



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL
DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALPARAÍSO (3204), ESTADO
DE ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización del acuífero.....	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.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	9
4.2 Geología estructural.....	13
4.3 Geología del subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1 Tipo de acuífero.....	15
5.2 Parámetros hidráulicos.....	16
5.3 Piezometría.....	16
5.4 Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	18
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1 Entradas.....	21
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	21
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	22
7.2 Salidas.....	23
7.2.1 Bombeo (B).....	23
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	23
7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm).....	24
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	24
8. DISPONIBILIDAD.....	25
8.1 Recarga total media anual (R).....	26
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	26
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	26
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA).....	27
9. BIBLIOGRAFÍA.....	28

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 del acuífero

El acuífero Valparaíso, definido con la clave 3204 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-suroccidental del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de Jalisco, entre los paralelos 22°05'48" y 23°05'50" de latitud norte y entre los meridianos 103°12'16" y 103°55'32" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,322 km².

Limita al norte con los acuíferos Ábrego y Corrales, al noreste con Aguanaval; al este con Jerez; al oeste con Corrales, todos estos pertenecientes al estado de Zacatecas; al

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

ACUÍFERO 3204 VALPARAISO

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	23	14.5	23	4	17.2	
2	103	20	10.9	23	1	43.0	
3	103	17	34.1	22	58	40.2	
4	103	12	14.9	22	56	14.9	
5	103	12	42.1	22	50	51.1	
6	103	13	31.5	22	46	10.3	
7	103	14	21.5	22	43	16.1	
8	103	13	2.9	22	41	40.2	
9	103	12	33.7	22	40	42.8	
10	103	17	19.0	22	36	13.6	
11	103	16	17.0	22	32	48.7	
12	103	18	1.4	22	28	8.4	
13	103	18	50.6	22	24	16.7	DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE ESTATAL
14	103	17	58.9	22	17	44.3	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	103	41	1.8	22	6	32.6	DEL 15 AL 16 POR EL LIMITE ESTATAL
16	103	51	45.6	22	9	59.4	DEL 16 AL 17 POR EL LIMITE ESTATAL
17	103	45	16.2	22	43	9.0	
18	103	43	56.0	22	44	33.8	
19	103	43	28.3	22	49	42.9	
20	103	43	18.8	22	51	3.1	
21	103	40	42.6	22	52	44.1	
22	103	40	8.8	22	54	3.9	
23	103	39	40.6	22	56	22.3	
24	103	37	7.9	22	59	2.1	
25	103	30	58.1	23	5	48.1	
26	103	28	47.1	23	5	15.8	
27	103	26	48.5	23	5	0.7	
28	103	24	26.7	23	5	7.7	
1	103	23	14.5	23	4	17.2	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Valparaíso pertenece al Organismo de Cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos; el primero rige en al casi toda sus superficie y es el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas, así como en el resto de los Municipios del Estado de Zacatecas y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en los municipios señalados”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de agosto de 1988. Este decreto es de tipo III en el que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. En el extremo norte y noreste está vigente el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de los Municipios de Fresnillo y Villa de Cos, Zac., y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de las*

aguas del subsuelo en esos Municipios”, publicado en el DOF el 6 de abril de 1981. Esta veda es de tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca “Río Santiago”, instalado el 14 de julio de 1999. En la superficie del acuífero no se localiza ningún distrito o unidad de riego, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos de exploración y evaluación; a continuación, se citan los más importantes:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA DE VALPARAÍSO, ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por la empresa Servicios Geológicos S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1980. Este estudio comprendió una superficie de 12,000 km², tomando como centro el Valle de Valparaíso. Los trabajos consistieron en la realización de levantamientos geológicos, censo de aprovechamientos, durante el cual se censaron 171 captaciones que incluyen tanto al valle del Valparaíso como sus alrededores, muestreo de agua para análisis fisicoquímico, piezometría, descripción de unidades hidrogeológicas, funcionamiento hidráulico superficial y subterráneo. El estudio concluye que el acuífero regional está alojado en sedimentos areno-tobáceos, de espesor superior a los 200 m y que el basamento lo constituyen rocas andesíticas de edad cenozoica. Los trabajos no incluyeron la realización de un balance hidráulico de aguas subterráneas ya que su objetivo fue conocer las posibilidades acuíferas del valle de Valparaíso, definiendo además áreas favorables para la perforación de pozos.

REACTIVACIÓN DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE VALPARAÍSO, ZAC. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2004. Los objetivos del estudio fueron establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica del acuífero, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo, conocer la evolución y la condición actual de los niveles del agua subterránea, así como su comportamiento inducido por causas naturales o antropogénicas, especialmente por el incremento de la extracción para satisfacer el desarrollo futuro de las actividades productivas. La red piezométrica del acuífero quedó definida por 16 pozos.

EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LA FRACCIÓN NORTE DEL ACUÍFERO VALPARAÍSO, ZACATECAS. Realizado por Dania Isaura Pasillas Pasillas, en el año 2012. Tesis de Maestría de Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. En este trabajo se analiza información geofísica, hidrogeoquímica e hidrogeológica de la porción norte del acuífero Valparaíso; su objetivo fue identificar factores geológicos que controlan y favorecen el flujo de agua subterránea, definir el comportamiento del nivel piezométrico, así como analizar la calidad del agua. Se realizaron análisis físico-químicos a 30 muestras de agua subterránea. Los resultados establecieron dos tipos de agua de acuerdo a su contenido iónico: bicarbonatada-sódica, presente en la porción sur, y bicarbonatada-cálcica ubicada al norte y noreste de la subcuenca. En función de las concentraciones de STD, determina que el agua que se extrae es de reciente infiltración. Parámetros como el F y Mg se encontraron fuera del límite establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO VALPARAÍSO, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

El último estudio y la piezometría obtenida por la Dirección Local Zacatecas, son 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 a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se ubica completamente dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en la provincia Sierra Madre Occidental; la porción centro y norte pertenece a la subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos; y la porción sur es parte de la subprovincia Mesetas y Cañones del Sur.

La Sierra Madre Occidental se extiende en parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco. Es un gran sistema montañoso que tiene su origen en el Cenozoico Inferior o Medio, cuando se inició la extrusión de gigantescos volúmenes de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores oscilan entre 1,500 y 1,800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e

intermedias. Por su parte, la subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos se caracteriza por sus sierras altas, de 2,300 a 2,700 msnm, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas que alternan con valles, también alargadas en esa misma dirección. Los pisos de los valles son de pendientes suaves, con mayor frecuencia presentan terrazas y lomeríos, que probablemente son producto de la erosión de antiguos pisos de valles más altos. El drenaje se dirige a través de los valles hacia el noreste y sólo en su porción austral se encuentran algunas corrientes que desembocan hacia el sur, en los ríos Verde y Grande de Santiago. La subprovincia Mesetas y Cañones del Sur ocupa 7.94% de la superficie total del estado; junto con otras subprovincias centrales de la Sierra Madre Occidental, constituye la espina dorsal de la provincia; cuyas partes más altas y abruptas se encuentran en el sistema de subprovincias que ha sido llamado la Gran Mesa Riolítica. Se caracteriza por sus mesetas altas, en comparación con las del resto de la provincia, alargadas y orientadas en sentido norte-sur, sin presentar ramificaciones o digitaciones apreciables; presencia de cañones no tan espectaculares como los de otras subprovincias, paralelos y alternos a las mesetas, que se interrumpen en ocasiones para dar y lugar a valles tendidos que, río abajo, vuelven a encañonarse. Sus corrientes fluviales, orientadas en el mismo sentido norte-sur, confluyen al río Grande de Santiago.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor superficie del acuífero prevalece el clima semiseco templado BS₁kw. Al suroeste y occidente del valle, en zonas topográficamente altas se presenta un clima templado C (w₀) y C (w₁). El clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (i), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), es una característica establecida considerando las temperaturas medias anuales del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido. El régimen de lluvia (w), define el comportamiento de la lluvia durante el año, indica la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, en este caso es en verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término (w) indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual), varía entre 5 y 10.2. Se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C, la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 12 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: San José de los Llanetes, San Isidro de los González, Valparaíso, La Florida, Potrero de Gallegos, El Romerillo, Cueva Grande, Adjuntas del Refugio, Pastoría, Monte Escobedo, Presa Santa Teresa y Vicente Guerrero. Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1954-2017 y el más corto 1981-2007, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **582.2 mm, 16.1 °C y 1,744.1 mm**, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia: uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que se registran de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. La temporada de total estiaje ocurre de marzo a mayo, la región presenta heladas en un rango de 0 a 40 días por año y granizadas de 0 a 4 días anuales.

3.3 Hidrografía

La zona en la que se ubica el acuífero se localiza en la porción norte de la Región Hidrológica No. 12 "Lerma-Santiago", Subregión Hidrológica Bajo Santiago, dentro de las cuencas conocidas como Arroyo Lobatos y Río Bolaños 1; abarca también una pequeña fracción de Río Atengo. Estas cuencas están delimitadas por el parteaguas que forman al occidente la Sierra de Valparaíso, y al oriente la Sierra Los Cardos y al sureste la Sierra Los Álamos. En el área la corriente de mayor importancia está representada por el Río Valparaíso, que escurre en dirección noreste-suroeste y que es afluente del Río Grande de Santiago. Este río es de carácter intermitente y tiene como principal afluente al Río Loreto, que drena la región noreste del área.

La Presa Santa Teresa es la de mayor capacidad en la zona, almacena un volumen 9.17 hm³ y es utilizada para el riego de 1240 hectáreas; otras presas importantes son: la Presa Lobatos, que cuenta con una capacidad de 6.91 hm³, que se utilizan en el riego de 408 hectáreas, San Antonio de Padua almacena un volumen de 3.00 hm³, y San mateo que tiene una capacidad de almacenamiento de 2.10 hm³. Se tiene registrado además la existencia de 14 pequeñas presas y bordos, que suman una capacidad total de almacenamiento de 3.4 hm³.

3.4 Geomorfología

La región forma parte del sistema volcánico de la Sierra Madre Occidental. Los principales sistemas de topofomas que se observan son: en la porción central un piso

amplio de valle con lomeríos, constituidos por material aluvial y conglomerados del Cenozoico; en esta zona se ubican las poblaciones Valparaíso, San Mateo y Lobatos. Al norte y noreste de la región se observan sierras bajas, en tanto que al oeste y este el valle está delimitado por una superficie de mesetas pequeñas; al sur y sureste predomina una superficie de mesetas pequeñas con cañadas. Las sierras y mesetas están formadas por rocas ígneas intrusivas de composición riolítica.

Los principales sistemas montañosos son la Sierra de Valparaíso, ubicada al occidente de la zona, donde se presentan elevaciones máximas del orden de 2,870 msnm, y la Sierra Los Álamos, ubicada al sureste, con elevaciones máximas de 2,500 msnm. Las elevaciones mínimas se observan en las cañadas que se ubican en la porción sur del área acuífera, su altitud media es del orden de 1,500 msnm. El patrón del drenaje es del tipo dendrítico. Las características geomorfológicas que se presentan en la zona corresponden a un rejuvenecimiento de una gran cuenca lacustre de origen tectónico, evidenciado por la intensa erosión a que están sujetas las mesetas.

4. GEOLOGÍA

La geología de la región está representada por unidades del Terreno Guerrero y una cubierta de rocas ígneas de composición ácida y básica; las rocas cristalinas identificadas sólo afectan a las unidades del Terreno Guerrero (Carta Geológico-Minera Víctor Rosales F13-B57, escala 1: 50,000. SGM, 2011) (figura 2).

4.1 Estratigrafía

La estratigrafía de la región está representada por unidades litoestratigráficas de origen vulcano sedimentario con metamorfismo regional de bajo grado (facies de esquistos verdes), secuencias de rocas calcáreo-arcillosas y areno-arcillosas, rocas volcánicas básicas, intermedias y ácidas, rocas clásticas, así como ígneas intrusivas e hipabisales, cuyas edades varían del Triásico Superior al Holoceno.

Las rocas que afloran son de origen ígneo extrusivo de edad cenozoica, y están constituidas por tobas riolíticas arenosas, líticas piroclásticas y derrames riolíticos y basálticos que se encuentran sobrepuestas a las rocas antes mencionadas. Del cuaternario son los conglomerados y aluviones.

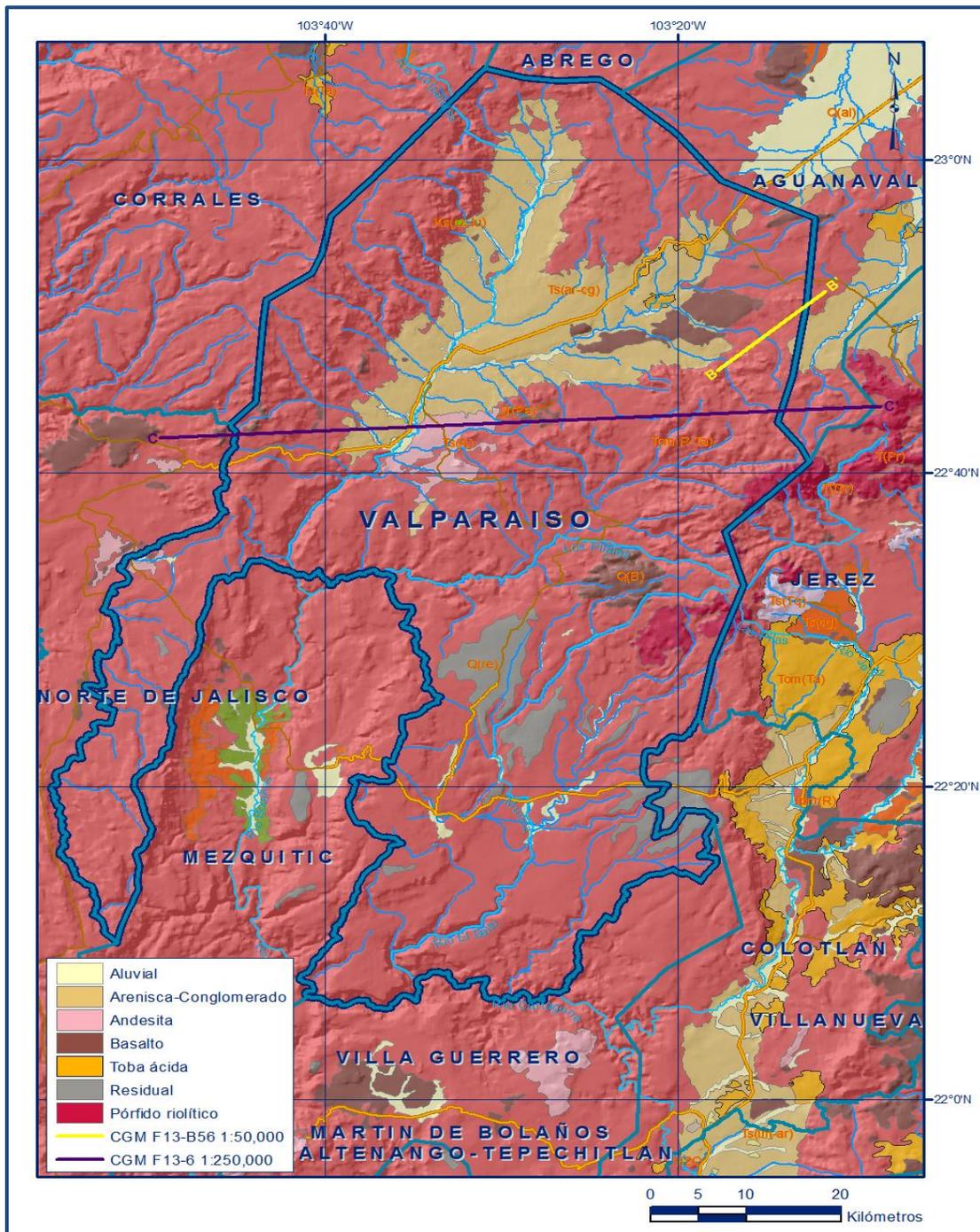


Figura 1. Geología general del acuífero

TRIÁSICO SUPERIOR

Formación Zacatecas

Es la unidad es la más antigua de la zona y corresponde a una secuencia de rocas metasedimentarias, constituida por metacalizas dispuestas en estratos delgados a laminares, cuya edad, basada principalmente en fauna de cefalópodos, se asigna al

Triásico Superior, sus afloramientos no se observan, pero se infiere que está cubierta, discordantemente, por la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Chilitos.

JURÁSICO SUPERIOR-CRETÁCICO INFERIOR

Formación Chilitos

Secuencia vulcanosedimentaria constituida en la base por lavas masivas y almohadilladas de composición basáltica-andesítica, con intercalaciones de lutitas y limolitas, rocas vulcanoclásticas y calcáreas, metamorizadas en facies de esquistos verdes, que cabalgan a las rocas de la Formación Zacatecas, que por su contenido faunístico se le asignó una edad correspondiente Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Aflora ampliamente al sur de la Ciudad de Valparaíso, en donde sus relaciones son discordantes con rocas volcánicas y sedimentarias continentales del Cenozoico. Al igual que la Formación Zacatecas, se encuentra afectada por apófisis de composición diorítica, de edad tentativa Eoceno.

CENOZOICO

Riolitas-Ignimbritas

Unidad volcánica conformada por riolitas y en menor proporción ignimbritas, con intercalaciones de brechas, aglomerados y basaltos. Generalmente forma gruesos espesores que constituyen escarpes debido al fallamiento en bloques que presentan. Aflora ampliamente en la mayor parte del área del acuífero, en zonas topográficamente altas; en la porción oriental entre los poblados Felipe Ángeles, Purísima de Carrillo y Cueva Grande; al noroeste en las cercanías de las comunidades El Gallinero y Bajío del Pino; y al sur en los alrededores de la Ciudad de Monte Escobedo. Estratigráficamente sobreyace concordantemente a la unidad volcánica ignimbrita-riolítica y subyace a una unidad de tobas riolíticas. Las rocas de esta unidad riolítica-ignimbrita se correlacionan con el Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental.

Ignimbritas-Riolitas

Secuencia que se caracteriza por la predominancia de las ignimbritas sobre las riolitas, con esporádicas intercalaciones de brechas riolíticas y basaltos; que presentan diferentes grados de alteración, fracturamiento y pseudoestratificación. Por lo general se presenta subyaciendo, en forma concordante, a la unidad riolítica-ignimbrita, en áreas aisladas cubre discordantemente a rocas vulcanosedimentarias del Jurásico-Cretácico y molásicas del Cenozoico. Se le asignó una edad correspondiente al Oligoceno-Mioceno y se correlaciona con el Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental. Aflora ampliamente al noreste de la localidad Lobatos.

Conglomerado polimíctico

Constituido por clásticos continentales de rocas volcánicas que se depositaron al concluir la actividad volcánica, cuya edad determinada por sus relaciones estratigráficas corresponde al Mioceno-Plioceno. En general cubre discordantemente a todas las unidades que le anteceden. Aflora ampliamente en la porción baja del valle, en las cercanías, norte y noreste de la Ciudad de Valparaíso.

Pórfido Riolítico

Este tipo de rocas subvolcánicas se presentan en forma de apófisis, domos y cuellos volcánicos, de diferentes tipos de texturas, como faneríticas con facies porfídicas y fracturadas. Afloran al este del acuífero en donde su espesor alcanza hasta 300 m. Se les asignó una edad de Neógeno (Cenozoico Superior) aunque estudios realizados en el distrito minero Asientos-Tepezalá del estado de Aguascalientes, la ubican en el Cretácico Superior-Cenozoico Inferior. Afecta parcialmente a las rocas de la Formación Chilitos y a las riolitas del Cenozoico.

CUATERNARIO

Basalto

Esta unidad máfica se presenta en forma de pequeños derrames aislados distribuidos en la zona, de color gris oscuro rojizo, con texturas afaníticas a faneríticas ocasionalmente con vesículas y muy fracturados. Sus afloramientos se localizan en pequeñas porciones del acuífero, a 4 km al sur del poblado San Miguel y en las cercanías de la localidad Lobatos. Estratigráficamente descansan discordantemente sobre depósitos de areniscas y conglomerados del Cenozoico Superior, así como también en forma discordante sobre depósitos aluviales del Cuaternario y rocas volcánicas ignimbríticas y riolíticas del Cenozoico; en otras localidades yace discordantemente sobre rocas volcánicas del Grupo Volcánico Superior Cenozoico. Por su posición estratigráfica, se le asignó una edad del Plio-cuaternario.

Aluvión

Unidad detrítica no consolidada de origen aluvial y fluvial, constituida por depósitos recientes formados por sedimentos de formas subredondeadas a redondeadas que son producto de erosión de las rocas existentes y que rellenan los valles y márgenes de ríos y arroyos; así como por los depósitos residuales y de piedemonte. Litológicamente, los depósitos incluyen arenas de granulometría fina a gruesa, limos, arcillas, gravas y conglomerados mal cementados, bien a mal clasificados. Afloran ampliamente en la parte más baja del valle, en el cauce del Río Valparaíso, y en las proximidades de los poblados Laguna Grande y Monte Escobedo. Estratigráficamente

se encuentra cubriendo discordantemente a rocas metamórficas del Triásico Superior y basaltos plio-cuaternarios. La edad asignada a esta unidad es del Holoceno por ser los últimos depósitos clásticos presentes en la región, producto de eventos geológicos que afectaron a las rocas preexistentes.

4.2 Geología estructural

El dominio estructural es producto de esfuerzos compresivos provocados por la Orogenia Laramide y de diversos eventos distensivos manifestados durante el Cenozoico, como producto del reajuste en el movimiento de las placas tectónicas que afectaron a las rocas mesozoicas y cenozoicas de la región. Las rocas metamórficas del Triásico Superior en el distrito minero de Zacatecas, presentan por lo menos dos eventos de deformación con metamorfismo regional de bajo grado. La presencia de contactos monolíticos, foliación casi plana, alargamiento y rotación de minerales y plegamiento isoclinal, indican que estas rocas sufrieron transporte tectónico y cabalgamiento con dirección noroeste. Las secuencias vulcanosedimentarias mesozoicas generalmente presentan un intenso plegamiento en dirección NW-SE con sinclinales y anticlinales volcados al noreste, llegando a desarrollar fallamientos inversos hacia el noreste y sureste.

La deformación dúctil se aprecia como una incipiente foliación S con convergencia al NE en las rocas metasedimentarias y vulcanosedimentarias; la aloctonía y la deformación a las que fueron expuestas las formaciones Zacatecas y Chilitos, no facilita la adecuada interpretación de pliegues, los cuales son generalmente estructuras de cortas dimensiones y en parte afectadas por cabalgaduras que no se pueden cartografiar a la escala de trabajo. Con la interpretación del modelo digital del terreno y su posterior verificación en campo, se definieron, dentro del dominio frágil, parte de 3 bloques orientados NW-SE a N-S, limitados por fallas normales. Los bloques conforman el pilar Sierra Fría, ubicado en el sector septentrional y nor-oeste, la fosa Calera ubicada en el sector oriente y la fosa Tlaltenango, ubicada en el sector sur-poniente. La tectónica del Triásico Superior se caracteriza por una transgresión marina que originó el depósito de una secuencia metasedimentaria turbidítica siliciclástica de tipo flysh, representada por la Formación Zacatecas, la cual se depositó en un ambiente de abanico submarino, en ambiente de cuenca post-arco, que hacia el oriente se conoce como la Cuenca Mesozoica del Centro de México. En el Jurásico Inferior y Medio no hay reportes de la presencia de rocas marinas. Durante el Jurásico Medio-Jurásico Tardío, inicia una nueva subsidencia de la cuenca que da lugar a una transgresión generalizada, lo que originó una serie de fosas que fueron rellenadas por sedimentación de tipo calcáreo-arcilloso sobre un paleo-relieve irregular y en un

ambiente de aguas someras. Para el Jurásico Superior-Cretácico Inferior, el mar se profundiza y favorece el depósito de una secuencia vulcanosedimentaria representada por la Formación Chilitos.

Después de estos eventos ocurre magmatismo plutónico y se emplazan cuerpos intrusivos que en la carta se manifiestan como apófisis y diques dioríticos del Eoceno. Para el Eoceno-Oligoceno-Mioceno, se interpreta que creció la intensidad del ángulo de la placa del Pacífico, y por lo tanto retrocede el arco magmático continental hacia el poniente, fenómeno que provocó que la corteza continental fuera fragmentada, ocasionando la formación de una serie de fosas y pilares tectónicos cuyos límites se convirtieron en los conductos de emisiones del paquete ignimbrítico-riolítico, y de flujos riolíticos que cubrieron a las rocas deformadas preexistentes. Las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano cubren el segmento sur del bloque de la Mesa Central, formando un extenso campo de domos y tapones riolíticos. A finales del Mioceno y el Plioceno, las fosas tectónicas se rellenaron con potentes espesores de clastos provenientes de la erosión de las rocas preexistentes, dando origen a la formación del conglomerado polimíctico. Durante el Cuaternario existen evidencias de coladas de basalto fisural y continuó el relleno de las fosas tectónicas con sedimentos clásticos de origen aluvial (Carta Geológico-Minera Víctor Rosales F13-B57, escala 1:50,000. SGM, 2011).

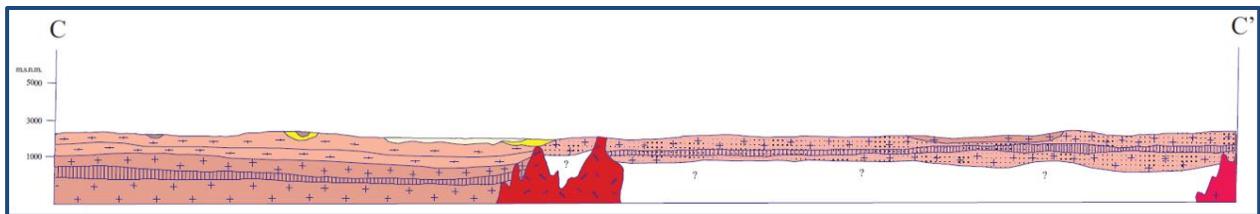
La interpretación de la imagen de satélite, el modelo digital de elevación y los datos de campo, definen que estructuralmente la región está afectada por un patrón de fallas normales NE y en menor grado al NW, que delimitan fosas y pilares tectónicos. Algunas de las estructuras están desplazadas por sistemas de fallas laterales orientadas al NE. En la carta magnética de campo total se identificaron altos y bajos magnéticos que podrían corresponder a cuerpos subvolcánicos o a domos, al parecer emplazados a lo largo de zona de debilidad definidas por los sistemas de fallas de rumbo NW que al mismo tiempo podrían haber favorecido la circulación de fluidos mineralizantes (Carta Geológico-Minera Presa Santa Rosa F13-B56, escala 1: 50,000. SGM, 2014).

4.3 Geología del subsuelo

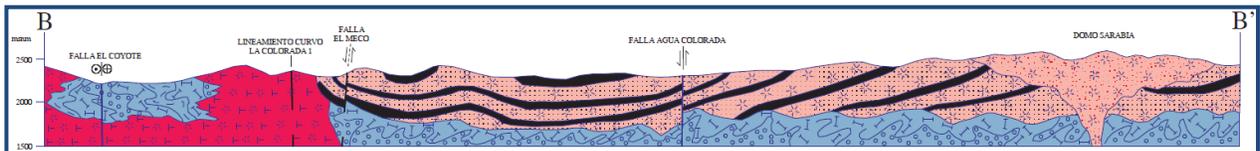
De acuerdo con la información geológica y geofísica del acuífero, cortes litológicos de pozos y por correlación con acuíferos vecinos, es posible afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares de origen aluvial y fluvial de granulometría variada, desde gravas hasta arcillas, y los conglomerados polimícticos que rellenan el valle, cuyo espesor varía desde algunos

metros hacia los flancos de las sierras, hasta un máximo de 200 m en la porción central del valle. Esta es la unidad que principalmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la zona. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que predominan riolitas e ignimbritas y menor proporción tobas ácidas y basaltos, que en conjunto tiene un espesor que puede variar de 30 a 400 m, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (figura 3).

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 rocas intrusivas, vulcanosedimentarias y metasedimentarias.



Fuente: Carta Geológico-Minera F13-6, "Zacatecas". Esc. 1:250,000 (SGM, 1997)



Fuente: Carta Geológico-Minera F13-B56, "Presas Santa Rosa". Esc. 1:50,000 (SGM, 2014)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero está constituido por sedimentos clásticos, depositados en una fosa de origen tectónico, ocasionado posiblemente por el fallamiento tipo graben provocado por la tectónica distensiva desarrollada durante el Oligoceno. Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado. La porción superior está conformada por sedimentos aluviales, de granulometría que varía de gravas a arcillas y conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar hasta 200 m en el centro del valle.

Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua en la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica y en menor proporción basáltica, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. El espesor conjunto de las rocas volcánicas es superior

a 400 m, ya que los pozos perforados en ellas a dicha profundidad no han atravesado toda la unidad. De acuerdo con la información geofísica, la última capa detectada está formada por material arcillo-arenoso de baja resistividad sin interés geohidrológico, por lo que es posible que esta unidad constituya el basamento del acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas que constituyen el acuífero, se analizó la información de 5 pruebas de bombeo de corta duración realizadas en estudios previos, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad obtenidos varían de **0.06×10^{-3} a $1.95 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ; si consideramos un espesor saturado promedio de 100 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **0.6×10^{-6} a $19.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (0.05 a 1.68 m/d).**

Adicionalmente, se cuenta con información de 19 aforos realizados en los últimos años, mediante los cuales se obtuvo el caudal específico (Q_e), como una estimación aproximada de la transmisividad (T), según la relación siguiente: $Q_e \text{ (lps/m)} \approx T (\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$. Los valores obtenidos varían de **0.01 a 1.08 lps/m**.

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, para fines del balance de aguas subterráneas, considerando el tipo y características de los materiales que constituyen el subsuelo de la región, se adoptó un valor de rendimiento específico promedio de **0.07**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2004-2018, que es el que tiene mayor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2018 muestra que los valores varían, de manera general, de 10 a 100 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro de los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan. Los niveles estáticos someros, de 10 a 30 m, se presentan en la región central de los valles a lo largo del cauce de los ríos Valparaíso y Loreto, desde San Mateo a Valparaíso y de Lobatos a San José del Vergel; en tanto que los más profundos, de 80

a 100 m, se registran en la porción occidental del valle de Valparaíso, hacia las zonas topográficamente más altas, desde Mimbres hacia el suroeste de Valparaíso (figura 4).

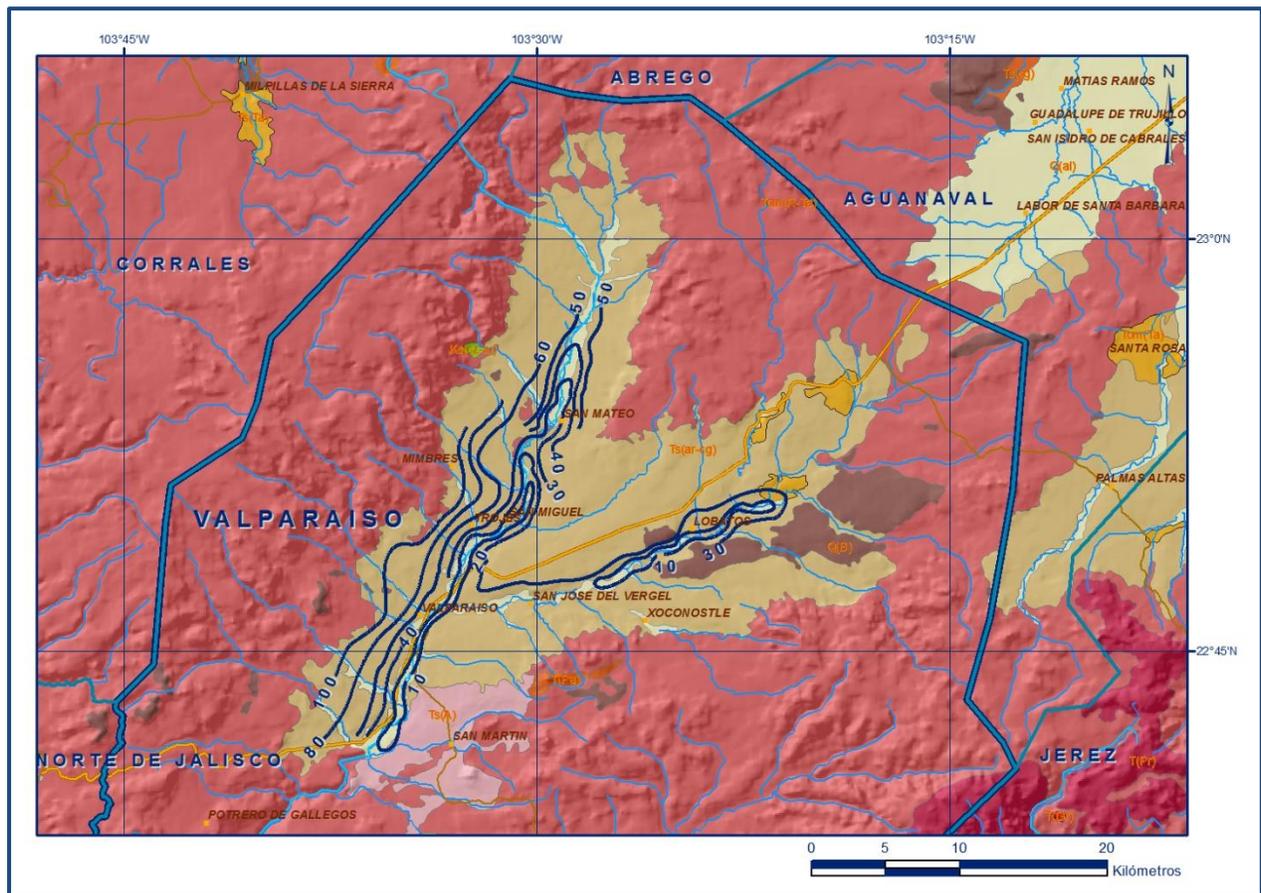


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2018)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2018 registró valores que variaron de 2,040 a 1,840 msnm, los cuales decrecen desde la porción noreste de los valles de Valparaíso y de Lobatos hacia la zona de confluencia de los ríos Valparaíso y Loreto, para después continuar en dirección al suroeste, hacia el acuífero vecino Mezquitic, del estado de Jalisco, a través del cañón del Río Valparaíso, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo noreste-suroeste, con alimentaciones provenientes del flanco norte. Las mayores elevaciones, de 1,980 a 2,040 msnm, se registran al norte de San Mateo y al noreste de Lobatos, en tanto que las menores elevaciones, de 1,850 a 1,840 msnm, se presentan al suroeste de Valparaíso, hacia el cañón del río del mismo nombre (figura 5).

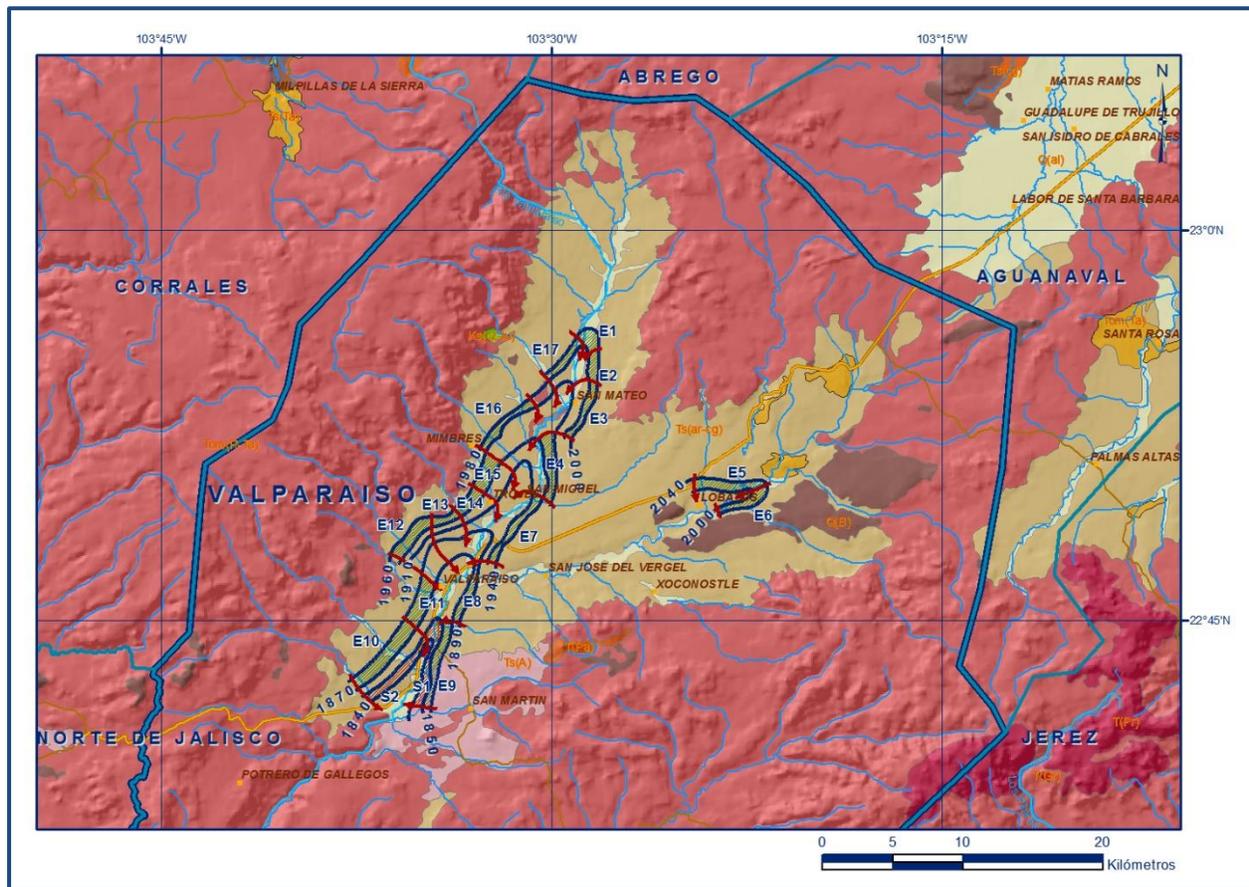


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2018)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2004-2018 sólo registró variaciones puntuales en la posición de los niveles del agua subterránea. Abatimientos de 1 a 4, que representan 0.07 a 0.3 m anuales, que se registraron al norte de San Mateo, entre éste y Las Trojes y al noreste de Valparaíso. Las recuperaciones son de 1 a 6 m, que representan 0.07 a 0.4 m anuales, y se observaron en la zona aledaña al San Mateo y al norte de Valparaíso, En la mayor parte del acuífero no se registraron cambios en el nivel estático (figura 6).

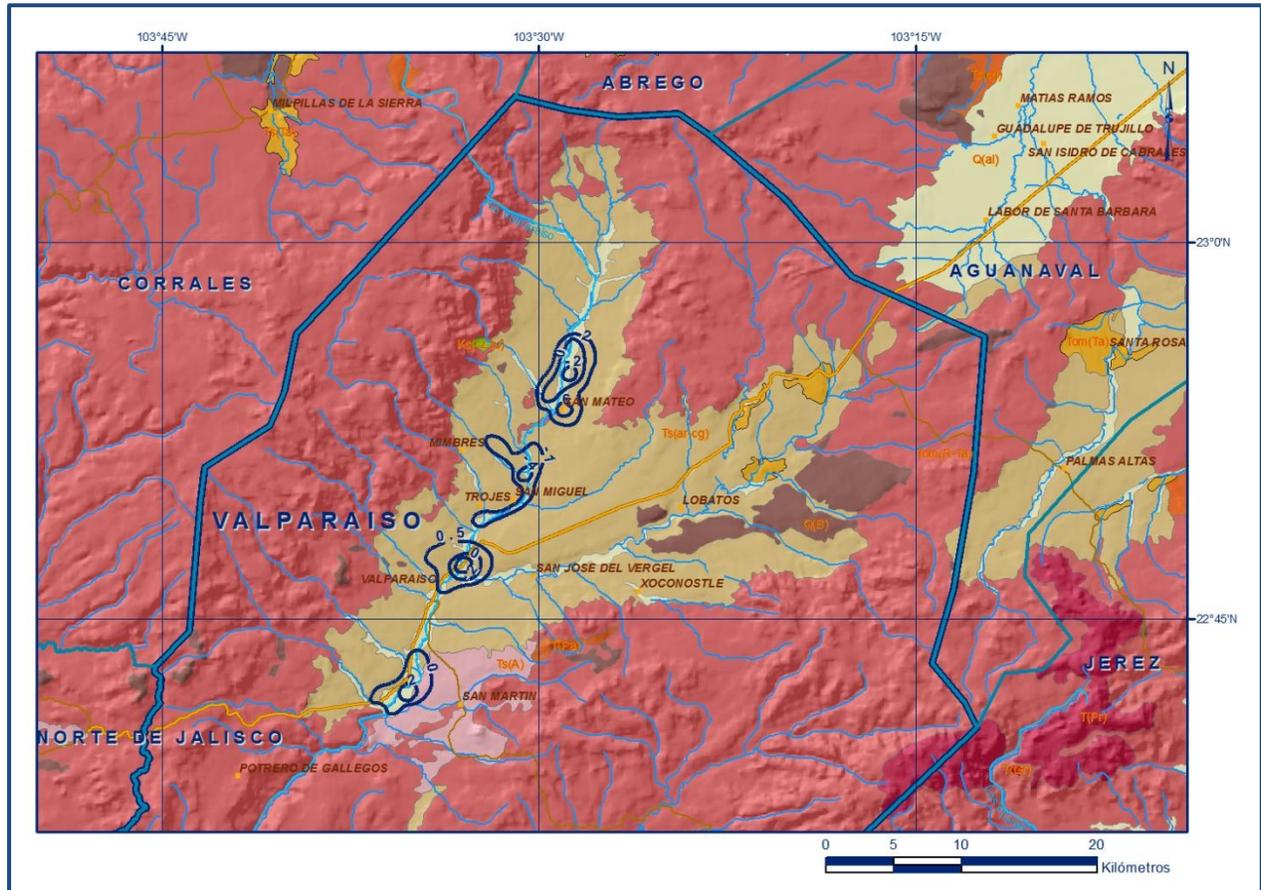


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2004-2018)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En el estudio realizado en el año 2012 (Pasillas Pasillas, Tesis de Maestría en Ciencias, CICECE), se caracterizó geoquímicamente el agua subterránea del acuífero Valparaíso, se colectaron 30 muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, iones principales, así como cobre, cromo, fierro, magnesio y fósforo.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) varían de 113 a 396 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por 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. 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 son inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y presentan valores

extremos de 226 a 789 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registran en la porción sur del acuífero y se incrementan en dirección NE-SW, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Los parámetros que se encuentran fuera de norma, son el fierro y el magnesio.

Las temperaturas registradas varían de 17 a 37 °C en tanto que el pH medido fluctúa entre 7.1 a 8.7, el valor más bajo de pH se registró en la comunidad Puerta de Cadena y el más alto en las cercanías de la Ciudad de Valparaíso. De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó la existencia de dos tipos o familias de agua predominantes, que son la bicarbonatada-cálcica (15 muestras) y bicarbonatada-sódica (15 muestras), que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas.

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 de agua se clasifican como C_2S_1 , que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, que se considera apta para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos.

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 2009 y complementada con datos actuales del Registro Público de Derechos del Agua (REPGA), en el acuífero Valparaíso se tienen registradas un total de 405 obras que aprovechan el agua subterránea, 202 pozos y 203 norias; existen además 52 manantiales; la totalidad de las obras están activas. De las obras, 94 se destinan al uso agrícola, 226 para uso público-urbano, 46 tienen un uso múltiple, 33 son pecuario, 5 para uso doméstico, y 1 más industrial. Se incluye en el censo la existencia de 52 manantiales, en los que predomina el uso público urbano.

El volumen de extracción asciende a **13.3 hm^3 anuales**, de los cuales 7.0 hm^3 (52.6 %) se destinan al uso agrícola, 3.3 hm^3 (24.8 %) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 2.9 hm^3 (21.8 %) tienen un uso múltiple, y 0.1 hm^3 (0.8 %) uso pecuario, doméstico e industrial.

Adicionalmente, a través de los **52 manantiales** identificados, se descarga un caudal conjunto estimado de 30 lps, que equivalen a **0.9 hm^3 anuales**, de estos 0.5 hm^3 son destinados al uso público urbano, 0.3 hm^3 agrícola y 0.1 hm^3 para otros usos.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2004-2018, en una superficie de **305 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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

7.1 Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (R_i). Para este caso, debido a que los volúmenes utilizados para uso público-urbano y agrícola son pequeños, para fines del balance se considera que no existe recarga incidental.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔVS), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

$$R_v + E_h - B - S_h - D_m - D_{fb} = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- R_v** = Recarga vertical
- E_h** = Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B** = Bombeo
- S_h** = Salidas por flujo subterráneo horizontal
- D_m** = Descarga a través de manantiales
- D_{fb}** = Descarga por flujo base
- ΔV(S)** = Cambio de almacenamiento

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

$$R_v = B + S_h + D_m + D_{fb} + \Delta V(S) - E_h \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

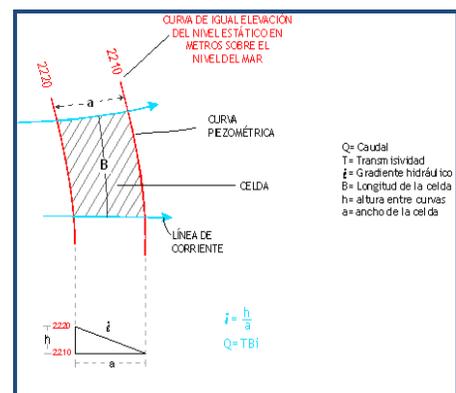
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de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

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2018 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

- Q** = Gasto;
- T** = Transmisividad;
- B** = Longitud de la celda;
- i** = Gradiente hidráulico;



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 **18.8 hm³ anuales**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas, fueron obtenidos de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, es este acuífero y otros colindantes, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, adaptados al espesor saturado de las distintas zonas.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2018)

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	1764	1419	20	0.0141	0.0010	0.0249	0.8
E2	2164	754	20	0.0265	0.0006	0.0344	1.1
E3	4345	567	20	0.0353	0.0006	0.0920	2.9
E4	4857	815	20	0.0245	0.0005	0.0596	1.9
E5	4351	768	40	0.0521	0.0003	0.0680	2.1
E6	3410	630	40	0.0635	0.0003	0.0650	2.0
E7	5718	572	30	0.0524	0.0002	0.0600	1.9
E8	4589	599	20	0.0334	0.0002	0.0306	1.0
E9	6329	925	20	0.0216	0.0003	0.0411	1.3
E10	5662	932	20	0.0215	0.0002	0.0243	0.8
E11	3318	1023	20	0.0196	0.0002	0.0130	0.4
E12	3487	776	20	0.0258	0.0001	0.0090	0.3
E13	1892	509	20	0.0393	0.0001	0.0074	0.2
E14	2158	760	20	0.0263	0.0002	0.0114	0.4
E15	2509	1008	20	0.0198	0.0002	0.0100	0.3
E16	4828	498	20	0.0402	0.0001	0.0194	0.6
E17	3513	536	20	0.0373	0.0002	0.0262	0.8
TOTAL							18.8

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh) y a través del flujo base (Dfb) del Río Valparaíso y por medio de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **13.3 hm³ anuales**.

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 2018, 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 **2.6 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2018)

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	6539	564	10	0.0177	0.0005	0.0580	1.8
S2	5836	664	10	0.0151	0.0003	0.0264	0.8
TOTAL							2.6

7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron pequeños 52 manantiales que descargan un caudal conjunto de 30 lps, que equivalen a un volumen anual de 0.9 hm³. Por lo tanto, **Dm = 0.9 hm³ anuales.**

7.2.4 Descarga por flujo base de ríos

De acuerdo con la información de la estación hidrométrica La Florida, proporcionada por la Dirección Local Zacatecas, el río Valparaíso presentó un caudal estimado de 300 lps de flujo base, en el estiaje del periodo 1980-2005, que representa un volumen de 9.5 hm³ anuales. Por lo tanto, **Dfb = 9.5 hm³ anuales.**

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2004-2018 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.07, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- ΔVS =** 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)

Como consecuencia de la explotación del recurso, la posición de los niveles piezométricos ha descendido propiciando una variación negativa del almacenamiento. El cambio en el volumen de agua almacenado promedio anual para el intervalo 2004–2018 fue de **-0.2 hm³ anuales** (tabla 4).

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2004-2018)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
6	6.0	0.7	0.07	0.3
2	2	1.2	0.07	0.2
0 a 2	-1	18	0.07	-1.3
0 a 2	1	9	0.07	0.6
0 a -0.5	-0.25	8.8	0.07	-0.2
-2	-2	1.7	0.07	-0.2
-1 a -4	-2.5	9.6	0.07	-1.7
-4	-4	0.7	0.07	-0.2
	TOTAL	49.7	TOTAL	-2.5
	Promedio anual			-0.2

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:

$$R_v = B + S_h + D_m + D_{fb} + \Delta V(S) - E_h$$

$$R_v = 13.3 + 2.6 + 0.9 + 9.5 - 0.2 - 18.8$$

$$R_v = 7.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual está definida por la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 7.3 + 18.8$$

$$R = 26.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

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 retorno de riego. Para este caso su valor es **26.1 hm³ anuales**, 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 de este acuífero su valor es de **13.0 hm³ anuales**, de los cuales 9.5 hm³ corresponden a la descarga por flujo base del Río Valparaíso, 0.9 hm³ a la descarga a través de manantiales y 2.6 hm³ a las salidas por flujo subterráneo. Por lo tanto, **DNC = 13.0 hm³ anuales**.

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 (REPGA), 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 **22'232,198 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) 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 aguas subterráneas (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea que 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.

$$\mathbf{DMA = R - DNCM - VEAS}$$

$$\mathbf{DMA = 26.1 - 13.0 - 22.232198}$$

$$\mathbf{DMA = - 9.132198 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

El resultado indica que no existe disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su déficit es de **9'132,198 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Valparaíso, estado de Zacatecas. Realizado por Servicios Geológicos S. A.

Comisión Nacional del Agua, 2004. Reactivación de red de monitoreo del acuífero del valle de Valparaíso, Zac. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2009. Determinación de la disponibilidad de Agua en el acuífero Valparaíso, estado de Zacatecas.

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), 2012. Evaluación geohidrológica de la fracción norte del acuífero Valparaíso, Zacatecas. Realizado por Dania Isaura Pasillas Pasillas. Tesis de Maestría de Ciencias,

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Piezometría histórica del acuífero Valparaíso, Zacatecas.

Servicio Geológico Mexicano, 1997. Carta Geológico-Minera F13-6 "Zacatecas". Escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2011. Carta Geológico-Minera F13-B57 "Víctor Rosales". Escala 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2014. Carta Geológico-Minera F13-B56 "Presas Santa Rosa". Escala 1:50,000.