



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO BENITO JUÁREZ (3210), 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.....	7
3.1	Provincia fisiográfica.....	7
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrografía	9
3.4	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGÍA.....	10
4.1	Estratigrafía.....	11
4.2	Geología estructural	14
4.3	Geología del subsuelo	16
5	HIDROGEOLOGÍA.....	17
5.1	Tipo de acuífero	17
5.2	Parámetros hidráulicos.....	17
5.3	Piezometría	18
5.4	Comportamiento Hidráulico.....	18
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	18
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3	Evolución del nivel estático	20
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	21
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	22
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	23
7.1	Entradas	23
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	24
7.1.3	Recarga incidental (Ri).....	25
7.2	Salidas.....	26
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	26
7.3	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 Benito Juárez, definido con la clave 3210 por la Comisión Nacional del Agua. Se localiza en la porción centro-sur del estado de Zacatecas, entre los paralelos 22°33' y 22° 47' de latitud norte y entre los meridianos 102°34' y 102° 50' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 351 km². Limita al norte con el acuífero Calera, al este con Guadalupe Bañuelos, al sureste con Ojocaliente, al sur y suroeste con el acuífero Villanueva y al oeste con Jerez, todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas (figura 1).

Geopolíticamente, el territorio que comprende el acuífero se localiza en su mayor parte en el municipio de Guadalupe; abarca también porciones menores de Guadalupe, Jerez, Genaro Codina y Villanueva.

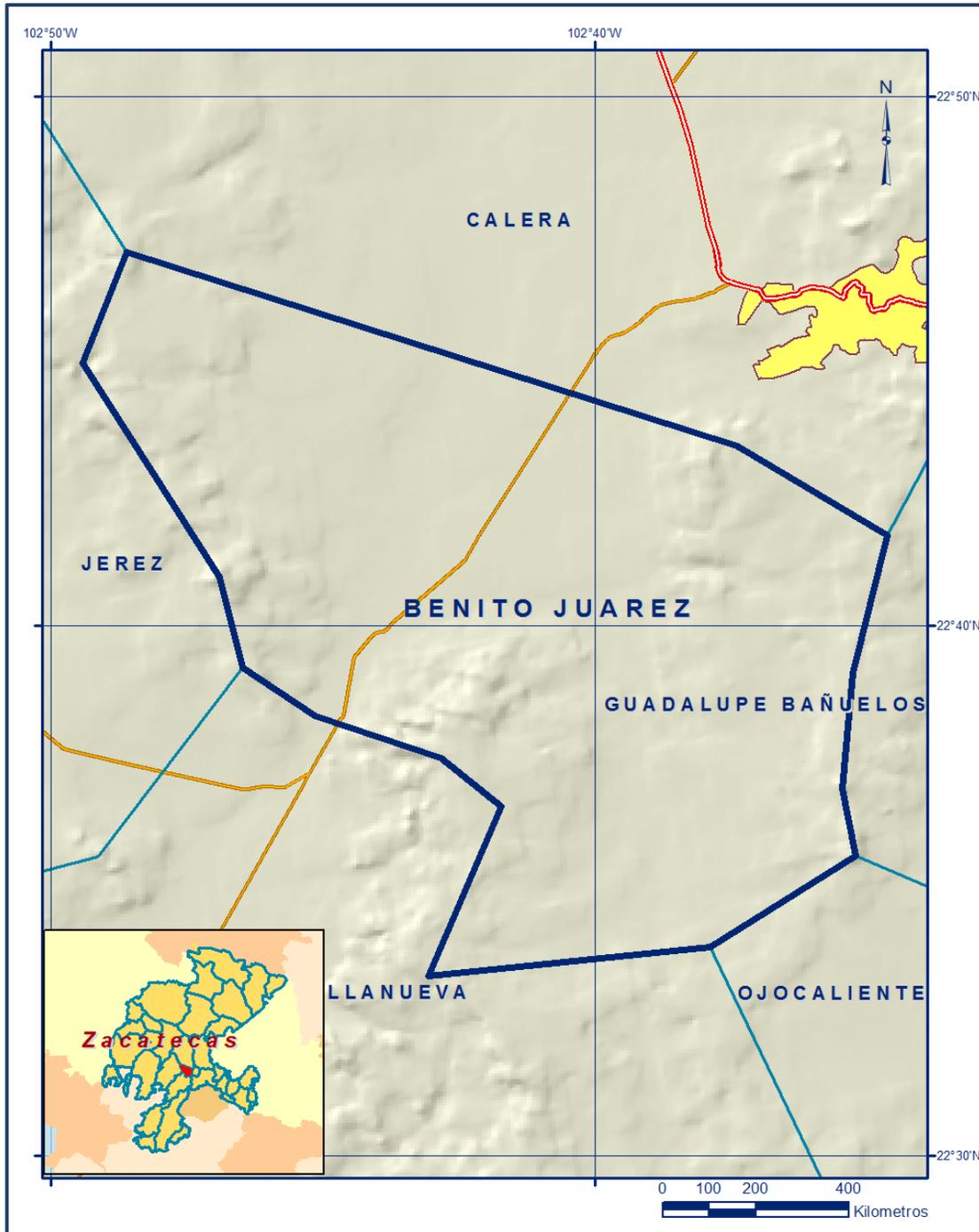


Figura 1. Localización del acuífero

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

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

ACUIFERO 3210 BENITO JUAREZ						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	102	34	37.8	22	41	43.2
2	102	35	15.4	22	39	6.3
3	102	35	27.9	22	36	55.9
4	102	35	12.4	22	35	40.2
5	102	37	53.0	22	33	55.9
6	102	43	3.0	22	33	23.5
7	102	41	43.5	22	36	36.0
8	102	42	49.2	22	37	31.0
9	102	45	7.6	22	38	17.6
10	102	46	27.7	22	39	13.4
11	102	46	53.7	22	40	55.7
12	102	49	24.4	22	44	58.3
13	102	48	36.1	22	47	3.9
14	102	37	23.0	22	43	23.7
1	102	34	37.8	22	41	43.2

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Benito Juárez pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte”, 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 de tres decretos de veda; el primero de ellos rige en casi la totalidad de su 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. El segundo rige en una pequeña área de su extremo oriental y es el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona del estado de Zacatecas, que comprende la cuenca media del río Aguanaval y otros”*.

Publicado en el DOF el 16 de mayo de 1960. Ambos decretos son de tipo III en los que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El tercer decreto rige en la porción suroriental: “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la parte que corresponde al área no vedada de los Municipios de Pánico y Guadalupe del Estado de Zacatecas y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramientos, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en el área que se menciona”, publicado en el DOF el 22 de octubre de 1984.

Esta veda se clasifica como 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. 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 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, que comprendió parte de los municipios de Genaro Codina, Guadalupe y Villanueva, cubriendo en su porción norte un área de 114 km² del acuífero Benito Juárez.

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.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA LA CIUDAD DE ZACATECAS. Realizado en 1986 por Ingeniería de Evaluación y Prospección, S.A., para la extinta Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). El objetivo del estudio fue definir áreas favorables para la perforación de pozos para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Zacatecas, analiza el comportamiento geohidrológico regional de los acuíferos cercanos a la Capital, incluyendo Benito Juárez.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA DE BENITO JUÁREZ PARA SUMINISTRO DE AGUA A LA CIUDAD DE ZACATECAS, ZAC. Realizado por Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. de C.V. para Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos (SARH), en el año 1988. Los trabajos consistieron en la actualización del inventario de aprovechamientos, mediciones piezométricas, nivelación de brocales, hidrometría de extracciones, pruebas de bombeo, muestreo y análisis fisicoquímicos del agua y realización de sondeos eléctricos verticales. Además se planteó el balance de aguas subterráneas, determinando una recarga total media anual de 27.4 hm³/año, mientras que las extracciones eran del orden de 14.0 hm³ anuales.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO EN LA ZONA DE ZACATECAS, ZAC. Realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en 1996, para la Comisión Nacional del Agua. El estudio comprendió los acuíferos Calera, Chupaderos, Benito Juárez y Guadalupe-Bañuelos. Los principales objetivos de estudio fueron definir las características geohidrológicas e hidrogeoquímicas de los acuíferos con base en el análisis hidrogeoquímico de muestras de agua e información geológica existente. Define la dirección preferencial del flujo subterráneo, las zonas de recarga, la comunicación hidráulica con otros valles, las familias de aguas presentes en la zona y la calidad del agua subterránea. Identifica el tipo de materiales en los cuales se encuentra alojado el acuífero y las zonas que registraron los mayores abatimientos.

ESTUDIO PARA LA REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE BENITO JUÁREZ, ZAC. Realizado 1997 por Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua. 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.

ESTUDIO PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DONDE ESTÁN UBICADAS LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO PARA AGUA POTABLE DE LAS CIUDADES DE ZACATECAS, GUADALUPE Y POBLACIONES VECINAS. Reporte Interno realizado en 1998 por la Dirección Local Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua. Consistió en determinar el grado de contaminación y deterioro de la calidad del agua en los acuíferos Guadalupe-Bañuelos, Chupaderos, Benito Juárez y Calera.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO BENITO JUÁREZ, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2015.

Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

Con la piezometría obtenida por la Dirección Local Zacatecas fue posible plantear un balance de aguas subterráneas más reciente para actualizar la disponibilidad. Las 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_s1kw.

Es 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 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: Malpaso, Zacatecas, San Gerónimo y Felipe Ángeles.

Con los registros obtenidos para el periodo 1980-2014, y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **425.4 mm, 16.2 °C y 1,890.7 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, cuenca “Río Juchipila”, subcuenca “Río Juchipila-Malpaso”, 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. La subcuenca topográfica es abierta y tiene continuidad hacia al sur en el acuífero Villanueva; sin embargo, la Presa Malpaso constituye una barrera artificial. Es de forma irregular, más o menos semejante a un triángulo, ligeramente alargado, con orientación NW-SE.

En el área no existen corrientes superficiales importantes, únicamente pequeños arroyos de régimen intermitente y de carácter torrencial que sólo presentan escurrimientos durante el período de lluvias; entre ellas destacan los arroyos Rancho Nuevo, Los Negros, de Abajo, Las Boquillas, Dos Hermanos, El Muerto, Jacobo, Tortugas, Machines, Calerilla y Las Chilitas, todos ellos son afluentes del Río Juchipila, el cual tiene su origen en esta cuenca.

Todos los escurrimientos drenan a la Presa Malpaso, ubicada al suroeste del acuífero, en el límite con el acuífero Villanueva.

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 Malpaso, Chilitas, El Mirador y Calerilla, que en total suman una capacidad instalada de 6.4 hm³; además de una gran cantidad de pequeños bordos para abrevadero.

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 topofomas que se observan son: bajada aluvial con lomeríos, que se encuentra delimitada al norte por llanuras aluviales; los extremos sur, este y oeste están representados por sierras bajas en tanto que al sureste los rasgos corresponden a lomeríos con llanuras y mesetas escalonadas.

El principal sistema montañoso lo constituye la Sierra de Zacatecas, ubicada al oriente de la zona, con elevaciones máximas del orden de 2,700 msnm, mientras que las elevaciones mínimas, de 2010 msnm, se presentan en las bajadas aluviales, ubicadas en la porción suroccidental de la zona, en el vaso de la presa Malpaso. 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 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).

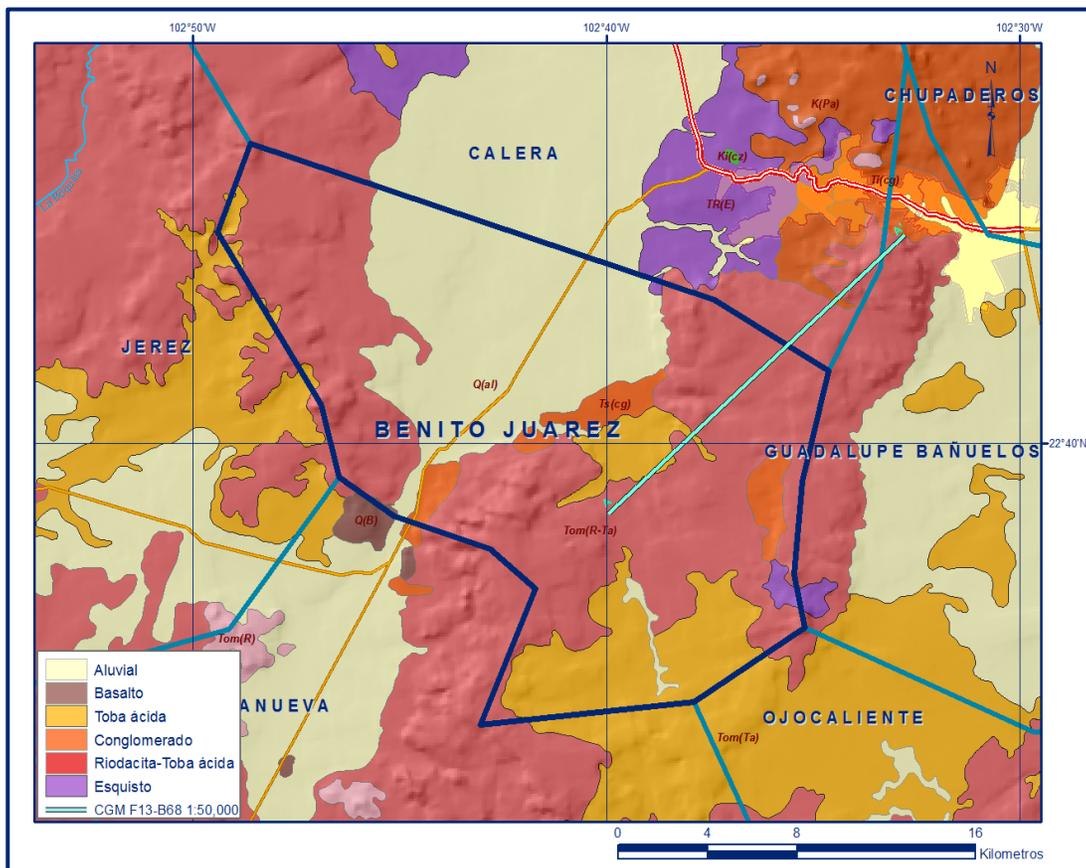


Figura 2. Geología general del acuífero

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.

TRIÁSICO 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. Aflora ampliamente al este de la comunidad Cieneguitas.

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

Conglomerado Rojo Zacatecas

Ponce y Clark (1988), asignan con este nombre a un depósito fluvial conglomerático de matriz rojiza, de origen poligenético. Los principales afloramientos se presentan al sureste de la sierra de Zacatecas, en las inmediaciones del poblado La Zacatecana y la laguna El Pedernalillo y entre las ciudades de Zacatecas y Guadalupe. Se encuentra constituido principalmente por guijas y cantos de esquistos, filitas, andesitas y basaltos, cantidades subordinadas de rocas riolíticas y fragmentos de rocas graníticas, areniscas, calizas y pedernal, con cementante arcillo-calcáreo que en conjunto presentan un color púrpura a naranja, debido a su contenido de hierro.

Su contacto inferior es discordante con la secuencia vulcanosedimentaria del Jurásico Superior-Cretácico Inferior. La edad que se le asigna es Paleoceno-Eoceno, basado principalmente en las relaciones estratigráficas y en edades isotópicas.

Riolitas-tobas riolíticas

Unidad volcánica conformada por riolitas y en menor proporción tobas riolíticas, 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.

En la zona está representada por brechas volcánicas de composición andesítica-riolítica, toba riolítica arenosa, ignimbritas, latitas y riolitas. La brecha aflora en la periferia de los Cerros Los Alamitos y La Virgen y consta de interestratificaciones de lapilli y depósitos de lahar, de color rojo, cuyo contacto es concordante y se interdigita con el Conglomerado Rojo.

Su contacto superior es discordante con la ignimbrita y la toba riolítica del Cerro La Virgen. La edad de esta brecha es Eoceno Inferior, determinada con base en el estudio isotópico realizado por Damon, (en Ponce, 1985) que le asignó una edad de 46.8 Ma. Las rocas de esta unidad riolítica-tobas riolíticas se correlacionan con el Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental.

Ignimbritas-Tobas riolíticas

Secuencia que se caracteriza por la predominancia de las ignimbritas sobre las tobas riolíticas, con esporádicas intercalaciones de brechas riolíticas y basaltos; que presentan diferentes grados de alteración, fracturamiento y pseudoestratificación. La edad de la unidad es Oligoceno Inferior determinada con base en el estudio isotópico que reporta Damon (en Ponce, 1985), de 36.8 Ma existiendo un hiatus de la actividad volcánica de 10 Ma, con respecto a la brecha volcánica a la que sobreyace.

A estas rocas Ponce (1985) las denominó como Formación La Virgen. Al oeste, este y sur de la zona, formando bajos topográficos o en las laderas de pequeñas sierras y mesetas, se presentan tobas riolíticas de color blanco a café con tonalidades rojizas debido a la presencia de hematita, que sobreyacen discordantemente a las unidades ignimbrita-toba riolítica, toba riolítica arenosa y a la Formación Chilitos. Subyace a la ignimbrita del Oligoceno y a la unidad arenisca-conglomerado del Neógeno.

Derrames riolíticos

Se presentan al sureste de la región coronando la secuencia volcánica ácida y en forma de casquetes; su coloración varía de rosa a café claro, masivos y ligeramente bandeados, que sobreyacen a la unidad de ignimbritas. Su edad es Oligoceno y es correlacionable con la edad de cuerpos riolíticos hipabisales, domos y “plugs”, que se observan al noroeste del Cerro La Virgen. Al Norte de Minillas, en las márgenes de la falla Palmira afloran estas rocas, como se observa también en el Cerro Canchola y la Mesa El Tapexte.

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 consolida 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.

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.

En las rocas mesozoicas se presenta deformación dúctil, con desarrollo de una superficie de anisotropía, asociada a plegamientos isoclinales y cabalgaduras con vergencia predominante al noroeste. A una escala mayor se puede observar un complejo sistema de apilamiento de cabalgaduras, con deformación interna dúctil en los bloques mecánicos rodeados de cabalgaduras. Se considera que esta deformación fue producida durante la Orogenia Laramide.

Un evento transgresivo posterior originó fallas laterales con componente normal, el sentido de la componente es difícil de establecer ya que las fallas han sido rejugadas; sin embargo, se puede mencionar de manera preliminar una componente izquierda, que es necesario verificar en trabajos especializados.

Asociados a estas estructuras se tienen domos, “plugs”, diques y las vetas características de Zacatecas.

Se sobrepone a las estructuras anteriores un sistema distensivo que originó fosas y pilares limitados por fallas normales que presentan un rumbo predominante NE.

Al noroeste de la zona se localiza la porción central y sur de una estructura semicircular de diámetro aproximado de 11 km, que Ponce (1985) ha postulado como una caldera resurgente, que está limitada al norte por la Falla Cantera y al sur por las fallas San José de Tapias, que tienen un rumbo preferencial NW.

La Falla Cantera divide en dos a la Sierra de Zacatecas, marcando el límite de dos bloques con características metalogénicas distintas; el norte y el sur.

Debido a que ésta se reactivó en una etapa posterior a la depositación de la mineralización, originó que la porción sur se hundiera, conservando la parte con mineralización de sulfuros y óxidos con mineralización de Au y Ag, mientras que la del sector norte se erosionó (Albinson, 1995) (Carta Geológico-Minera Guadalupe F13-B68, escala 1:50,000. SGM, 1999).

Las sierras de Zacatecas y Fresnillo, en su conjunto, son la expresión fisiográfica de pilares tectónicos; y los valles adyacentes corresponden a fosas tectónicas originadas por una fase distensiva ocurrida a finales del Terciario y principios del Cuaternario, cuyas fallas normales presentan una orientación general norte-sur, que posteriormente fueron rellenadas por depósitos aluviales intercalados con material tobáceo.

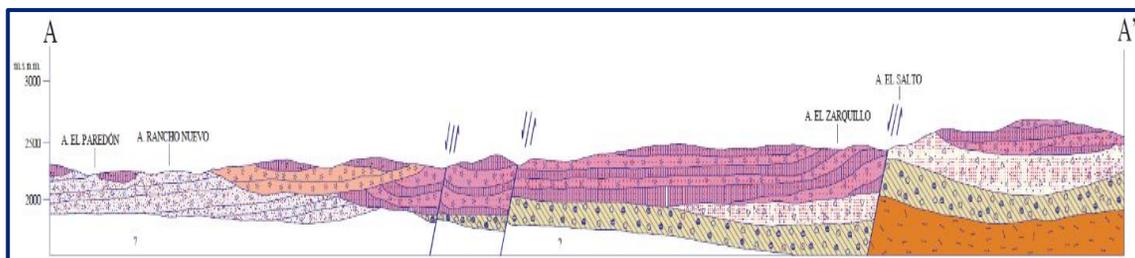
El acuífero Benito Juárez está alojado en la porción sur de un graben que tiene dimensiones regionales, y que comprende también el acuífero Calera.

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, metasedimentarias y metamórficas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B68, Guadalupe. Esc. 1:50,000 (SGM, 1999)

Figura 3. Sección Geológica Esquemática

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.

Está delimitado al este y oeste por pilares tectónicos constituidos principalmente por rocas de las formaciones Zacatecas y Chilitos, del Triásico y Jurásico respectivamente; y por rocas metamórficas de la Formación Zacatecas que constituyen su frontera norte, al sur está delimitado por las rocas volcánicas ácidas del Terciario.

5.2 Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas que constituyen el acuífero, se utilizó la información de 20 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 **1.0 a $3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ; si consideramos un espesor saturado promedio de 200 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **5.0×10^{-6} a $1.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (0.4 a 1.3 m/d).**

Los valores más bajos se registran en la porción nororiental, incrementándose, de manera general, hacia la región sur aunque en la porción central del valle la presencia de sedimentos arcillosos reduce considerablemente los valores de los parámetros hidráulicos.

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 **0.05**

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información piezométrica recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años.

Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2011-2015, 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 2015 mostró que los valores variaban, de manera general, de 50 a 110 m.

Los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro del valle hacia las estribaciones de las sierras que lo delimitan y en dirección SW-NE, conforme se asciende topográficamente.

Los niveles estáticos someros, de 50 a 60 m, se presentan en la porción central y sur del valle, entre la comunidad González Ortega y el norte de Benito Juárez; en tanto que los más profundos, de 100 a 110 m.

Se registran en la región nororiental del valle, hacia el límite con el acuífero Calera, entre los poblados Francisco I. Madero y Cieneguilla, donde se localiza la principal zona de extracción para uso agrícola (figura 4).

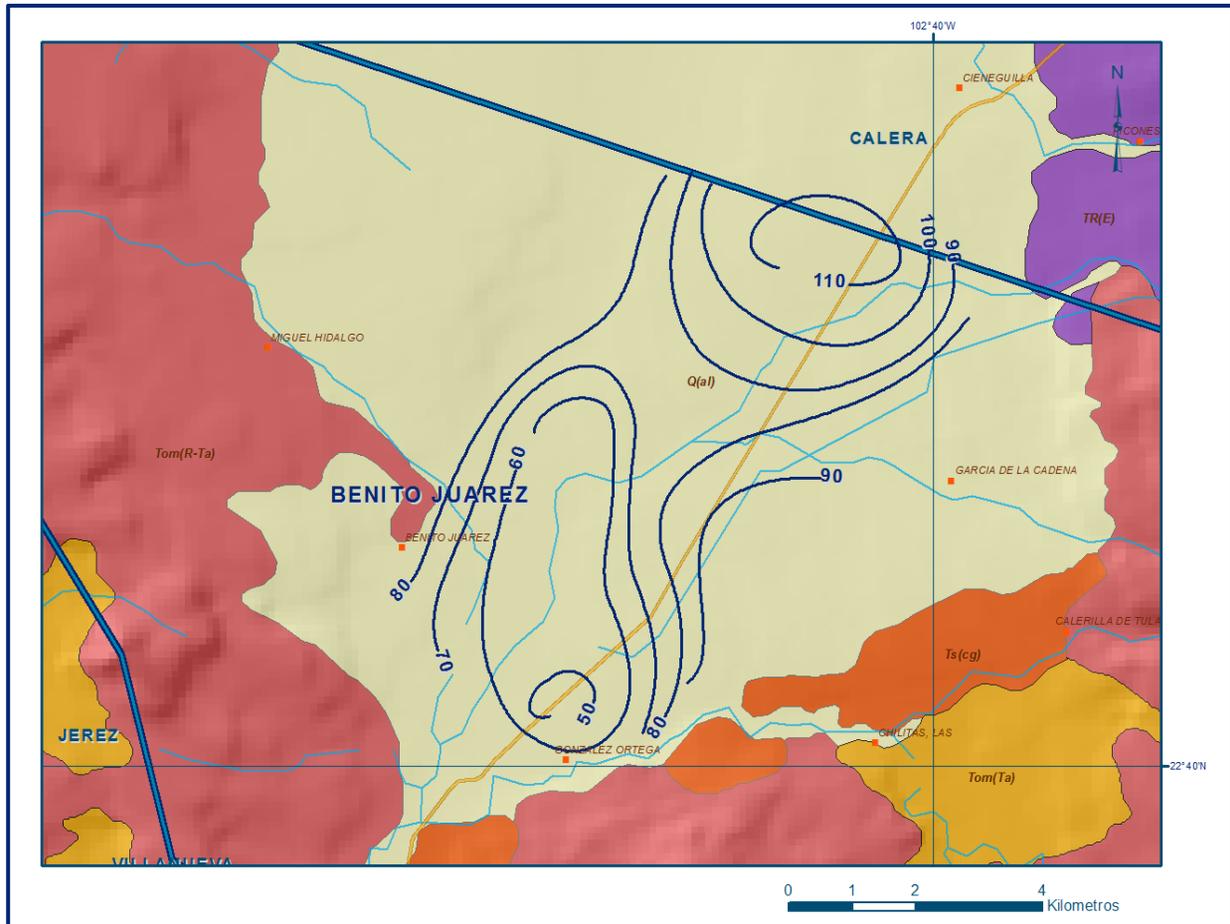


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2015 registró valores que variaron de 2140 a 2130 msnm. Las menores elevaciones de 2130 a 2132 msnm se registran en toda la porción central y nororiental del acuífero, definiendo un cono de abatimiento al que confluye el flujo de manera concéntrica y radial, tanto desde el centro del valle como desde el límite con el acuífero Calera. Debido a que la superficie de la zona de explotación y del acuífero es pequeña, no existen variaciones importantes en las cargas hidráulicas.

El valor de elevación más alto es de 2140 msnm y se presenta bordeando toda la zona agrícola, desde González Ortega en el sur hasta Francisco I. Madero en la región nororiental. La dirección preferencial del flujo subterráneo es SW-NE, paralela a la dirección del escurrimiento superficial, con alimentaciones provenientes de los flancos este, oeste y sur del valle, que ha sido alterada por la concentración del bombeo para uso agrícola, principalmente en la porción nororiental, en la zona aledaña a Cieneguilla.

Esto también ocasionó que se interceptara la salida que en condición natural existía hacia el acuífero Villanueva, induciendo el flujo hacia el centro del valle (figura 5).

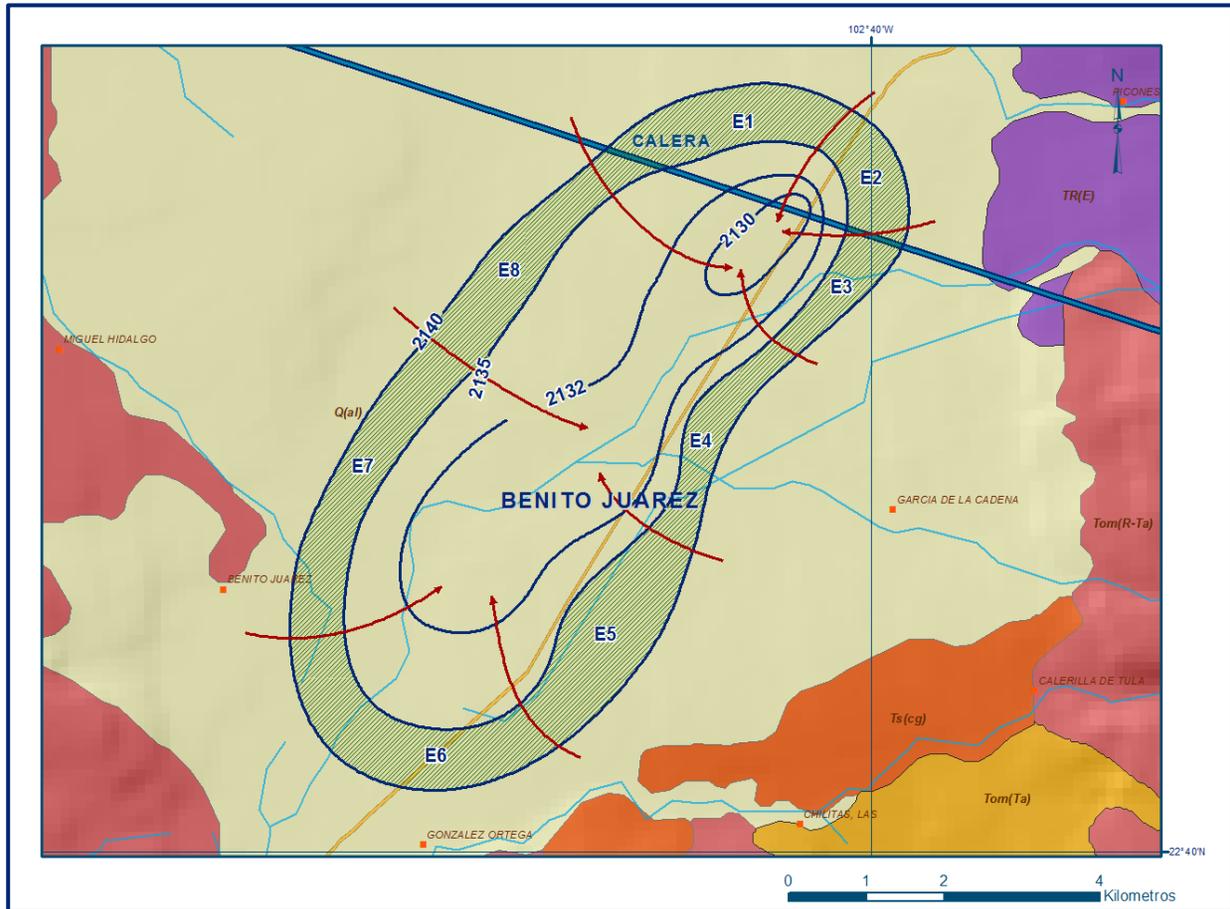


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2011-2015 registró valores de abatimiento en la mayor parte de la superficie del acuífero, que variaron de 3 a 12 m, que representan un promedio anual de 0.7 a 3.0 m.

Los mayores abatimientos se registran en la porción central del valle, a lo largo de la zona agrícola, donde se concentra la extracción por bombeo. En estas zonas el abatimiento medio anual es de 2.5 m. Hacia los extremos de mayor elevación topográfica los abatimientos disminuyen gradualmente hasta desaparecer (figura 6).

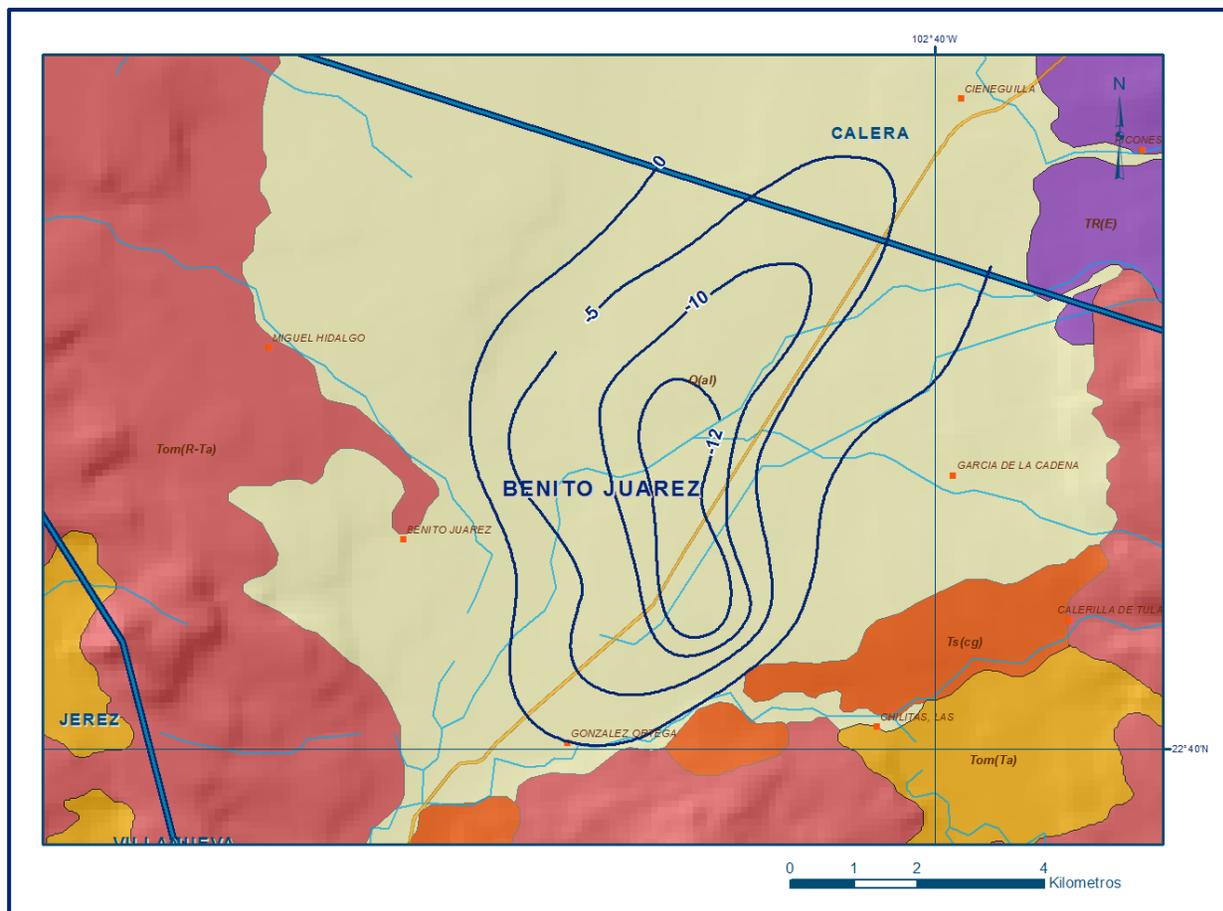


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2011-2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio realizados en 1996, se tomaron únicamente 5 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), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) variaban de 300 a 388 mg/l, que no superaban 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.

Por su reducida extensión, en general toda la zona presenta muy poca variación en la concentración de STD, pero si se identifica el incremento en sentido SW-NE, en la dirección preferencial del flujo subterráneo.

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 303 a 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las temperaturas registradas variaron de 25.1 a 27.7 °C y el pH de 7.1 a 7.4.

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 predominaba es la cálcica bicarbonatada, 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), de las muestras analizadas, 3 se clasifican como C_2-S_1 , que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable; las 2 muestras restantes pertenecen a la clasificación C_2-S_2 , que corresponde a salinidad media con contenido medio de sodio intercambiable; ambas clasificaciones se consideran aptas 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 más reciente llevado a cabo por la Comisión Nacional del Agua, en 2009, se registraron un total de 114 obras que aprovechan el agua subterránea, 68 pozos, 45 norias y 1 tajo; de las cuales 99 están activas y 15 se consideran inactivas. De las obras activas, 55 se destinan al uso agrícola, 13 para uso público-urbano y 31 más para usos doméstico y pecuario.

El volumen de extracción conjunto calculado asciende a **23.3 hm³ anuales**, de los cuales 14.1 hm³ (60.5 %) se destinan al uso agrícola, 9.1 hm³ (39.1%) para abastecimiento de agua potable a la ciudad de Zacatecas y comunidades de la región y 0.1 hm³ (0.4%) para usos pecuario y doméstico.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2011-2015, en una superficie de **45 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).

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 (ΔVS), así como las

entradas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

$$R_v + E_h + R_i - B = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- R_v:** Recarga vertical
- E_h:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- R_i:** Recarga Incidental
- B:** Bombeo
- ΔV(S):** Cambio de almacenamiento

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

$$R_v = B \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \quad (2)$$

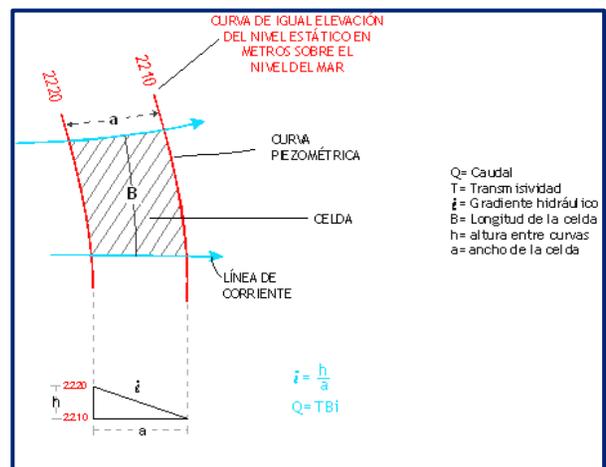
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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 2015 (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 **7.6 hm³/año**.

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	2855	815	5	0.0061	0.0012	0.0210	0.7
E2	1795	610	5	0.0082	0.0012	0.0177	0.6
E3	2205	895	5	0.0056	0.0010	0.0123	0.4
E4	2775	530	5	0.0094	0.0015	0.0393	1.2
E5	2570	1020	5	0.0049	0.0020	0.0252	0.8
E6	3835	895	5	0.0056	0.0030	0.0643	2.0
E7	4080	1060	5	0.0047	0.0020	0.0385	1.2
E8	2450	815	5	0.0061	0.0015	0.0225	0.7
Total entradas							7.6

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.

7.1.3 Recarga incidental (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, 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 5% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a 50 m en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. La misma consideración se hizo para el volumen de agua utilizado para abastecimiento de agua potable a las ciudades de Zacatecas y Guadalupe. De esta manera si el volumen para uso agrícola y público-urbano suma en total 23.2 hm³ anuales, 14.1 y 9.1 hm³ anuales, respectivamente; la recarga incidental el retorno agrícola es de 1.2 hm³ anuales. Por lo tanto **Ri = 1.2 hm³ anuales**.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre únicamente de manera artificial por bombeo (B).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **23.3 hm³ anuales**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2011-2015 (figura 6).

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.05, 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 2011–2015 fue de **-5.2 hm³ anuales** (tabla 3).

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2011-2015)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	S_y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
0 a -5	-2.5	3.7	0.05	-0.5
-5 a -10	-7.5	17.9	0.05	-6.7
-10 a -12	-11.0	8.1	0.05	-4.5
12.0	-12.0	15.3	0.05	-9.2
Área de balance		45.0	TOTAL	-20.8
		Promedio anual		-5.2

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:

$$\begin{aligned}R_v &= B + \Delta V(S) - E_h - R_i \\R_v &= 23.3 - 5.2 - 7.6 - 1.2 \\R_v &= 9.3\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}R &= R_v + E_h + R_i \\R &= 9.3 + 7.6 + 1.2 \\R &= 18.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

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:

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

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 **18.1 hm³/año**, de los cuales 16.9 hm³ son recarga natural y 1.2 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 no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto, **DNC = 0.0 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 **21,486,465 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 18.1 - 0.0 - 21.486465 \\ \text{DMA} &= -3.386465 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **3,386,465 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 1996. Estudio Geohidrológico e Hidrogeoquímico en la Zona de Zacatecas, Zacatecas. Realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Benito Juárez, estado de Zacatecas.