización hidrodinámica de los acuíferos, con el propósito de actualizar los balances geohidrológicos y construir un modelo matemático de flujo subterráneo para definir alternativas de aprovechamiento del recurso en las zonas de mayores problemas de abatimiento.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO MATEMÁTICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE IRAPUATO-VALLE DE SANTIAGO, GUANAJUATO. Realizado en 1997 por Geofísica de Exploraciones GUYSA. S. A. de C.V. para la Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG). Es un trabajo de actualización hidrogeológica que tuvo como objetivos principales estimar el espesor y la disposición en el subsuelo de las unidades acuíferas, identificar las estructuras hidrogeológicas, realizar el censo de aprovechamientos e hidrometría de las extracciones, plantear el balance de aguas subterráneas y definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico; todo ello para construir un modelo matemático del flujo subterráneo mediante el cual se propongan políticas de operación y administración del recurso hídrico subterráneo.

PIEZOMETRÍA E HIDROMETRÍA DE LAS EXTRACCIONES DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE 2015. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). Presenta piezometría histórica y actualizada del acuífero y la estimación de los volúmenes de extracción. La información piezométrica de este trabajo fue la base para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, que sirvieron para actualizar el balance de aguas subterráneas.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas de Raisz (1964), la mayor parte de la superficie del acuífero se localiza en la provincia fisiográfica “Eje Neovolcánico” y la porción nororiental en la provincia fisiográfica “Mesa Central”.

Según la clasificación del Instituto de Geografía Estadística e Informática (INEGI), 1997, el acuífero se ubica en estas dos provincias fisiográficas, en las subprovincias “Bajío Guanajuatense” y “Sierras y Bajíos Michoacanos”, pertenecientes a la provincia fisiográfica “Eje Neovolcánico”, y la subprovincia “Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato”, que pertenece a la provincia fisiográfica “Mesa Central”.

El “Eje Neovolcánico” es una provincia cenozoica de origen volcánico formada en un ambiente tectónico de arco continental (Ortega-Gutiérrez et al., 1992), que se caracteriza por una secuencia de rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica producto de coladas de lava, conos cineríticos, domos de lava, maars, volcanes escudo, volcanes compuestos y calderas, que se emplazaron en episodios sucesivos entre el Mioceno y Cuaternario. Está orientado en dirección este-oeste atravesando la porción central de la República Mexicana. Uno de los rasgos más característicos es la presencia de una franja de estratovolcanes que se extienden casi en línea recta alrededor del paralelo 19°. Además de estos estratovolcanes y volcanes tipo escudo, esta provincia también incluye sierras volcánicas, grandes coladas de lava, depósitos de ceniza, así como estructuras de calderas volcánicas. De oeste a este los volcanes más importantes son el volcán de Colima, Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Pico de Orizaba, Cofre de Perote y La Malinche.

La subprovincia “Bajío Guanajuatense” se caracteriza por predominar en ella derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugieren que representan fosas tectónicas, por lo que también se le conoce con el nombre de Zona de Fosas Tectónicas; presenta llanuras de aluviones profundos y lomeríos asociados a mesetas. 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 ella se encuentran lagos formados en depresiones tectónicas (grabens), causadas por fallas, así como por el vulcanismo de la región que propició el cierre de cuencas hidrográficas y la acumulación de aguas superficiales que dieron origen a numerosos lagos.

Los más sobresalientes corresponden a Chapala, Cuitzeo y Yuriria. También existe en ella un gran número de depresiones con orientación perpendicular al Eje Neovolcánico, es decir norte-sur. 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.

La provincia fisiográfica “Mesa Central” se caracteriza por presentar terrenos predominantemente planos, entre los que destacan los extensos valles ubicados al oriente de San Luis de La Paz y entre San José Iturbide y Doctor Mora. Sus principales elevaciones están conformadas esencialmente por rocas volcánicas de tipo riolítico, que conforman serranías altas, en forma de mesetas, con elevación media de 2,000 msnm la subprovincia “Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato”, conocida también informalmente como “Altos de Guanajuato”, las llanuras y las mesetas de erosión se ubican en su porción central, representan alrededor de un tercio de su área guanajuatense, y se encuentran casi totalmente rodeadas por las sierras, mesetas lávicas y lomeríos asociados; en ella predominan las laderas de concavidad vertical; las sierras individuales presentan drenaje y cañadas radiales y distintos grados de disección, y las sierras más grandes incluyen un núcleo central escarpado, a veces alargado, y rodeado de laderas cóncavas tendidas. En ella destaca la Sierra de Guanajuato, con su cumbre más alta que es La Giganta que tiene una altitud de 2,960 msnm; excepto esta prominencia, las altitudes máximas de la sierra varían de 2,380 a 2,870 msnm.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, se identifican varios climas que varían del semicálido-subhúmedo hasta el semiseco-semicálido.

El clima más común es el semicálido subhúmedo con lluvias en verano, (A)C(w0)(w)), que cubre la mayor parte de la superficie del acuífero, es el tipo menos húmedo. Presenta una temperatura media anual mayor de 18°C. El clima C(w0)(w) corresponde a clima templado, subhúmedo de tipo menos húmedo, con una temperatura media anual entre 12° y 18°C. En ambos casos, el régimen de lluvias es en verano con valores máximos que se registran en el periodo mayo-octubre; mientras que la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm, con porcentaje de lluvia invernal menor de 5%.

El clima BS1hw(w) es de tipo semiseco-semicálido, con régimen de lluvias en verano, precipitación media anual que varía de 500 a 700 mm, y porcentaje de lluvias invernales menor de 5%. La temperatura media anual oscila entre los 18.0° y los 21.0°C, el mes más frío es enero, con temperaturas medias entre 13.0° y 16.0°C.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 16 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero:

Santa Julia, Salamanca, Pueblo Nuevo, Pericos, La Joyita. El Conejo, Irapuato, Los Razos, Cortázar, Salvatierra, Tarimoro, Valle de Santiago, Yuriria, Pénjamo, Silao y Romita.

Con estos datos y utilizando el método de isoyetas e isotermas, se determinaron valores promedio anuales de temperatura, precipitación de **18.9 °C y 705 mm**, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio anual es de 1,910 mm.

El régimen de lluvias cubre el período de junio a septiembre, con máximos para julio y agosto que alcanzan entre 180 y 110 mm mensuales. La época de estiaje ocurre entre los meses de octubre y mayo.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 12 “Lerma-Santiago”, Subregión Hidrológica “Alto Lerma”, en la cuenca Río Lerma-Salamanca, subcuenca Guanajuato-Silao. La cuenca del Río Lerma-Salamanca drena una superficie correspondiente a la zona centro y sur del estado de Guanajuato. Tiene su origen en la Presa Solís en donde recibe las aguas de la subcuencas Presa Solís-Salamanca y forma la conocida bifurcación del Lerma; comprende además los afluentes del centro de la entidad, Salamanca-Río Angulo, arroyo Temazcatío y Río Guanajuato-Silao.

La hidrografía está representada principalmente por el río Lerma, que se conduce en la parte central y sureste de la zona, se bifurca cerca del poblado El Sabino, pasando por en medio de dos aparatos volcánicos y volviéndose a unir cerca de Cerritos de Camargo, para después pasar por la porción sur de la ciudad de Salamanca, dirigiéndose así al suroeste por el poblado Pueblo Nuevo, para salir del área en la misma dirección.

Los afluentes principales del río Lerma son los ríos Guanajuato y Silao, que atraviesan el área de estudio en dirección norte sur, rodeando a la ciudad de Irapuato, en donde aguas abajo se unen para formar el río Guanajuato, el cual a su vez confluye al río Lerma a la altura del poblado Pueblo Nuevo. El río Guanajuato nace aproximadamente a 10 km de la ciudad de Guanajuato y desemboca en el Río Lerma, sus aguas son retenidas y reguladas por la Presa “La Purísima”.

El Río Silao nace en la porción norte del acuífero, pasa por las inmediaciones de la ciudad que lleva el mismo nombre antes de interceptar con el Río Guanajuato, al noroeste de Irapuato. Sus aguas son reguladas por la Presa “El Conejo”.

Además de la infraestructura existente en los módulos del Distrito de Riego 11, en la zona se localizan algunas obras, principalmente para control de avenidas, como la Presa El Conejo II, cuya función primordial es proteger contra las inundaciones a la ciudad de Irapuato.

3.4. Geomorfología

El paisaje está dominado por sierras altas, bajas y lomeríos, así como cerros aislados separados por valles y zonas llanas o con muy suave relieve. Los rasgos morfológicos de la zona de estudio están relacionados con estructuras volcánicas; los más abundantes son los cerros de forma cómica que están asociados a conos volcánicos que representan antiguos volcanes. El cerro Culiacán es el elemento característico de la zona volcánica; tiene una elevación de 2,850 msnm y una altura de 1,100 m sobre el nivel del valle. En los valles la geomorfología presenta un estado de madurez; el río Lerma presenta un curso divagante y se bifurca al oriente de Jaral del Progreso; la corriente es de régimen uniforme con avenidas en el centro del área de estudio, desde Salvatierra a Salamanca se observan amplios valles agrícolas. Las sierras que rodean los valles están constituidas por rocas basálticas y andesíticas del Cuaternario, con efectos ligeros de intemperismo y erosión, y con profundas y angostas cañadas que son características de una etapa geomorfológica de juventud. En toda la región de El Bajío se observan contrastes como el descrito, los valles son planos como resultado del relleno de zonas lacustres, presentan un estado geomorfológico de madurez. Los valles están rodeados por afloramientos de rocas sedimentarias y volcánicas de edad terciaria media e inferior que han permanecido expuestas al intemperismo y a la erosión ocasionando también rasgos de madurez como formas redondeadas; los cauces de los ríos y arroyos han adquirido una forma de U.

Desde el punto de vista de las unidades hidrogeomorfológicas, se pueden distinguir varios tipos: Las coladas y mesas de lava presentan una elevación que varía de 2,150 a 1,750 msnm, pendientes de 10 a 50°, en las que la disección está mal desarrollada, con suelo pedregoso de cantos rodados, producto de material clástico de origen volcánico, con drenaje radial exorreico y en las depresiones es radial endorreico. Funcionan como zonas de recarga.

Laderas volcánicas con disección débil a fuerte, que presenta elevaciones de 1,750 a 2,550 msnm, pendientes de 15 a 60°, drenaje radial, dendrítico y paralelo, que funcionan como zona de recarga y de escurrimiento hacia el aluvión. Presentan suelo pedregoso por desintegración de rocas volcánicas y suelos en los que se desarrolla la agricultura de temporal.

Superficie volcánica con fuerte disección, presenta elevaciones de 1,750 a 2,150 msnm, escaso espesor de suelo, vegetación de matorral y agricultura de temporal, presenta drenaje dendrítico-paralelo. Son áreas de gran escurrimiento en las que la captación de agua hacia el acuífero está limitada por pendientes prominentes.

Valles erosivos profundos, presentan elevaciones de 1,750 a 2,250 msnm, con discontinuidades estructurales causadas por fallas y fracturas que funcionan como conductos preferenciales para la recarga; ausencia de suelo y sin vegetación. Su drenaje es dendrítico.

Planicies y terrazas fluviales y lacustres, presentan una elevación promedio de 1,750 msnm, pendiente de más o menos 5°, con vegetación de agricultura de riego, temporal, matorrales y pastos inducidos,

Sin desarrollo de disección, constituye la planicie del escurrimiento de Río Lerma, en la que la infiltración depende en gran medida de la agricultura de riego.

Superficie de piedemonte con débil disección, presenta también una elevación promedio de 1,750 msnm, pendiente aproximada de 17°, poco desarrollo de drenaje, funcionan como buenas zonas de recarga en las que la infiltración es favorecida por la retención del agua.

4. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, el acuífero Irapuato-Valle se encuentra circunscrito en el límite entre dos provincias fisiográficas que presentan episodios volcánicos característicos. Por un lado, la Mesa Central dentro de la que se encuentra la Sierra de Guanajuato, se presenta un elemento estructural muy importante ya que en ella afloran las rocas más antiguas del estado de Guanajuato; y, por otra parte, el Eje Neovolcánico, constituido esencialmente por rocas de composición básica e intermedia, cuya frontera septentrional se encuentra precisamente dentro del sistema-acuífero (Figura 2).

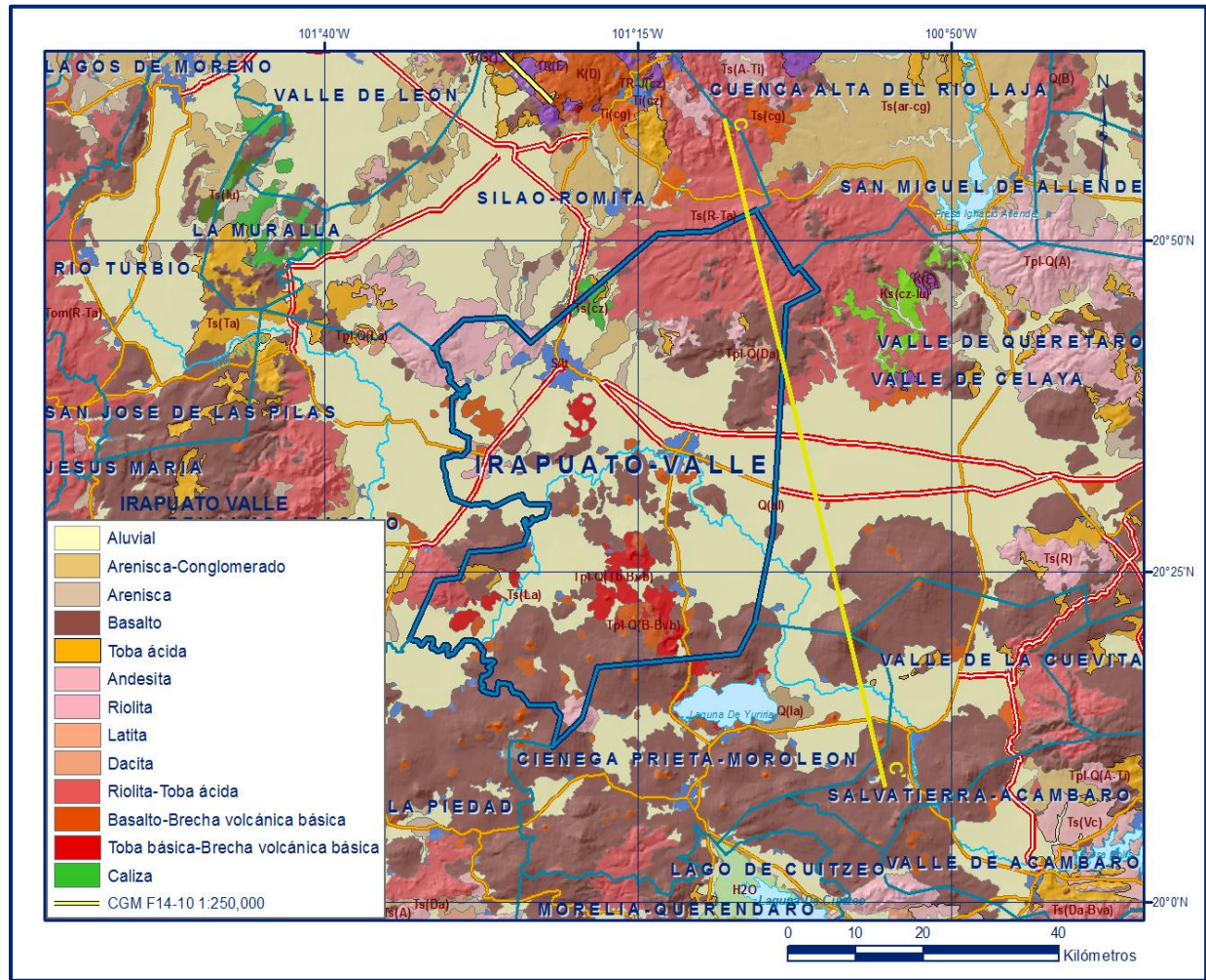


Figura 2. Geología general del acuífero

Dicha frontera se manifiesta por un cambio abrupto en el tipo de rocas volcánicas y por la presencia de estructuras regionales que contienen grandes espesores de rocas volcánicas. Esto se refleja, como en la mayor parte del estado de Guanajuato, en el afloramiento de secuencias de rocas ácidas representadas por ignimbritas que se correlacionan con el segundo episodio efusivo de la Sierra Madre Occidental.

En la región en que se ubica el acuífero afloran rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas, cuyo registro estratigráfico comprende del Jurásico al Reciente.

Las rocas más antiguas corresponden a rocas alóctonas de arco magmático (Arco Guanajuato; Ortiz, 1988; Monod et al., 1990), las cuales están superpuestas tectónicamente y consisten de rocas ultramáficas.

Del Jurásico es la secuencia metamorfozada de lutitas, areniscas y calizas, con andesitas y basaltos, que presentan metamorfismo de facie de esquistos verdes; conocida como Complejo Vulcanosedimentarios de Guanajuato (Martínez, 1993). Se les atribuye una edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

Durante el Aptiano-Albiano se desarrolla el arco volcánico de Guanajuato constituido por tres unidades: la Unidad Vulcanosedimentaria, denominada informalmente como Formación Esperanza (Echegoyén et al., 1970), consiste de lutitas, lutitas carbonosas, limolitas, areniscas, pedernal negro y calizas con intercalaciones de andesitas de estructura almohadillada, que en conjunto presentan cierto grado de metamorfismo de facies de esquistos verdes.

No se ha encontrado fauna y no existen estudios que le asignen una edad precisa; por relación estratigráfica, se le asignó una edad Aptiano-Albiano. La Unidad Basáltica La Luz es una sucesión de derrames de lava con estructura masiva y almohadillada de 1,000 m de espesor, distribuida regionalmente a lo largo de la Sierra León-Guanajuato, sus mejores afloramientos en el área se presentan en la zona de La Luz y cabalga a la secuencia vulcanosedimentaria. Le sobreyace discordantemente un conglomerado polimíctico conocido informalmente como conglomerado Rojo de Guanajuato, constituido por fragmentos angulosos y subangulosos de lutita, caliza, granito, cuarzo y tobas, cuya edad es Eoceno y está ampliamente distribuido en el distrito minero de Guanajuato.

Discordantemente sobre esta unidad yace tobas arenosas y riolíticas pertenecientes informalmente a la Formación Loseros de edad Oligoceno. Sobreyaciendo concordantemente afloran tobas y derrames riolíticos del Oligoceno, conocidas como Toba Bufo. Discordantemente se depositaron tobas y brechas de composición andesítica que forman parte del conglomerado Calderones. Discordantemente afloran andesitas y brechas dacíticas del Oligoceno, de la Formación Cedros. Sobreyaciendo discordantemente, afloran derrames y tobas de composición riolítica (Riolita Chichíndaro o Cuatralba), dentro de la cual se observan domos endógenos de la misma composición.

En discordancia se depositó una unidad conglomerática que Pasquaré et al. describe como Conglomerado Xoconostle, constituido por estratos de conglomerados polimícticos y areniscas, interestratificadas con tobas y brechas andesíticas de edad Mioceno Temprano.

Al paquete anterior le sobreyace una toba soldada y horizontes de toba poco consolidada de composición riolítica, que en algunas localidades se encuentran intercaladas con caliza lacustre. En la cima de la secuencia afloran derrames de riolita del Mioceno temprano. Discordantemente sobreyacen andesitas y basaltos.

Se denomina Gravas El Capulín a un paquete constituido por gravas y arenas no consolidadas, con estratificación poco desarrollada y en muchos casos sin estratificación; para Martínez (1987), quien las describe por primera vez, se trata de rocas sedimentarias poco consolidadas, de edad pleistocénica, aunque Nieto et al., (1999), con base en la edad de las rocas volcánicas y el contenido fósil de vertebrados miocénicos encontrados en San Miguel de Allende, les asigna una edad, en su base, que puede alcanzar el Oligoceno. Su espesor máximo se estima en 100 m.

Labarthé y Aguillón (1985), asignaron informalmente el nombre de Sedimentos Clásticos de Canitas, a una secuencia continental constituida por gravas, arenas, limos y arcillas, cubiertos por una delgada capa de conglomerados polimícticos más clasificados y poco cementados.

Por último, afloran depósitos no consolidados producto de la desintegración de rocas preexistentes, como cantos subredondeados a redondeados, gravas, arenas, limos y arcillas, acompañados en parte por caliche; que generalmente se encuentran en las márgenes de los arroyos. Su espesor en algunas regiones es de 8 m (Cartas Geológicas-Mineras Nuevo Valle de Moreno F14-C42 y F14-C53 Aldama. Escala 1:50,000. SGM, 1999 y 2002, respectivamente).

4.1. Estratigrafía

La zona en la que se ubica el acuífero se encuentra alojada en un amplio valle en el cual las unidades litológicas que afloran son principalmente productos volcánicos del Cenozoico y Cuaternario; Sin embargo, en el subsuelo se considera que se encuentran otras secuencias de materiales diversos que tienen edades que varían desde el Mesozoico hasta el Reciente.

MESOZOICO

Esta era está representada por secuencias metamórficas, complejos intrusivos, depósitos vulcanosedimentarios marinos y secuencias sedimentarias marinas afectadas por plegamientos, que en algunas porciones del territorio del estado fueron levantadas por los procesos tectónicos del Cenozoico.

TRIÁSICO-JURÁSICO

Secuencia vulcanosedimentaria

Está representada por la Formación La Esperanza estudiada por Edwards (1957) y (Echegoyen 1970); constituida en la base por pizarras carbonosas, y en la cima por pizarras intercaladas por lavas almohadilladas producto de flujos andesíticos. La secuencia está foliada por pliegues ligeramente recumbentes y se presenta expuesta por la presencia de sistemas de pilares y fosas tectónicas. Los afloramientos más cercanos a la zona de estudio se encuentran a 3 km de la Ciudad de Guanajuato, en las inmediaciones de la Presa La Esperanza, se estima su espesor puede ser mayor a 1,000 m. Su edad ha sido discutida por varios autores; por su correlación con la Formación Zacatecas, se le asigna perteneciente al Triásico-Jurásico.

Piroxenita San Juan de Otates

Definida por Serváís *et al.* (1982) para referirse al complejo ultramáfico que aflora en la Sierra de Guanajuato, a lo largo del Arroyo San Juan de Otates, ubicado al noreste de León. Estos afloramientos fueron los primeros en interpretar el origen de estas rocas, como parte de un complejo ofiolítico. La unidad consiste de rocas masivas cristalinas de color verde oscuro en roca sana y verde claro en roca alterada (serpentinizada). La mineralogía esencial está representada por augita y olivino, como minerales secundarios o de alteración antigorita, clorita, talco y minerales opacos; y la actinolita como mineral formado por incipiente metamorfismo regional de facies esquistos verdes (Martínez, 1987).

Este complejo ultramáfico sobreyace tectónicamente a rocas metavolcánicas del Complejo Vulcanosedimentarios Sierra de Guanajuato, como consecuencia de un cabalgamiento de naturaleza ofiolítica y está cubierta en su extremo norte por productos volcánicos cenozoicos. En ocasiones la piroxenita es cortada por diques de diversa composición de la unidad Conjunto Plutónico La Luz.

Martínez (1987), describe la unidad como una secuencia de rocas cristalinas masivas de color verde oscuro en roca sana y verde claro en rocas alteradas (serpentinizada); la mineralogía observada consta de augita y olivino con antigorita, clorita, talco y minerales opacos como minerales de alteración. Presenta actinolita como resultado del incipiente metamorfismo regional de facies de esquistos verdes. La edad tentativa asignada para esta unidad es Jurásico Tardío, aunque otros autores le asignan una edad más antigua.

JURÁSICO SUPERIOR-CRETÁCICO

Secuencia vulcanosedimentaria

Constituida por dos elementos, en la base secuenciaS de lavas almohadilladas, intercaladas con rocas piroclásticas ácidas y básicas, que sobreyacen a la Formación La Esperanza y en la cima secuencias interestratificadas de materiales sedimentarios compuestos por rocas calcáreo-arcillosas con intercalaciones de pedernal.

A la secuencia de lavas se les identifica como Formación La Luz, descrita como lavas almohadilladas y lavas masivas de composición basáltico-andesítica.

La secuencia completa aflora en la carretera que conduce del Cerro El Cubilete al Mineral de La Luz, su espesor aproximado es de 1000 m y su edad se determinó con base en estudios micropaleontológicos relacionando la microfauna observada con registros de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior y por estudios radiométricos de los basaltos, que confirman una edad Cretácica.

CRETÁCICO

Complejo Vulcanosedimentario Sierra de Guanajuato

Se caracteriza por un conjunto de facies sedimentarias y volcánicas de origen marino, que constituyen junto con la unidad de Piroxenitas, el basamento de la Sierra de Guanajuato. Aflora ampliamente a todo lo largo de la sierra, ocupando gran parte de las zonas topográficas más altas. La unidad se divide en dos componentes con notables diferencias litológicas:

Componente sedimentario. Considera las calizas y lutitas dispuestas en estratos delgados, abundantes areniscas de color verde en estratificación gradada con fragmentos líticos de origen pelítico y en menor proporción fragmentos ígneos, de caliza y pedernal, ocasionalmente se observan bancos de conglomerados de color verde con clastos redondeados a bien redondeados de origen diverso (Martínez, op, cit.).

Componente volcánico. Se caracteriza por la presencia de lavas de composición basáltica, andesítica y dacítica, en estructuras masivas o almohadilladas, con niveles de brechas, tobas y detritos de la misma composición, generalmente en tonos verdosos. Mineralógicamente estas rocas presentan plagioclasas, clorita, epidota, calcita, minerales opacos y cuarzo (Martínez, 1987).

La unidad presenta fuertes plegamientos, producto de periodos de deformación compresiva y por intrusión del Granito Comanja.

Corona (1988) asigna, al Complejo Vulcanosedimentario Sierra Guanajuato, una edad Titoniano-Valanginiano. La unidad es correlacionable con la Formación Esperanza y con la Formación La Luz del distrito minero de Guanajuato, considerándose a la primera como la unidad basal (componente sedimentario) y la segunda como la unidad sobreyacente (complejo volcánico).

CENOZOICO

En el Cenozoico la sobreposición de las unidades geológicas está íntimamente relacionada con los procesos orogénicos y el emplazamiento de los dos grandes arcos volcánicos que afectaron al centro del país.

Conglomerado Guanajuato

Unidad originalmente mencionada como Conglomerado Rojo por Villarello-Torres *et al.* (1906), y renombrada formalmente como Conglomerado Guanajuato por Quintero-Legorreta (1992).

Es una secuencia clástica continental de carácter conglomerático del distrito minero de Guanajuato. Se describe como un conglomerado polimíctico, bien consolidado, dispuesto en estratos gruesos, generalmente inclinados, de color característico rojo-café y tonalidades verdosas, producto de alteración hidrotermal.

Está constituido de clastos de diversos tamaños y origen, empacados en una matriz arenosa, cementada por óxidos de hierro y/o carbonatos; ocasionalmente con horizontes de areniscas, limolitas y lutitas. Cubre discordantemente al conjunto basal anterior y su contacto superior está en discordancia angular con la Ignimbrita Cuatralba. Ferrusquía Villafranca (1987) reporta que la parte basal de esta unidad, en el distrito minero de Guanajuato, es de edad Eoceno Medio-Eoceno Tardío, determinada a partir del análisis paleontológico de vertebrados.

Hernández (1991) relaciona como pertenecientes a esta unidad a los afloramientos conglomeráticos localizados en La Sierra de León, que otros autores denominaron informalmente como Conglomerado Duarte.

Esta unidad no aflora en la zona, pero por su amplia distribución en la región es posible que se encuentre a profundidad cubierta por los materiales vulcanosedimentarios más recientes. En general, presenta baja permeabilidad por lo que esta puede ser considerada impermeable.

Andesita Bernalejo

Denominada así por Quintero (1986) al referirse a las andesitas que afloran en la cercanía del poblado Bernalejo; son de color gris oscuro con tonalidades violáceas, muy resistentes a los procesos erosivos, con una textura que varía de microcristalina a porfirítica, donde los fenocristales son principalmente de abundante plagioclasa alterada; excepcionalmente con vesículas, algunas rellenas de calcita.

Otra característica es su gran fracturamiento y alteración. Su espesor no se ha determinado, se considera que está en contacto discordante con las unidades intrusivas al poniente de San Francisco del Rincón, y le sobreyacen unidades ignimbríticas.

Hernández (1991) sugiere una edad tentativa de Oligoceno Temprano, basándose en la posición estratigráfica de la unidad y considerando válidas las edades del Conglomerado Guanajuato y de la Ignimbrita Cuatralba, además de la correlación con la Andesita El Cedro del distrito minero de Guanajuato, de edad absoluta correspondiente al Oligoceno.

Ignimbrita Cuatralba

Unidad compuesta por material volcánico de naturaleza piroclástica que conforma a las numerosas mesetas de la Sierra de Guanajuato (Quintero, op. cit.) y ampliamente distribuida en todo el estado. Hernández (op. cit.). La divide informalmente en dos miembros, el miembro inferior se compone de una toba masiva, de composición félsica, de color que varía de café claro a crema, poco consolidada, con materiales predominantes cenizas, con escasos fragmentos líticos y pómez, sin colapsar.

El miembro superior es una roca ignimbrítica bien consolidada de espesor variable y textura porfirítica, con abundantes fenocristales de cuarzo, sanidino y escasas plagioclasas, inmersos en una matriz muy fina en algunas porciones vítrea; presenta estructuras fluidal y de flamas que son características, así como el desarrollo de diaclasas columnares.

Por su baja resistencia a la erosión, el miembro inferior no siempre se detecta, por lo cual es difícil estimar su espesor total. El miembro superior descansa en discordancia sobre la Andesita Bernalejo (Hernández, 1991), siendo este contacto a través de un vitrófido de aproximadamente tres metros de espesor.

La posición estratigráfica de la Ignimbrita Cuatralba, establece un contacto discordante, sobreyaciendo al Conglomerado Guanajuato y a la Andesita Bernalejo, y subyace en discordancia a los depósitos continentales no diferenciados del Cenozoico, y a los productos volcánicos Plio-cuaternarios, por relación estratigráfica la edad de la unidad se estima que pertenece al Oligoceno y es correlacionable con el Supergrupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental. Cronológicamente se ubica en el Oligoceno.

Conglomerado Xoconostle

El nombre de conglomerado Xoconostle fue adoptado por Pasquaré et al. (1991), para describir a las rocas conglomeráticas producto de la erosión de las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental. No aflora en el área de estudio, pero al norte aflora en los alrededores de la Sierra de Guanajuato; está constituido por clastos gruesos de ignimbritas y en menor proporción de fragmentos andesíticos, además de horizontes de areniscas que alternan con limolitas pobremente cementadas, interestratificadas con capas de conglomerado. No existen evidencias paleontológicas que permitan asignarle una edad, pero su relación con los eventos tectónicos del Plioceno, le asignan una edad correspondiente al Mioceno.

Secuencia Volcánica del Mioceno Tardío

Pasquaré et al (1991), agrupa con este nombre a una serie de rocas volcánicas básicas e intermedias y algunas veces riolíticas, que tienen una distribución regional, localizándose afloramientos desde las inmediaciones de la Ciudad de Querétaro, hasta el estado de Jalisco.

Estos productos volcánicos definen en conjunto un arco volcánico con un rumbo general E-W, y se distinguen como la base del Eje Neovolcánico, (Pasquaré op. cit.). Las principales unidades que se agrupan en esta secuencia son: Basaltos Río Lerma; Basaltos Villa Morelos; Basaltos Querétaro; Andesitas y Basaltos Tarímbaro; Andesita La Ordeña y secuencias de sedimentos lacustres asociados al emplazamiento de cuencas endorreicas.

Una de las secuencias mejor estudiada es la denominada Basaltos Querétaro, por la presencia de amplias mesetas producto de los flujos de lavas; en la región del acuífero, aflora la **Andesita La Ordeña**, que se describe como una secuencia de lavas de composición basáltico- andesíticas, que se presentan en forma masiva, con un espesor local de 200 m aproximadamente.

Otros flujos de lava se asocian a esta secuencia y pueden tener influencia en la zona como son los basaltos Río Lerma y el Basalto Villa Morelos, al SE y S del área de estudio. La edad de todas las secuencias ha sido obtenida por métodos radiométricos y por correlación estratigráfica.

CUATERNARIO

Campo Volcánico Michoacán – Guanajuato

Este campo está conformado aproximadamente por 900 conos cineríticos y 100 volcanes de otros tipos, tales como conos, maars, domos y gruesos derrames de lava no asociados; además, se han reportado 300 volcanes de tamaño medio, algunos de los cuales forman un escudo de aproximadamente 10 km de diámetro, que comprende una superficie de aproximadamente 40,000 km² (Sánchez, op. cit. Ban et al, 1992). Las unidades que se distinguen dentro del campo son las siguientes: Conos Cineríticos Villa Escalante (fuera del área de estudio); Volcanes de Escudo y Pequeños Conos de Lava; Domos Andesíticos Pátzcuaro (fuera del área de estudio); Domos del Pleistoceno (Domos Riolíticos y Dacíticos El Oro); Domos Riolíticos y Dacíticos Puruándiro (fuera del área de estudio) y Volcanes Monogenéticos

Conos Cineríticos Villa Escalante

De acuerdo con Hasenaka y Carmichael (1985), es una unidad constituida por volcanes altamente degradados morfológicamente, que se localiza en la región de Villa Escalante, Michoacán y en la Depresión Salamanca–Querétaro.

Esta unidad se compone de derrames de lavas asociados a los conos cineríticos, donde se reportan abundantes conos con derrames de basalto de olivino, calco-alcalinos y andesitas basálticas. Dataciones radiométricas en las rocas de la Depresión de Salamanca–Querétaro, reportan edades de 2.8 Ma, por lo que los autores mencionados la ubican en el Plioceno Tardío- Sin embargo, Pasquaré et al (op. cit.) asignan un margen más amplio de edad, ubicándola en el Plioceno Tardío–Pleistoceno Temprano.

Volcanes de Escudo y Pequeños Conos de Lava

Esta unidad se encuentra bien representada en el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG), pero su distribución abarca una amplia zona en el Eje Neovolcánico y está constituida principalmente por pequeños volcanes de escudo y por conos de lava (Pasquaré et al, op. cit.).

Presenta una variedad de rocas ígneas extrusivas; en el CVMG predominan los conos andesíticos mientras que en los volcanes de escudo Hasenaka et al. (1994) reportan lavas menos evolucionadas, representadas por lavas andesíticas calco-alcalinas que muestran un rango limitado de SiO_2 , con ocurrencia común de fenocristales de ortopiroxeno.

La edad en esta unidad de acuerdo con las dataciones realizadas, se establece en un rango limitado entre 1.3 y 0.83 Ma, que las ubica en el Pleistoceno Tardío-Holoceno (Pasquaré et al., op. cit.).

Volcanes Monogenéticos

La continuación de la actividad volcánica ubica a esta unidad volcánica como la más joven en el Eje Neovolcánico, representada por efusiones de productos básicos e intermedios en la que se distingue la presencia de siete maars alineados en dirección NNW, cercanos al poblado Valle de Santiago, en la Depresión Salamanca-Querétaro.

La litología está compuesta principalmente de basaltos y andesitas con la formación de montículos de brechas basálticas en los conos cineríticos y algunos flujos de lavas andesítico-basálticas. Los análisis radiométricos le asignan una edad en el intervalo 0.54 a 0.05 millones de años, que la ubican en el Holoceno.

Aluvión

Esta unidad agrupa a todos los depósitos originados a partir de la erosión e intemperismo de las rocas que afloran en las porciones altas de la región. La zona de exposición es muy amplia localizándose en las partes bajas de los valles, en la región Celaya-Salamanca-Irapuato.

Su espesor es muy variable, más delgado en la zona de Salamanca e Irapuato, respecto de la zona de Celaya; su composición y su granulometría abarca desde sedimentos finos como limos y arcillas, hasta las arenas mal clasificadas, desde finas a gruesas, y algunos fragmentos de gravas; también se incluyen los suelos residuales.

4.2. Geología estructural

Las estructuras mayores presentes en la región son la Falla del Bajío y el Graben La Saucedá que son observables en imagen de satélite y en el modelo digital de elevación. La primera define el extremo nororiental de la Fosa del Bajío, dando origen a una planicie de relleno aluvial. Esta estructura tiene un rumbo general NW con inclinación al SW, es interceptada y desplazada al suroeste por el Graben La Saucedá, perdiendo, aparentemente, su continuidad hacia el sur.

El Graben La Saucedá está formado por una serie de fallas normales escalonadas de orientación NE-SW, que morfológicamente se traduce en un valle que interrumpe bruscamente la continuidad fisiográfica de la región con desniveles topográficos que alcanzan los 200 m. Constituye el límite suroccidental de la Sierra de Guanajuato.

Está definido por tres fallas principales: La falla Septentrional, la falla Meridional y la falla La Gloria, ésta última paralela a la falla Meridional y se ubica entre las dos anteriores. La edad del graben se puede considerar del Pleistoceno, debido a que las fallas afectan a unidades de esta edad (Nieto-Samaniego, 1985).

La porción noreste se caracteriza por la presencia de rocas mesozoicas afectadas por una anisotropía propia de las rocas metamórficas de bajo grado. La esquistosidad se desarrolla asociada al plano axial de pliegues isoclinales y cabalgaduras localmente con vergencia al NE.

En esta zona se presentan fallas normales con dirección NW-SE, mineralizadas, del distrito minero de Guanajuato, en general paralelas a la estructura del Bajío, aunque existen también estructuras NE-SW (vetas de la sierra), E-W (Graben El Cubo) y N-S (San Nicolás).

Al sur del Graben La Saucedá se observan fallas normales de orientación NE-SW sensiblemente paralelas al graben, y NW-SE con buzamiento hacia el SW; que pueden ser la continuación del sistema Veta Grande. Un aspecto importante en esta zona es la presencia de componentes laterales en las fallas normales. La evolución tectónica de la región podría estar asociada a un evento trans-distensivo progresivo con varias fases de deformación y movimientos importantes en dirección horizontal, mientras que en particular la evolución de una porción más pequeña, bloque del distrito minero de Guanajuato, tendría un campo de esfuerzo más propicio para la generación de fallas normales.

Es probable que este bloque manifieste un predominio de estructuras perpendiculares al vector de máximo esfuerzo extensional. Esto habría producido estructuras predominantemente de dirección NW-SE, paralelas a la Falla del Bajío.

Todas las estructuras de fallamiento deben considerarse como parte de un gran sistema que tiene variantes, tanto en sus campos de esfuerzo como de respuestas de las rocas involucradas, en tiempo y espacio (Carta Geológico-Minera F14-C53 Aldama. Escala 1:50,000. SGM, 2002).

4.3. Geología del subsuelo

Con base en información geológica superficial, cortes litológicos de pozos y resultados de la interpretación de sondeos geofísicos, se establece que el agua subterránea se presenta en un ambiente hidrogeológico constituido por un sistema distensivo de bloques tectónicos escalonados, con una arquitectura en escalonamiento que conforman pilares (horts) y fosas (grabens) asimétricas, formados en rocas volcánicas y piroclásticas de composición riolítica y en el Conglomerado Xoconostle, rellenas de material terrígeno de origen continental, que presenta granulometría y compactación variables

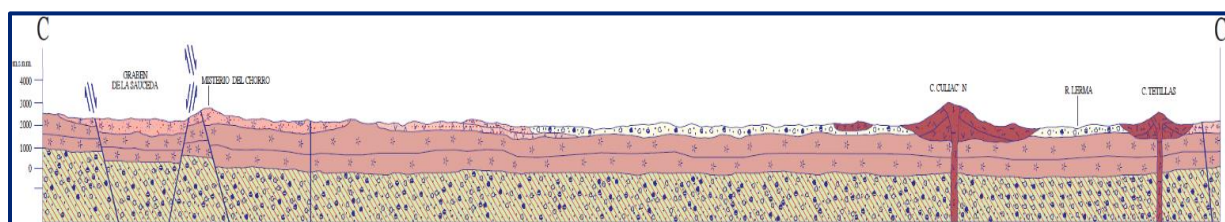
El sistema acuífero está conformado, en su porción superior, por un medio granular constituido por depósitos aluviales, fluviales, lacustres y conglomerados, cuyo espesor promedio es menor a 100 m y está controlado estructuralmente por la presencia de fallas que generan fosas en el subsuelo; y en su porción inferior por un medio fracturado alojado en rocas volcánicas, principalmente de composición riolítica y en menor proporción basáltica, que afloran en las sierras que constituyen el límite del acuífero. El paquete en su conjunto está afectado por tectonismo, generando un sistema de fosas y pilares tectónicos. La mayor estructura de este tipo es la gran depresión tectónica de Salamanca que está rellena por sedimentos fluviales de granulometría y compacidad variable y rocas volcánicas basálticas fracturadas del plio-cuaternario.

Las fronteras son convencionales y están definidas por los parteaguas de las elevaciones topográficas que delimitan el acuífero. Los grandes pilares tectónicos son los rasgos orográficos de mayor elevación que rodean el Valle de Irapuato-Salamanca, como es la prolongación suroriental de la Sierra de Guanajuato que divide a los valles de Irapuato-Salamanca y Río Laja, donde el bloque tectónico está expuesto en superficie con la presencia de la Ignimbrita Cuatralba.

La Sierra de Las Luminarias que divide esta zona del Valle del Lago de Yuriria, también es interpretado como un pilar tectónico el cual está coronado por aparatos volcánicos de rocas basálticas plio-cuaternarias.

En la porción norponiente del valle se ha detectado otro levantamiento tectónico casi expuesto en superficie, que separa al valle del Valle Silao-Romita y en donde afloran localmente los depósitos lacustres del Plioceno Superior.

El basamento está representado por las rocas riolíticas, a profundidades mayores de 500 m, cuando desaparece el fracturamiento, así como las rocas de baja permeabilidad del Conglomerado Guanajuato y las del Complejo Vulcanosedimentario Sierra de Guanajuato, cuya presencia no ha sido detectada en los pozos perforados; sin embargo, se infiere su existencia en el subsuelo del valle a profundidades mayores a los 1,000 m por medio de sondeos geofísicos electromagnéticos. La disposición de las unidades de interés hidrogeológico en el subsuelo, así como las estructuras que las afectan, ocasionaron su desplazamiento debido a la presencia de la prolongación de la Falla del Bajío. En la sección geológica esquemática mostrada en la figura 3, se puede observar las unidades que conforman el subsuelo y las sierras de la región.



Fuente: Carta Geológico-Minera F14-10 "Querétaro". Escala 1:250,000 (SGM, 1999)

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten establecer que el sistema acuífero es de tipo **libre-semiconfinado**, heterogéneo y anisótropo con doble porosidad en el que el movimiento del agua subterránea ocurre en una gran estructura geológica regional originada por la tectónica distensiva plio-cuaternaria del Eje Neovolcánico que causó un sistema de fosas y pilares tectónicos dispuestos en escalonamiento hacia el centro del valle, que están edificadas en las rocas del Conglomerado Xoconostle, rocas volcánicas fracturadas de la Andesita La Ordeña y las rocas riolíticas de las unidades Riolita Chichíndaro e Ignimbrita Cuatralba

El sistema acuífero está conformado, en su porción superior, por un medio granular constituido por depósitos aluviales, fluviales, lacustres y conglomerados, cuyo espesor promedio es menor a 100 m, que se encuentran intercalados e interdigitados con derrames basálticos, y está controlado estructuralmente por la presencia de fallas que generan fosas en el subsuelo; y en su porción inferior por un medio fracturado alojado en rocas volcánicas, principalmente de composición riolítica y en menor proporción basáltica, que afloran en las sierras que constituyen el límite del acuífero

Localmente, la presencia de sedimentos arcillosos y calizas de origen lacustre, puede ocasionar condiciones de semiconfinamiento.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para el análisis de los parámetros hidráulicos se utilizó la información procedente de pruebas de bombeo de larga duración realizadas en estudios previos, concentradas en CEAG (1997) tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad en el rango comprendido entre **1.0×10^{-4} y $3.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (8.6 y 337.0 m^2/d)**.

Adicionalmente, para la obtención de la conductividad hidráulica se utilizó el modelo numérico de Rathod y Rushton (1991); los valores obtenidos dependen de la unidad hidrogeológica de que se trate.

En general, varían de **0.01 a 15.0 m/d (1.15×10^{-7} a $1.7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)** para los sedimentos aluviales y fluviales y de **0.5 a 15.0 m/d (5.8×10^{-6} a $1.7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)**, para las rocas riolíticas fracturadas.

Ninguna de las pruebas contó con pozos de observación; sin embargo, con el modelo numérico de Rathod y Rushton se obtuvieron valores de 0.05 a 0.15 para el rendimiento específico y de 0.00002 a 0.0005 para el coeficiente de almacenamiento.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información histórica para diferentes años ya que la Dirección Local de la CONAGUA y la CEAG realizan mediciones piezométricas semestrales.

Debido a que para los últimos años se cuenta con mayor apoyo piezométrico, con el objetivo de evaluar una condición actual del acuífero, apoyada en la mejor distribución espacial de la información, se elaboraron las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático para el año 2013 y para la evolución el periodo 2006-2013.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para el 2013 presentó valores que varían de 20 a 140 m, que de manera general se incrementan conforme se asciende topográficamente de los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan, y solo en las zonas urbanas de Irapuato y Salamanca se modifica esta tendencia por la concentración de la extracción para uso público-urbano e industrial. Los valores más profundos, de 100 a 140 m, se registran en la porción norte y noroccidental del acuífero, hacia las estribaciones de las sierras y los lomeríos que lo separan de los acuíferos Cuenca Alta Río Laja y Silao-Romita, respectivamente.

Los niveles menos profundos, con valores de 20 a 30 m, se presentan esparcidos en diferentes zonas de las porciones oriental (E y SE de Salamanca, E de Valle de Santiago) y suroccidental del acuífero, entre los poblados San José de Ayala y Guarapo, debido a la presencia de lomeríos que separan áreas dentro del valle principal (figura 4).

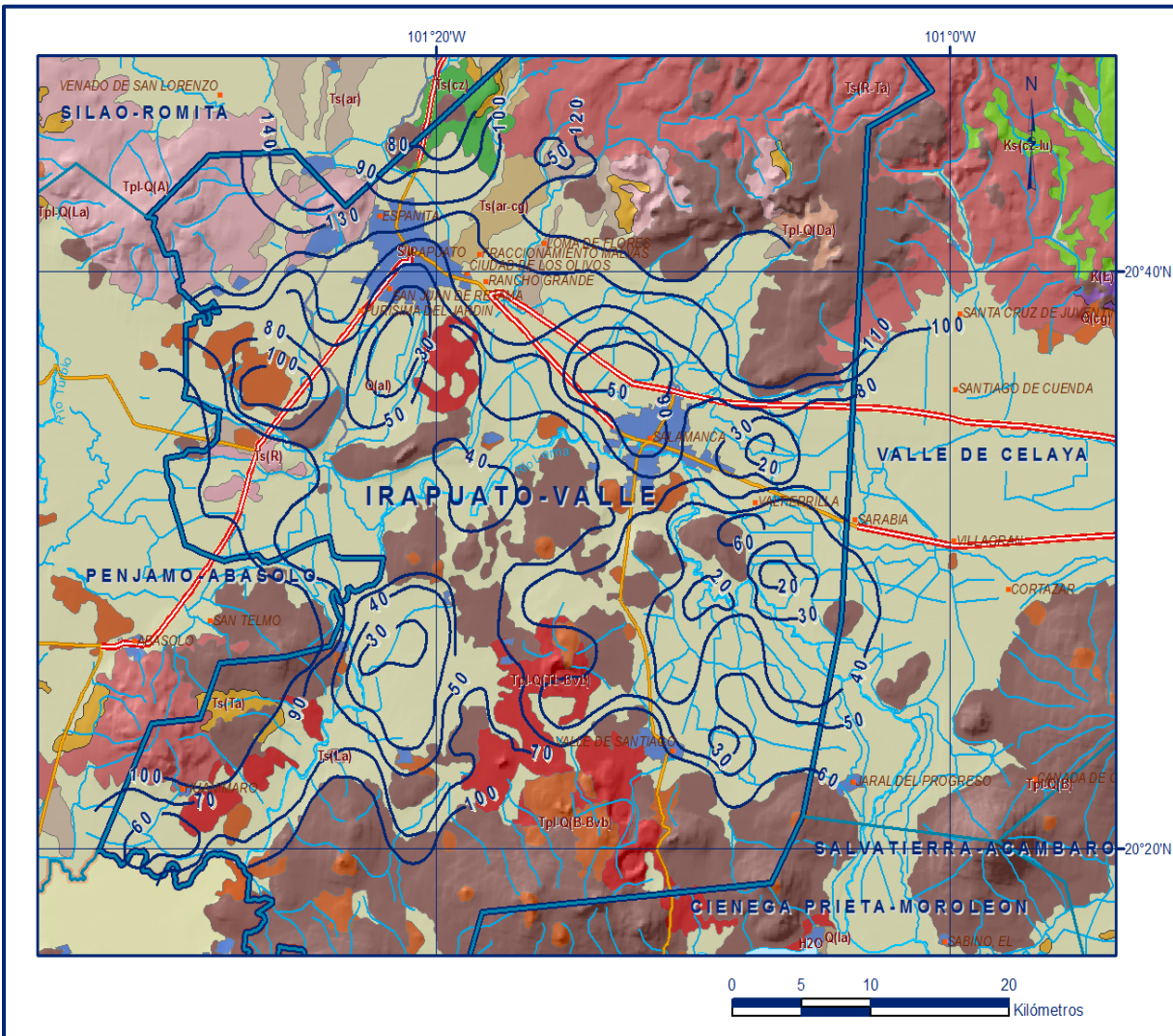


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

En el año 2013 la configuración de elevación del nivel estático presentó valores que variaron de 1,720 a 1,605 msnm, los cuales crecen, al igual que los de profundidad, hacia las elevaciones topográficas que delimitan los valles, que se han formado por la existencia de lomeríos que los separan, en los que la dirección preferencial del flujo subterráneo es concéntrica hacia la porción central de ellos.

Los valores más altos, de 1,690 a 1,720 msnm, se registran en la porción norte del acuífero, hacia las estribaciones de la sierra que divide este acuífero de Cuenca Alta Río Laja; y los más bajos, de 1,605 a 1,625, en los conos de abatimientos que se han formado en la zona agrícola ubicada al oeste de Irapuato, entre ésta ciudad y Salamanca y en porción suroccidental del acuífero, entre Huanímaro y Cerro Colorado.

En la porción oriental se presentan entradas por flujo subterráneo procedentes del acuífero Valle de Celaya, inducidas por el cono de abatimiento generado en la zona agrícola ubicada al este de Salamanca.

En el extremo occidental se registran salidas subterráneas hacia el acuífero Pénjamo-Abasolo, inducidas también por la concentración de la extracción para uso agrícola que se lleva a cabo al este de Pénjamo (figura 5).

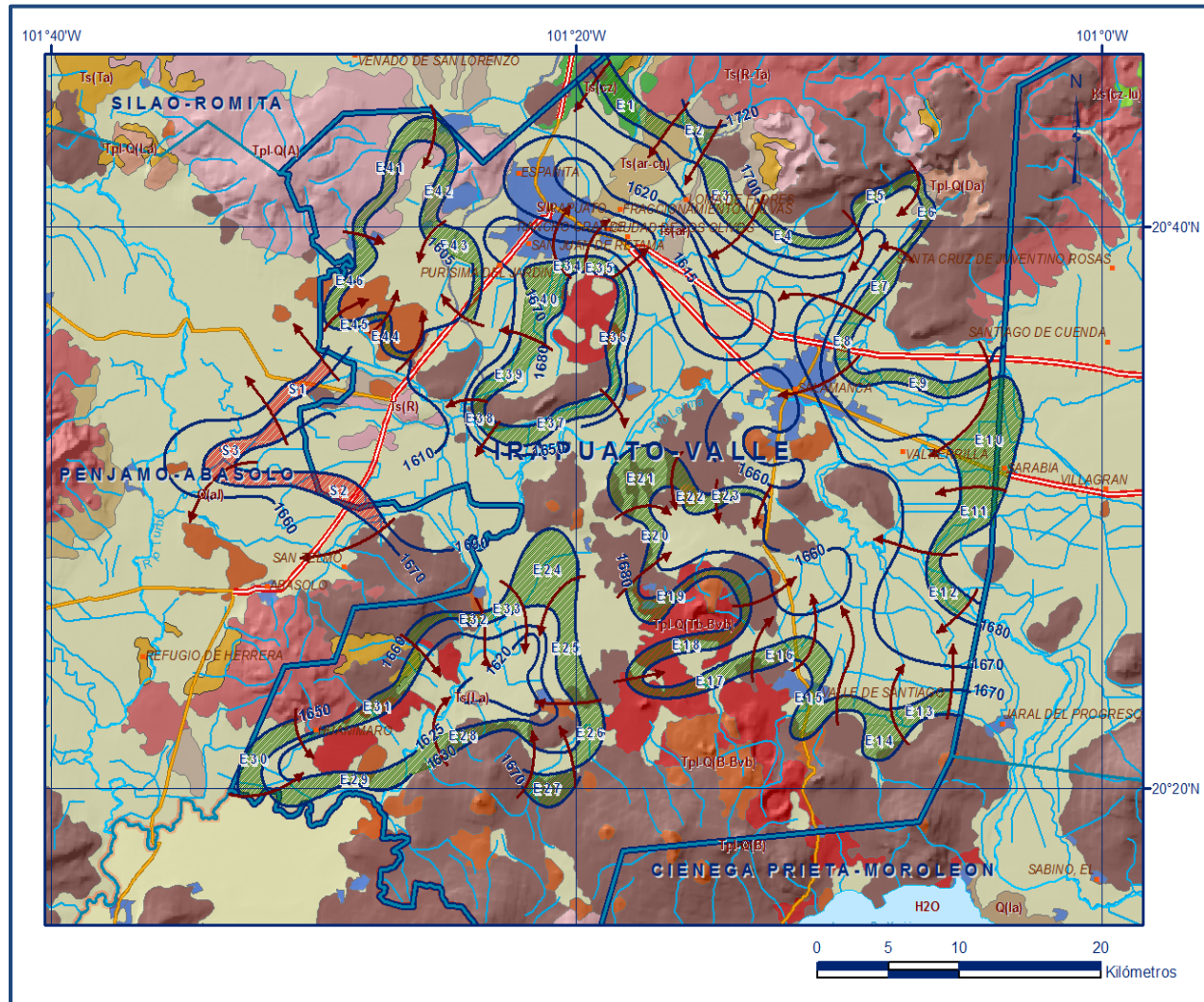


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

De acuerdo con la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2006-2013, se registran abatimientos en todas las áreas de explotación, que varían de 5 a 15.0 m, con valores puntuales de hasta 20 m, y un ritmo promedio anual de 1.0 a 1.5 m.

Los mayores abatimientos, de 15 a 20 m, se registran en las zonas agrícolas ubicadas al oeste de Irapuato, sureste de Salamanca, noreste de Valle de Santiago y en la porción suroccidental del acuífero, entre Huanímaro y Cerro Colorado; desde donde disminuyen gradualmente hasta desaparecer hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas que delimitan el acuífero y los valles que se han formado en él (figura 6).

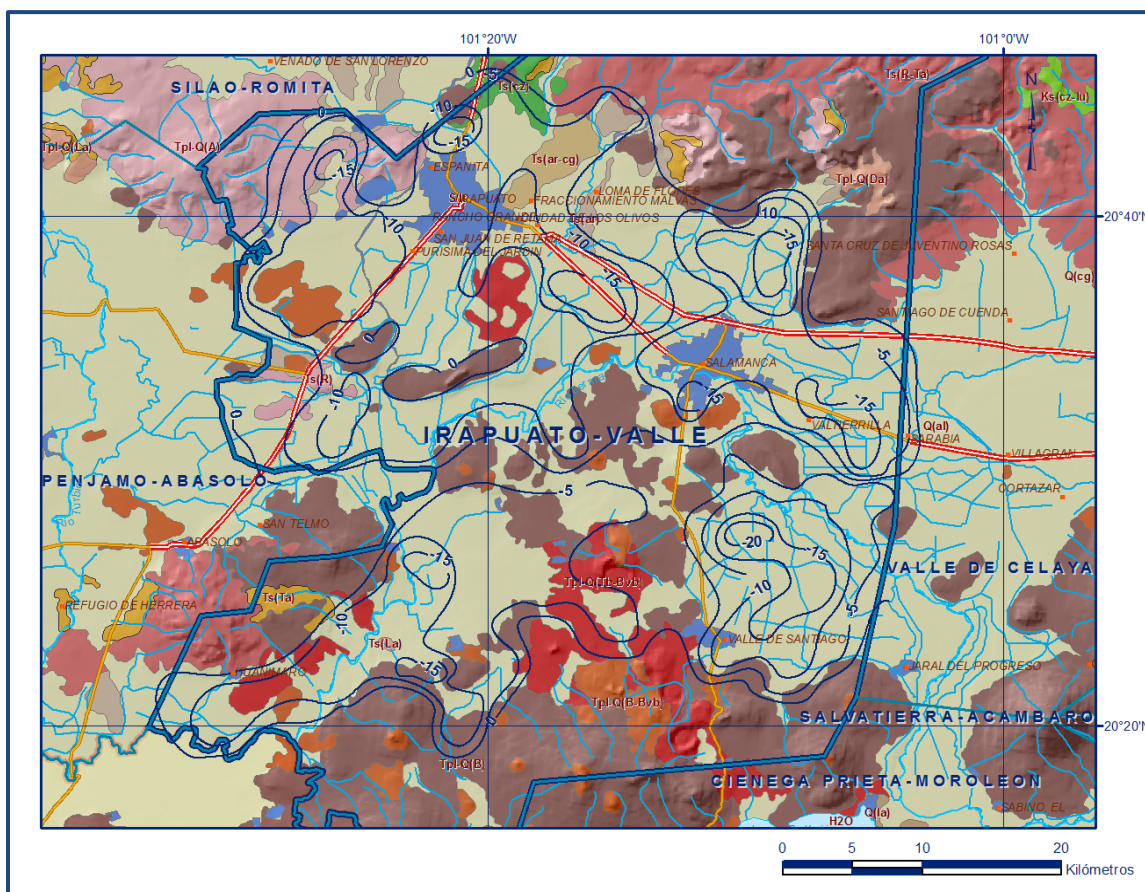


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2006-2013)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

No existe información hidrogeoquímica actual, la más reciente corresponde al estudio realizado en 1997 (CEAG) en el cual como parte de los trabajos de campo se tomaron 15 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona del acuífero para su análisis fisicoquímico. Las determinaciones incluyeron: temperatura, potencial de Hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, y sólidos totales disueltos (mg/l), así como cromo, arsénico, sílice, fierro, manganeso, nitritos y nitratos para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 306 a 904 ppm, los cuales no sobrepasan el límite máximo permisible de 1,000 ppm establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Los valores de conductividad eléctrica variaron de 490 a 1,450 $\mu\text{S}/\text{cm.}$, que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con American Public and Health Association (APHA), 1995. Los valores de pH varían de 6.9 a 8.5 y de temperatura entre 26.2 y 37.8 °C.

Las concentraciones de cromo hexavalente fueron menores de 0.01 mg/l valor por debajo del límite máximo permisible que establece la Norma Oficial Mexicana. Los nitritos y nitratos presentan valores por arriba de la norma lo que indica agua contaminada, posiblemente con materia orgánica.

Los valores reportados de sílice varían entre 55 y 101 mg/l. Se encontró arsénico en concentraciones que varían de menos 0.005 a 0.040 mg/l. Los sulfatos se encontraron en concentraciones que varían de 12 a 200 mg/l, menor de lo que marca la Norma Oficial Mexicana. La concentración de fierro y el manganeso no rebasaba la norma establecida. De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que predomina la familia bicarbonatada-sódica que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha estado en contacto con rocas volcánicas que contienen plagioclasas sódicas.

Se clasificó el agua para su uso en riego utilizando la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS); la mayor parte de las muestras analizadas se clasifican como C_2-S_1 , que corresponde a salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable, y C_3-S_1 , que representa agua de alta salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable; ambas clasificaciones se consideran aptas para el uso agrícola, en cultivos tolerantes a la salinidad y en suelos de buen drenaje.

El agua de los pozos más profundos se clasifica como C₁-S₁, que corresponde a baja salinidad y bajo contenido de sodio intercambiable que es apta para la agricultura sin ninguna restricción.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2009 (CEAG, 2016) se identificaron un total de 2,319 captaciones del agua subterránea: 2,314 pozos, 4 norias y 1 manantial; de los cuales 2,221 se consideran activos y 93 inactivos de manera temporal. Del total de obras, 1,766 son para uso agrícola, 422 para abastecimiento de agua potable, 124 para uso industrial y 2 para otros usos.

El volumen total de extracción estimado de **672.4 hm³/año**, de los cuales, 495.0 hm³/año (73.6%) es utilizado para las actividades agrícolas, 99.5 hm³/año (14.8%) es para uso público-urbano, 77.8 hm³/año (11.6%) para uso industrial y 0.1 hm³/año (0.0%) para otros usos. A través del único **manantial** censado se descarga un caudal de 9 lps, equivalentes a **0.3 hm³ anuales**, que se utilizan para uso agropecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

El balance de aguas subterráneas se planteó para año el periodo 2006-2013, que es el que presenta mayor cantidad de información, con la mejor distribución espacial; en una superficie aproximada de **1,404 km²** de la zona en la que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos y en la que se cuenta con información piezométrica. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de masa}$$

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 (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, la que se produce a lo largo de los canales de riego; del agua residual de las descargas urbanas, así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (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.

$$Rv + Ri + Eh - B - Sh - Dm = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Ri= Recarga incidental;

Eh= Entradas por flujo subterráneo horizontal;

B= Bombeo;

Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal;

Dm= Descarga a través de manantiales

$\Delta V(S)$ =Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio 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 pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

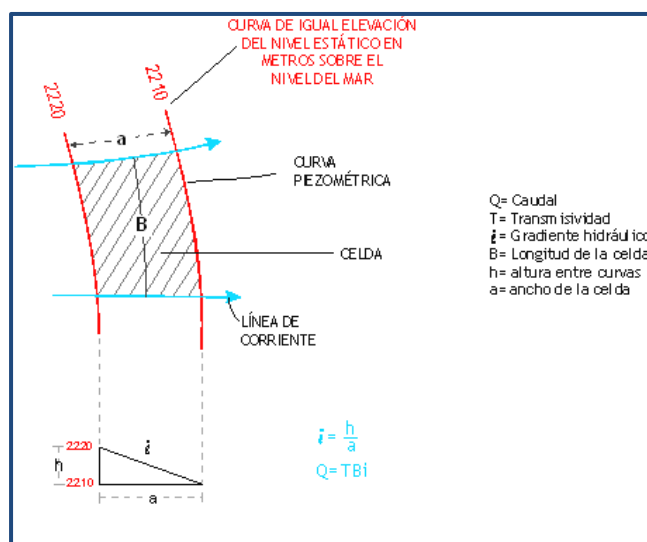
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B= Largo del canal de flujo;

i= Gradiente hidráulico (i);

T= Transmisividad en el canal de flujo;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **185.6 hm³/año**.

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 estudios previos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (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)
E1	5935	1560	10	0.0064	0.0010	0.0380	1.2
E2	2810	1095	30	0.0274	0.0020	0.1540	4.9
E3	5625	1720	10	0.0058	0.0020	0.0654	2.1
E4	8125	780	10	0.0128	0.0015	0.1563	4.9
E5	3210	935	10	0.0107	0.0025	0.0858	2.7
E6	5310	625	10	0.0160	0.0020	0.1699	5.4
E7	5155	1095	10	0.0091	0.0025	0.1177	3.7
E8	4060	935	10	0.0107	0.0025	0.1086	3.4
E9	10625	1030	10	0.0097	0.0020	0.2063	6.5
E10	5000	5625	10	0.0018	0.0025	0.0222	0.7
E11	5625	2500	10	0.0040	0.0025	0.0563	1.8
E12	4845	1250	10	0.0080	0.0020	0.0775	2.4
E13	4375	1405	10	0.0071	0.0035	0.1090	3.4
E14	4220	2190	10	0.0046	0.0040	0.0771	2.4
E15	6560	1875	10	0.0053	0.0035	0.1225	3.9
E16	4060	1406	10	0.0071	0.0030	0.0866	2.7
E17	8750	1095	10	0.0091	0.0025	0.1998	6.3
E18	9375	1250	10	0.0080	0.0030	0.2250	7.1
E19	10310	935	10	0.0107	0.0030	0.3308	10.4
E20	4375	1095	10	0.0091	0.0025	0.0999	3.2
E21	4060	2810	10	0.0036	0.0025	0.0361	1.1
E22	3435	1405	10	0.0071	0.0035	0.0856	2.7
E23	3595	935	10	0.0107	0.0035	0.1346	4.2
E24	5000	3750	30	0.0080	0.0030	0.1200	3.8
E25	7500	1875	30	0.0160	0.0025	0.3000	9.5
E26	4375	1405	30	0.0214	0.0030	0.2802	8.8
E27	3435	1720	10	0.0058	0.0030	0.0599	1.9
E28	6250	1095	5	0.0046	0.0030	0.0856	2.7
E29	12190	1250	5	0.0040	0.0025	0.1219	3.8
E30	5935	1560	20	0.0128	0.0020	0.1522	4.8
E31	10935	1095	5	0.0046	0.0030	0.1498	4.7
E32	5625	935	30	0.0321	0.0030	0.5414	17.1
E33	2970	1095	30	0.0274	0.0025	0.2034	6.4
E34	1875	1250	10	0.0080	0.0020	0.0300	0.9
E35	2500	935	10	0.0107	0.0020	0.0535	1.7
E36	8750	1030	10	0.0097	0.0020	0.1699	5.4
E37	9060	1095	10	0.0091	0.0020	0.1655	5.2
E38	2345	780	10	0.0128	0.0030	0.0902	2.8
E39	5625	1250	10	0.0080	0.0025	0.1125	3.5
E40	5000	2345	10	0.0043	0.0020	0.0426	1.3
E41	8435	935	5	0.0053	0.0020	0.0902	2.8
E42	7810	1185	5	0.0042	0.0030	0.0989	3.1
E43	7500	935	5	0.0053	0.0025	0.1003	3.2
E44	3435	780	5	0.0064	0.0020	0.0440	1.4
E45	4060	875	5	0.0057	0.0020	0.0464	1.5
E46	6875	1095	5	0.0046	0.0020	0.0628	2.0
Total entradas							185.6

7.1.3 Recarga incidental (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que 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, dependiendo de la profundidad al nivel estático, de las características del suelo y de las condiciones climáticas.

Debido a la falta de información de superficies y láminas de riego por cultivo, se consideró un coeficiente de infiltración de 15 % debido a que la profundidad media a la que se localiza del agua subterránea en la zona agrícola varía de 20 a 50 m y a la permeabilidad media a baja de los sedimentos del subsuelo.

El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 495.0 hm³ anuales; si consideramos que el 15% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero como recarga efectiva, obtenemos un volumen de **74.3 hm³/año de los excedentes del riego**.

Por otra parte, el volumen anual de agua subterránea para **uso público-urbano** es de 99.5 hm³, tomando en cuenta que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y debido a que la profundidad al nivel del agua subterránea en la zona urbana de Irapuato y Salamanca varía de 70 a 90 m en promedio, un 15 % de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las fugas en la red de distribución de agua potable y en el sistema de alcantarillado; el volumen de recarga de este tipo es de **14.9 hm³ anuales**.

Por lo tanto, **Ri = 14.9 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre mediante la extracción por bombeo (B), por flujo subterráneo horizontal (Sh) y de manera incipiente a través del manantial (Dm)

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo es de **672.4 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 del 2013, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **28.0 hm³/año**.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m²/s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)
S1	4515	1450	10	0.0069	0.0020	0.0623	2.0
S2	13550	1130	20	0.0177	0.0025	0.5996	18.9
S3	5805	1290	20	0.0155	0.0025	0.2250	7.1
Total entradas							28.0

7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, el único manantial censado tiene una descarga de 9 lps, que equivalen a un volumen anual de 0.3 hm³. **Dm = 0.3 hm³/año**.

7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2006-2013 mostrada en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.12 se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 1,404 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

ΔVS = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

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

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

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

Como consecuencia de la explotación intensiva del recurso, la posición del nivel piezométrico ha descendido, propiciando una variación negativa del almacenamiento.

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica se pueden observar en la tabla 4. El volumen anual del cambio de almacenamiento para este periodo es de -638.8 hm^3 , que representa un promedio anual de **$-192.9 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2006-2013)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km^2)	S_y	$\Delta V(S)$ ($\text{hm}^3/\text{año}$)
-20	-20	4.4	0.12	-10.6
-15	-15	53.7	0.12	-96.7
-15 a -20	-17.5	27.2	0.12	-57.1
-10 a -15	-12.5	304.1	0.12	-456.2
-10	-10	12.5	0.12	-15.0
-5 a -10	-7.5	701.9	0.12	-631.7
0 a -5	-2.5	276.5	0.12	-83.0
0	0	23.7	0.12	0.0
Área de balance		1404.0	TOTAL	-1350.2
Promedio anual				-192.9

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$R_v = B + Sh + D_m \pm \Delta V(S) - E_h - R_i$$

$$R_v = 672.4 + 28.0 + 0.3 - 192.9 - 185.6 - 14.9$$

$$R_v = 233.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_r$$

$$R = 233.0 + 185.6 + 89.2$$

$$R = 507.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso, su valor es de **507.8 hm³ anuales**, de los cuales 418.6 hm³ corresponden a la recarga natural y 89.2 hm³ a recarga incidental.

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 Irapuato-Valle su valor es de 28.3 hm³ anuales, de los cuales 28.0 hm³ corresponden a las salidas subterráneas hacia el acuífero vecino al oeste Pénjamo-Abasolo y 0.3 hm³ a la descarga del manantial que está comprometido para uso pecuario.

Por lo tanto, **DNC = 28.3 hm³/año**

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 **539,648,468 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 507.8 - 28.3 - 539.648468 \\ \text{DMA} &= -60.148468 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es **60,148,468 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Irapuato-Valle, estado de Guanajuato.