



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VILLANUEVA (3211), ESTADO DE
ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia fisiográfica	6
3.2	Clima.....	7
3.3	Hidrografía.....	8
3.4	Geomorfología	9
4	GEOLOGÍA.....	9
4.1	Estratigrafía.....	10
4.2	Geología estructural.....	13
4.3	Geología del subsuelo	15
5	HIDROGEOLOGÍA.....	16
5.1	Tipo de acuífero.....	16
5.2	Parámetros hidráulicos	16
5.3	Piezometría.....	17
5.4	Comportamiento Hidráulico	17
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2	Elevación del nivel estático	18
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	19
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	21
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	22
7.1	Entradas.....	22
7.1.1	Recarga vertical (Rv)	23
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.1.3	Recarga incidental (Rr).....	24
7.2	Salidas.....	25
7.2.1	Bombeo (B).....	25
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.2.3	Descarga por flujo base (Dfb)	25
7.2.4	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	26
8	DISPONIBILIDAD	27
8.1	Recarga total media anual (R)	27
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	28
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	28
9	BIBLIOGRAFÍA	30

1 GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El acuífero Villanueva, definido con la clave 3211 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-sur del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de Jalisco, entre los paralelos 22°03' y 22° 38' de latitud norte y entre los meridianos 102°35' y 103° 09' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,794 km².

Limita al norte con los acuíferos Jerez y de Benito Juárez, al este con el acuífero Ojocaliente; al sur con Jalpa-Juchipila; al suroeste con el acuífero Tlaltenango-Tepechtlán y al oeste con Jerez.

Todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas; al suroeste limita también con el acuífero Colotlán, perteneciente al estado de Jalisco (figura 1).

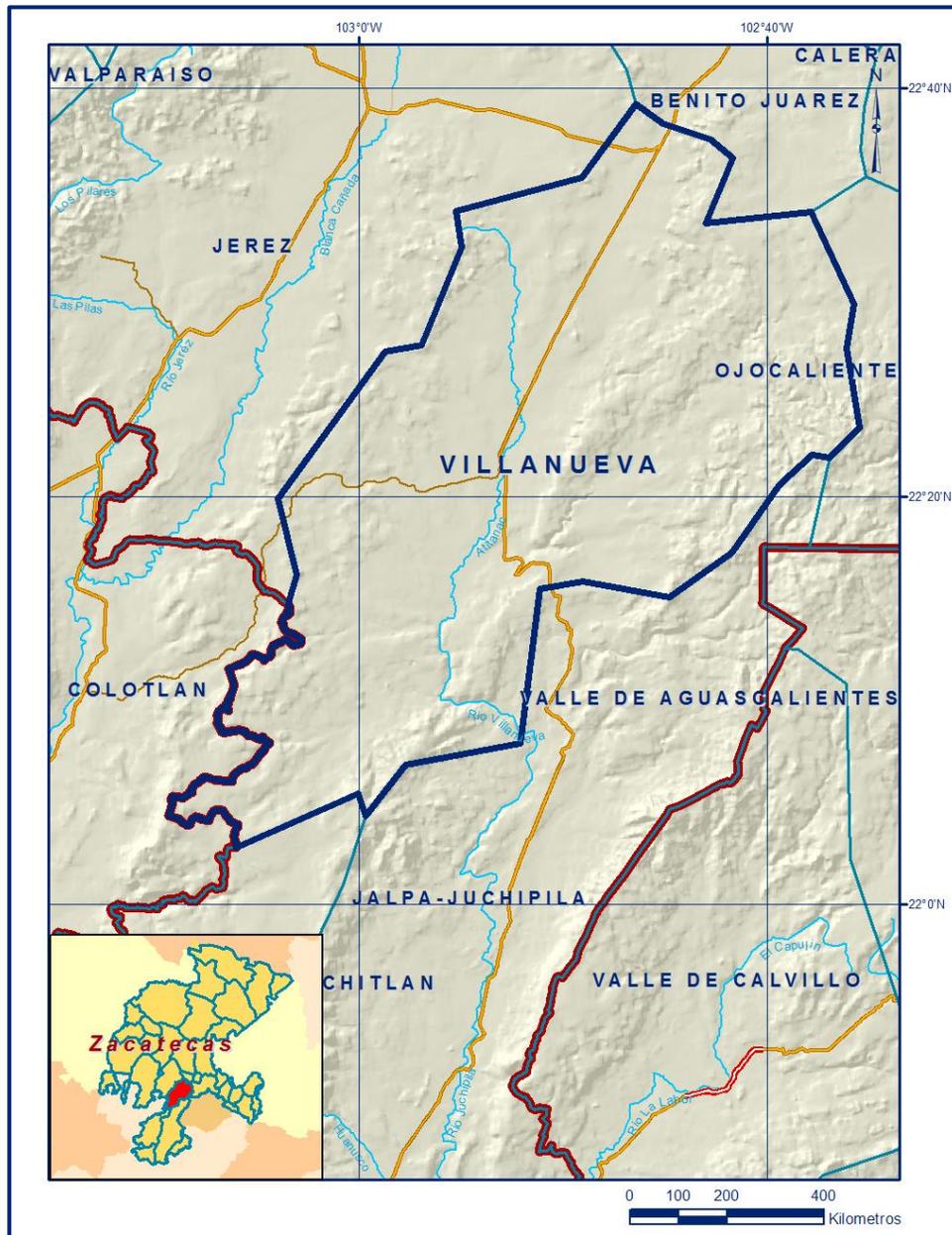


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el territorio que comprende el acuífero comprende la mayor parte del municipio de Villanueva, así como porciones menores de Jerez, Genaro Codina, El Plateado de Genaro Codina y Tepetongo. 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

ACUIFERO 3211 VILLANUEVA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	46	27.7	22	39	13.4	
2	102	45	7.6	22	38	17.6	
3	102	42	49.2	22	37	31.0	
4	102	41	43.5	22	36	36.0	
5	102	43	3.0	22	33	23.5	
6	102	37	53.0	22	33	55.9	
7	102	35	45.9	22	29	25.1	
8	102	36	8.8	22	27	15.9	
9	102	35	31.0	22	23	20.5	
10	102	36	58.6	22	21	53.0	
11	102	37	49.9	22	22	2.2	
12	102	39	26.5	22	20	35.2	
13	102	41	44.8	22	17	14.5	
14	102	44	47.7	22	15	3.8	
15	102	49	2.6	22	15	51.0	
16	102	51	9.3	22	15	28.2	
17	102	52	5.3	22	7	52.9	
18	102	57	43.0	22	6	50.9	
19	102	59	41.8	22	4	13.1	
20	103	0	14	22	5	27.3	
21	103	6	0.2	22	2	46.1	DEL 21AL 22POR EL LIMITE ESTATAL
22	103	3	28.9	22	14	42.9	
23	103	3	4.5	22	16	10.2	
24	103	3	59.2	22	19	54.2	
25	102	58	42.4	22	27	5.5	
26	102	56	55.5	22	27	24.6	
27	102	54	58.4	22	32	13.5	
28	102	55	16.2	22	33	59.1	
29	102	49	7.2	22	35	38.4	
1	102	46	27.7	22	39	13.4	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Villanueva pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”, al Consejo de Cuenca “Río Santiago”, instalado el 14 de julio de 1999 y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del “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.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola.

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:

ESTUDIOS ELÉCTRICOS DE RESISTIVIDAD REALIZADOS EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por la empresa Compañía Mexicana Aerofoto, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1981.

El estudio comprendió la realización de 200 sondeos eléctricos verticales, de los cuales 58 fueron en el acuífero Villanueva. Su objetivo fue localizar los sitios más adecuados y favorables para la perforación de pozos de extracción de agua para uso agrícola.

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ÁREA DE GENARO CODINA, ZACATECAS. Realizado por la empresa Geólogos Consultores S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en el año 1984.

Este estudio fue realizado en una superficie de 1,600 km², comprendió parte de los municipios de Genaro Codina, Guadalupe y Villanueva, cubriendo parcialmente, en su porción occidental, el acuífero Villanueva. Los trabajos consistieron en la realización de levantamientos geológicos, censo de aprovechamientos, sondeos geofísicos, muestreo de agua para análisis físico-químicos y toma de lecturas piezométricas.

La identificación de unidades hidrogeológicas y la ejecución de 15 sondeos eléctricos verticales, distribuidos en dos perfiles geoeléctricos, permitieron definir el funcionamiento hidráulico superficial y subterráneo, determinar las posibilidades de producción de las rocas volcánicas ácidas y localizar las áreas más favorables para la perforación de pozos exploratorios.

El estudio concluye que en el área de estudio la extracción por los aprovechamientos era de 2.3 hm³/año, mientras que la recarga se estimó en 9.6 hm³/año, superior a la extracción.

REACTIVACIÓN DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE VILLANUEVA, 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 17 pozos.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS ACUÍFEROS VILLANUEVA Y JEREZ, ESTADO DE ZACATECAS. Elaborado por la Universidad Autónoma de Zacatecas para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2013. El objetivo general fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua y contar con la información necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea y su disponibilidad. Mediante la realización de actividades de campo como censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo y nivelación de brocales de pozos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO VILLANUEVA, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2015. 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, Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos.

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 Terciario 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.

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 $B_{s1}kw$. Es clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (s_1), 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 la temperatura media anual 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 se precipita 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 4 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Villanueva, Malpaso, Palomas y Tayahua.

Con los registros obtenidos para diferentes periodos, el más grande 1963-2012 y el más corto 1975-2012, y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **489.7 mm, 17.4 °C y 1,979.7 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 de 20 a 40 heladas por año.

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 Alto Santiago, dentro de las cuencas conocidas como Río Palomas y Presa El Chique, circundadas al oeste por el parteaguas que forman, entre otros, el Cerro La Mesa, Mesa Las Palmas, El Palillo, Cerro San Francisco y El Espinazo del Diablo.

Al este, está delimitada por el Cerro Quintero, Mesa La Sabina, Cerros Los Pilarillos, La Campana, Los Caracoles, La Leona y La China; esta cuenca está formada por las subcuencas del Río Juchipila-Malpaso y Río Palomas.

Esta cuenca tiene forma alargada y orientada en dirección NE-SW; al norte se inicia a la altura de la Presa Malpaso y termina al oeste de la Presa El Chique.

La corriente superficial más importante está representada por el Río Villanueva, que es afluente del Río Juchipila, el cual confluye al Río Santiago. El Río Villanueva es de carácter intermitente y fluye en dirección norte-sur; sus afluentes son los arroyos Malpaso, Boca de Tapias, Colorado, La Penitencia, La Parida y Río San Cristóbal.

La infraestructura hidráulica está representada por algunas presas entre las que destacan, en orden de importancia por su capacidad de almacenamiento, las conocidas con los nombres Julián Adame, Palomas, Chicomostoc, El Fuerte, El Jagüey, Matías Romero, El Carretero y Maravillas; así como una gran cantidad de bordos y tanques que sumados con las presas constituyen un número importante de almacenamientos de aguas superficiales. Algunos de los bordos se localizan en las comunidades El Tigre, Boquillas del Carmen y La Quemada.

3.4 Geomorfología

La región forma parte del sistema volcánico de la Sierra Madre Occidental, el valle en el que se aloja el acuífero se localiza en la porción central, orientado en dirección NE-SW, flanqueado por sierras. Los principales sistemas de topografías que se observan son: en la porción central un piso amplio de valle con lomeríos, constituidos por material aluvial y conglomerados del Terciario; en esta zona se ubican las poblaciones Villanueva, La Quemada, Felipe Ángeles y Encarnación. Al sur de la región, se observan mesetas escalonadas con cañadas, en tanto que al oeste y este el valle está delimitado por sierras altas con mesetas.

La elevación topográfica más importante está representada por la Sierra Fría, ubicada al este de la ciudad de Villanueva, cuyas elevaciones máximas alcanzan 2,600 msnm; está constituida por un paquete volcánico formado por brechas, ignimbritas, tobas y riolitas. La elevación máxima al oeste de la zona es de 2,500 msnm y en la porción centro del valle es de 1,800 msnm. El drenaje en general es de tipo dendrítico. Por sus características, la región se ubica en una etapa geomorfológica de madurez temprana

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). La geología 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. Las rocas que afloran son de origen ígneo extrusivo de edad terciaria, 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 2).

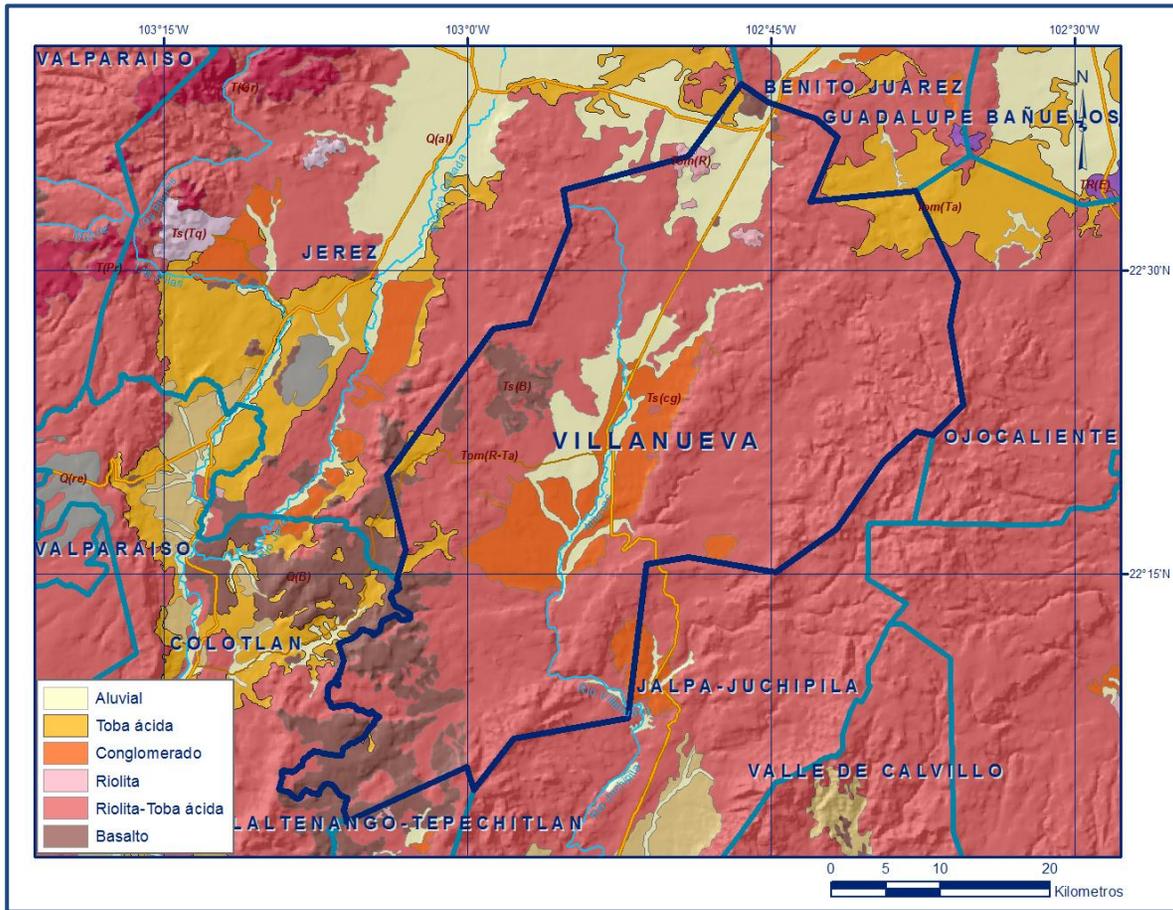


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica de la zona está representada por rocas metamórficas, sedimentarias, vulcanosedimentarias e ígneas intrusivas y extrusivas, cuyas edades varían del Triásico Superior al Holoceno.

TRIASICO SUPERIOR

Formación Zacatecas

Nombre con el que Carrillo Bravo (1971) se refirió a una secuencia de filitas y metalutitas sericitizadas con nódulos de cuarzo, meta-areniscas, metatobas, metaconglomerados y metacalizas, interestratificadas con filitas, sobre las cuales sobreyacen transicionalmente metalavas de composición andesítico-basáltica; todas ellas con metamorfismo de facies de esquistos verdes, que afloran al noroeste y sureste de la ciudad de Zacatecas. Con base en los restos fósiles Burckhardt y Scalia (1906), la dataron en el Triásico Superior. Dentro del área de estudio se encuentran distribuidas principalmente al norte y noroeste del poblado Guadalupe.

Litológicamente está constituida por intercalaciones de estratos delgados de filitas, pizarras, capas gruesas y medias de cuarcitas y calizas. Las filitas son de color gris verdoso, con algunas tonalidades ocasionadas por el contenido de hematita diseminada; en lo que respecta a las pizarras, en ocasiones se encuentran silicificadas, son de color verde y se encuentran alternando con horizontes arcillosos.

Las cuarcitas son de color gris rosáceo amarillento, muy compactas; las calizas se presentan en forma de cuerpos lenticulares, de color gris y se encuentran recristalizadas. En las cuarcitas y filitas se llegan a presentar lentes de cuarzo lechoso, seguramente producto de los procesos hidrotermales. En los trabajos consultados no se tiene reportado el espesor de la unidad, por lo que se asume que su potencia corresponde con los 1,000 m que le asignó Mc Ghee en 1977.

La base de la unidad no se observa, en tanto que su contacto superior con la Formación Chilitos es tectónico (Centeno, 1997). La edad estimada para esta formación es del Triásico Superior. Su depósito se considera que ocurrió en un ambiente marino marginal.

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, metamorfizadas 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 de manera aislada fuera del área del acuífero, en donde sus relaciones son discordantes con rocas volcánicas y sedimentarias continentales del Terciario. Al igual que la Formación Zacatecas, se encuentra afectada por apófisis de composición diorítica de edad tentativa Eoceno.

TERCIARIO

Riolitas-Ignimbritas

Unidad volcánica conformada por riolitas y en menor proporción ignimbritas, con intercalaciones de brechas, aglomerados y basaltos en algunas localidades restringidas. Generalmente forma gruesos espesores que constituyen escarpes debido al fallamiento en bloques que presentan.

Aflora ampliamente en la mayor parte del área del acuífero; de la porción central al norte, entre los poblados San Isidro, Palomas Viejas, Juan Miguel, Cerro Colorado, Cerro Blanco Braulio; al este en la Barranca Milpillas; y al noroeste en el Cerro El Tajo, Cerro El Chino y los poblados Magueyito y el Vergel. 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 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 sobreyaciendo concordantemente a las andesitas del Paleoceno-Eoceno en el Río Bolaños y subyaciendo, también en forma concordante, a la unidad riolítica-ignimbrítica, en áreas aisladas cubre discordantemente a rocas vulcanosedimentarias del Jurásico-Cretácico y molásicas del Terciario. Se le asignó una edad correspondiente al Oligoceno-Mioceno y se correlaciona con el Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental.

Aflora ampliamente en la mayor parte del área del acuífero, en las zonas topográficamente más altas al igual que la unidad anterior. Al norte en la localidad de Felipe Ángeles; al este en La Purísima, Santa Cruz de Las Cargadas, San Antonio de Las Huertas, Palomas, San Diego y Laguna del Carretero; al sur en El Salitre de Arriba, La Junta de Los Ríos, Tuxtac, El Zapotillo, El Reparto, Adolfo López Mateos y Maravillas; al suroeste en San Bartolo y Presa El Jagüey; al Oeste en San Antonio Tarasco, General Matías Ramos, Emiliano Zapata, Boquilla del Carmen, El Tigre y Boca de Rivera.

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 tobas las unidades que le anteceden. Aflora ampliamente en la porción baja de los valles y están constituidos por fragmentos de ignimbritas, tobas riolíticas y en menor grado por filitas, areniscas y andesitas.

CUATERNARIO

Basalto

Esta unidad máfica se presenta en forma de pequeños derrames aislados distribuidos en la zona, presentan color gris oscuro rojizo, con texturas afaníticas a faneríticas ocasionalmente con vesículas y muy fracturados. Sus afloramientos se localizan en una pequeña porción, en los poblados Malpaso y Felipe Ángeles, en el límite con el acuífero Villanueva, donde se relacionan a un aparato volcánico.

Estratigráficamente descansan discordantemente sobre depósitos de areniscas y conglomerados del Terciario Superior, así como también en forma discordante sobre depósitos aluviales del Cuaternario y rocas volcánicas ignimbríticas y riolíticas el Terciario; en otras localidades yace discordantemente sobre rocas volcánicas del Grupo Volcánico Superior del Terciario. Por su posición estratigráfica, se le asignó una edad 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 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 que afloran ampliamente en la parte más baja de los valles, entre los poblados Villanueva, El Salto, Tenango, La Quemada y Guadalupe de Chicomostoc.

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.

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 con vergencia 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 noroeste, 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 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).

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 los valles, cuyo espesor varía desde algunos metros hacia los flancos de las sierras, hasta 200 m en la porción central del valle. Esta es la unidad que principalmente se explota para satisfacer las necesidades de agua en la región.

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 hasta de 400 m, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

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.

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, así como algunos cortes litológicos, 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 ácida y tobas areno-arcillosas; en menor proporción de composición 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

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2013, se ejecutaron 6 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por los métodos analíticos convencionales se establece que los valores medios de transmisividad varían entre **$5.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** y **$6.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$** . Tomando en cuenta un espesor promedio de 70 m, los valores de conductividad hidráulica varían entre **8.3×10^{-6}** y **$9.4 \times 10^{-8} \text{ m/s}$** (**0.7 a 0.01 m/d**).

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 **0.02**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2013, así como la piezometría recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2004-2015, que es el que tiene mayor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento Hidráulico

5.4.1.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2015 mostró que los valores variaban, de manera general, de 30 a 130 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 30 a 50 m, se presentaron en la región norte y central del acuífero, entre las comunidades Colonia Felipe Ángeles y El Vergel, y al sur de Villanueva, respectivamente; en tanto que los más profundos, de 100 a 130 m, se registraron hacia las zonas topográficamente más altas que rodean el valle de Villanueva, desde El Jagüey, en el sur, hasta la zona comprendida entre La Quemada, El Tigre y Adjuntas del Refugio, en la porción norte (figura 3).

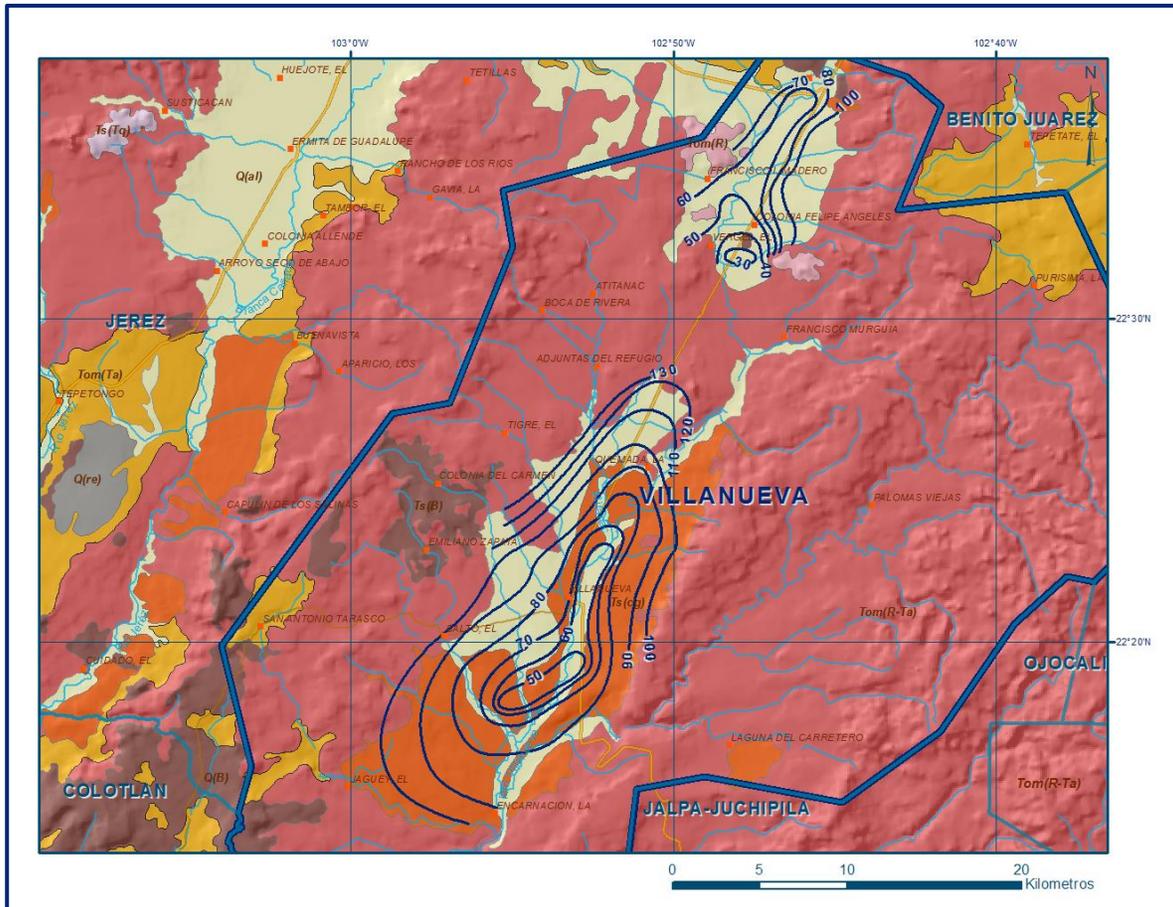


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2015)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2015 registró valores que variaron 2060 a 1830 msnm. Las menores elevaciones de 1830 a 1880 msnm se registraron en la porción sur del acuífero, en la zona cercana a los poblados Encarnación, El Jagüey, Tenango, El Salto y Villanueva. Las mayores elevaciones, de 2030 a 2060 msnm, se registraron en las porciones altas ubicadas al norte del acuífero, hacia las poblaciones Malpaso, Felipe Ángeles, Francisco I. Madero y El Vergel, desde donde descienden gradualmente por efecto topográfico hacia el sur del acuífero, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo N-S y NE-SW, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental (figura 4).

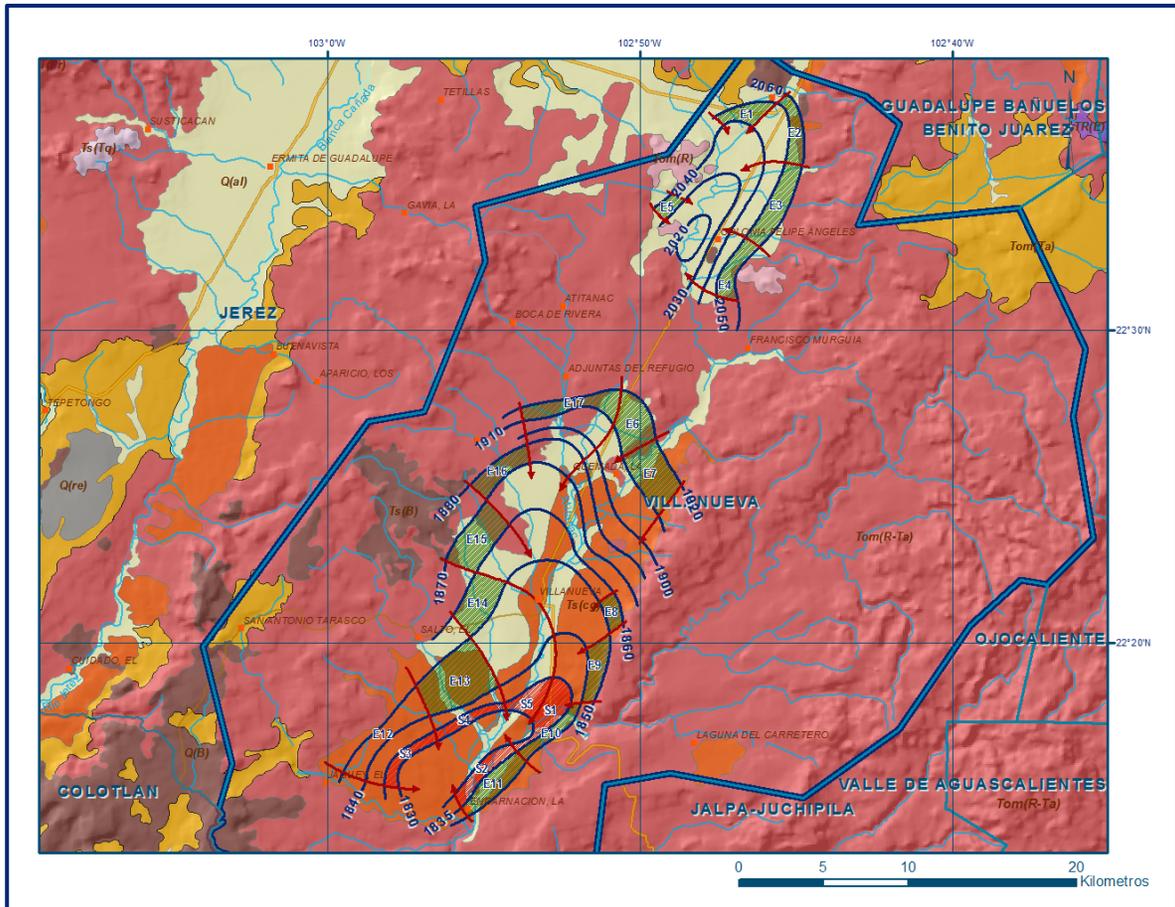


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2004-2015 registró valores de abatimiento en la mayor parte de la superficie del acuífero, que varían de 2 a 10 m.

Los mayores abatimientos se registran en la porción central del valle, en torno del poblado Villanueva, y al norte del acuífero entre los poblados El Vergel y Malpaso, donde se concentra la extracción por bombeo. En estas zonas el abatimiento medio anual es de 0.4 m (figura 5).

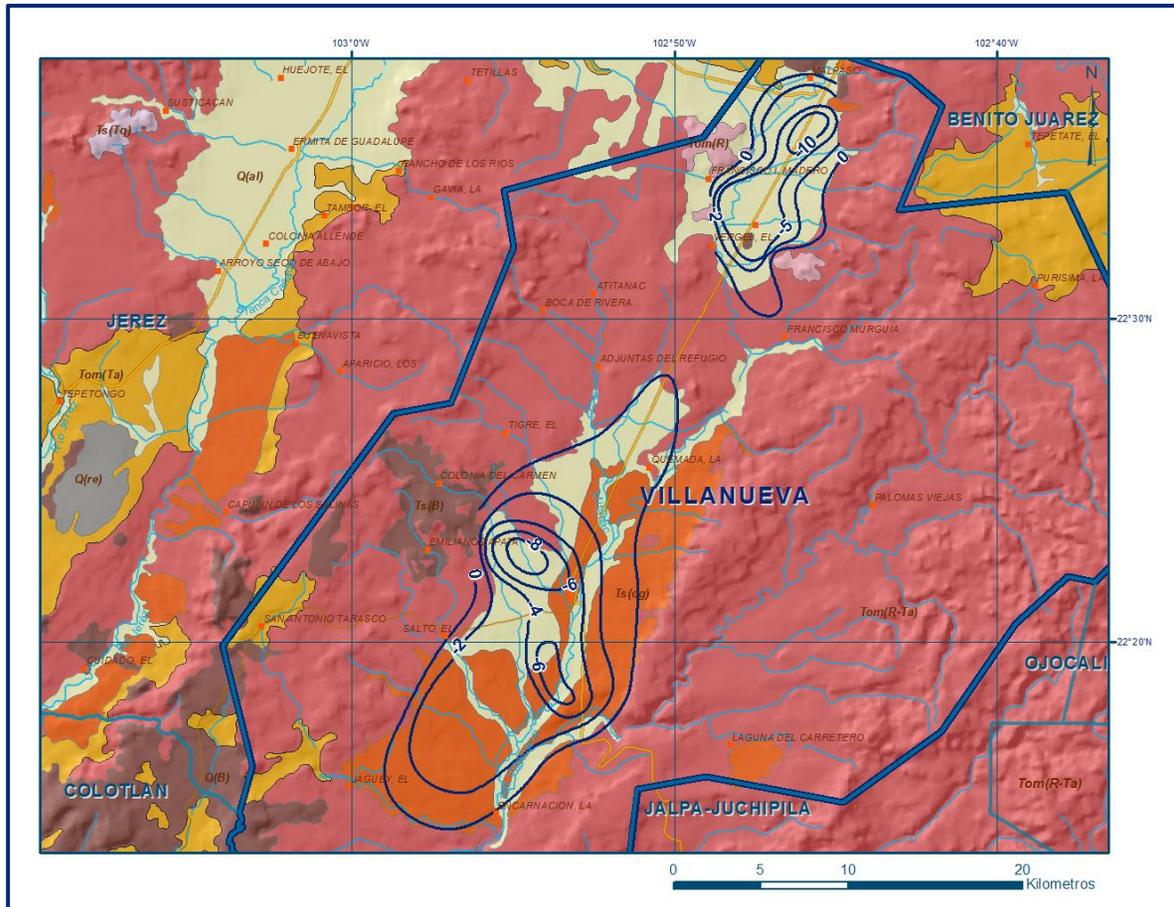


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2004-2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en los estudios realizados en 2013, se tomaron 19 muestras de agua subterránea, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación.

Para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad así como iones principales.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) varían de 50 a 298 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a la 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 STD, para el agua destinada al consumo humano. 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 102 a 609 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registran en la porción sur del acuífero y se incrementan en dirección general NE-SW, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Las temperaturas registradas varían de 18.7 a 33.1 °C en tanto que el pH medido fluctúa entre 6.7 a 8.1, el valor más bajo de pH se registró en la comunidad Francisco Murguía y el más alto en Felipe Ángeles.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que la familia del agua que predomina es la bicarbonatada-mixta, que representa 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 totalidad de las muestras de agua se clasifican como C_1S_1 , que representa agua de baja salinidad 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 2013, se registraron un total de 274 obras que aprovechan el agua subterránea, 101 pozos, 174 norias y 4 manantiales; de las cuales 228 están activos y 47 se consideran inactivos (28 pozos y 19 norias).

De las obras activas, 105 se destinan al uso agrícola, 119 para uso público-urbano y 4 más para uso doméstico y pecuario

El volumen de extracción asciende a **19.4 hm^3 anuales**, de los cuales 16.7 hm^3 (86.1 %) se destinan al uso agrícola y 2.7 hm^3 (13.9%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región. El volumen para uso doméstico-abrevadero es muy pequeño.

A través de los 4 manantiales se descarga un caudal pequeño de 1 lps, que equivalen a 0.03 hm³ anuales, destinado al uso agrícola, que para fines del balance de aguas subterráneas se considera despreciable.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2004-2015, en una superficie de **260 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 quedan 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 (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 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 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 (Ri).

Para este caso, debido a que los volúmenes utilizados para uso público-urbano son incipientes, solo se considera la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr).

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, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Rr:** Recarga Incidental por retornos de riego
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dfb:** Descarga por flujo base
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = B + Sh + Dfb + \Delta V(S) - Eh - Rr \quad (2)$$

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 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 la llanura 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 2015 (figura 4), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

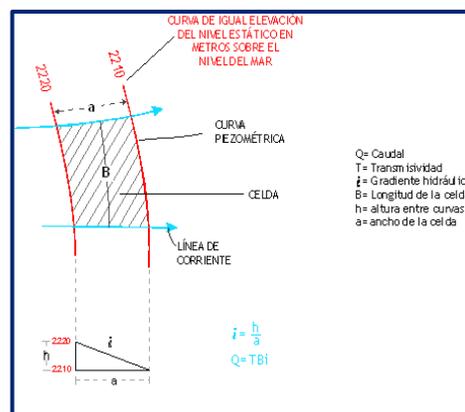
Donde:

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 **13.3 hm³/año**. 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 vecinos 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 (2015)

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	2950	885	10	0.0113	0.0006	0.0200	0.6
E2	4325	785	10	0.0127	0.0005	0.0275	0.9
E3	5115	1280	10	0.0078	0.0005	0.0200	0.6
E4	3640	985	10	0.0102	0.0005	0.0185	0.6
E5	1375	1080	10	0.0093	0.0002	0.0025	0.1
E6	1965	1770	10	0.0056	0.0006	0.0067	0.2
E7	4230	1670	10	0.0060	0.0015	0.0380	1.2
E8	2165	985	10	0.0102	0.0015	0.0330	1.0
E9	2755	785	10	0.0127	0.0015	0.0526	1.7
E10	4525	690	5	0.0072	0.0015	0.0492	1.6
E11	4330	985	5	0.0051	0.0015	0.0330	1.0
E12	5410	1280	10	0.0078	0.0005	0.0211	0.7
E13	3735	2655	10	0.0038	0.0005	0.0070	0.2
E14	3145	1770	10	0.0056	0.0010	0.0178	0.6
E15	4425	1965	10	0.0051	0.0010	0.0225	0.7
E16	3540	885	10	0.0113	0.0005	0.0200	0.6
E17	5115	785	10	0.0127	0.0005	0.0326	1.0
Total entradas							13.3

7.1.3 Recarga incidental (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a 30 m en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 16.7 hm³ anuales, el retorno agrícola es de 1.7 hm³ anuales. **Rr = 1.7 hm³ anuales.**

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 Villanueva.

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 **19.4 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 2015, mostrada en la figura 4.

En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **4.3 hm³ anuales.**

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2015)

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	4165	1250	5	0.0040	0.0012	0.0200	0.6
S2	6390	980	5	0.0051	0.0015	0.0489	1.5
S3	4445	970	5	0.0052	0.0012	0.0275	0.9
S4	3890	695	5	0.0072	0.0010	0.0280	0.9
S5	1945	1665	5	0.0030	0.0020	0.0117	0.4
Tota salidas							4.3

7.2.3 Descarga por flujo base (Dfb)

El caudal base fue obtenido del análisis de datos del gasto medio mensual registrado en la estación hidrométrica Presa Julián Adame Alatorre, como aportaciones

promedio durante el periodo de estiaje en el periodo 2003-2013 a dicha presa, perteneciente al Distrito de Riego 034. El valor obtenido fue 57 lps, que equivalen a **1.8 hm³ anuales**.

7.2.4 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 registrada durante el periodo 2004-2015 (figura 5). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.02, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A:** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)
- h:** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

Como consecuencia de la explotación del recurso, la posición de los niveles piezométricos ha descendido propiciado una variación negativa del almacenamiento. El cambio en el volumen de agua almacenado promedio anual para el intervalo 2004–2015 fue de **-2.9 hm³ anuales** (tabla 4).

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2004-2015)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	S_y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
0 a -2	-1	42.5	0.02	-0.9
-2 a -4	-3.0	14.7	0.02	-0.9
-2 a -5	-3.5	2.9	0.02	-0.2
4 a -6	-5.0	3.8	0.02	-0.4
-5 a -10	-7.5	6.6	0.02	-1.0
-6	-6	22.9	0.02	-2.7
-6 a -8	-7	70.4	0.02	-9.9
-8	-8	80.4	0.02	-12.9
-10	-10	15.8	0.02	-3.2
Área de balance		260.0	TOTAL	-31.9
		Promedio anual		-2.9

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:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + D_{fb} + \Delta V(S) - E_h - R_r \\ R_v &= 19.4 + 4.3 + 1.8 - 2.9 - 13.3 - 1.7 \\ R_v &= 7.6 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 7.6 + 13.3 + 1.7 \\ R &= 22.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego. Para este caso su valor es **22.6 hm³/año**, de los cuales 20.9 hm³ son recarga natural y 1.7 hm³ 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 de este acuífero la descarga natural comprometida es **1.8 hm³ anuales**, que corresponden a la descarga a través del flujo base del Río Villanueva. Las salidas por flujo subterráneo no se consideran comprometidas porque ocurren hacia el cañón de dicho río. Por lo tanto, **DNC = 1.8 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 **20,627,537 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de 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 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 22.6 - 1.8 - 20.627537 \\ \text{DMA} &= 0.172463 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **172,463 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2004. Reactivación de Red de Monitoreo del Acuífero del Valle de Villanueva, Zac. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2007. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Villanueva, estado de Zacatecas.