

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO CAMACHO (3221), ESTADO DE ZACATECAS

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1.	GENERALIDADES	2
Ante	cedentes	2
1.1.	Localización	2
1.2.	Situación administrativa del acuífero	
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3.	FISIOGRAFÍA	6
3.1.	Provincia fisiográfica	6
3.2.	Clima	7
3.3.	Hidrografía	
3.4.	Geomorfología	
4.	GEOLOGÍA	
4.1.	Estratigrafía	
4.2.	Geología estructural	
4.3.	Geología del subsuelo	
5.	HIDROGEOLOGÍA	_
5.1.	Tipo de acuífero	
5.2.	Parámetros hidráulicos	
5.3.	Piezometría	
5.4.	Comportamiento hidráulico	
5.4		
5.4		
5.4		
5.5.	3 - 1 3	
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	
7.1.	Entradas	
7.1.	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
7.1.		
7.2.	Salidas	
	.1. Bombeo (B)	
7.3.	Cambio de almacenamiento ΔV(S)	
8.	DISPONIBILIDAD	
8.1.	Recarga total media anual (R)	
8.2.	Descarga natural comprometida (DNC)	
8.3.	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	
8.4. 9 .	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	
-J.	DIDI KAIRACIA	

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 Camacho, definido con la clave 3221 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de Zacatecas, entre los paralelos 24°03'28" y 24°5255' de latitud norte y entre los meridianos 101°56'54" y 102°42'18" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 3,551 km².

Limita al norte y este con el acuífero Cedros, al sureste con El Cardito, al sur con Guadalupe de Las Corrientes; al suroeste con El Palmar, todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas; al noroeste y oeste su límite es con el acuífero Oriente Aguanaval, perteneciente al estado de Durango (figura 1).

Geopolíticamente, el área que cubre el acuífero se localiza casi en su totalidad en el municipio de Mazapil; la porción suroccidental pertenece al municipio General Francisco R. Murguía.

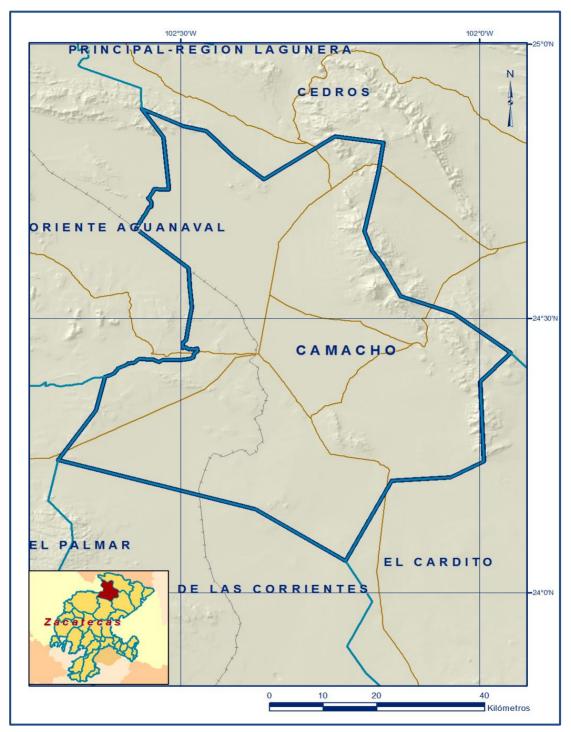


Figura 1. Localización del acuífero

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 3221 CAMACHO

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			ODSEDVA SIGNIES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	OBSERVACIONES
1	102	29	40.2	24	51	1.5	
2	102	27	22.3	24	50	27.0	
3	102	21	37.5	24	45	13.2	
4	102	14	30.0	24	49	53.2	
5	102	9	40.3	24	49	13.2	
6	102	10	7.9	24	46	4.3	
7	102	10	30.5	24	44	21.3	
8	102	11	33.4	24	39	32.6	
9	102	10	50.7	24	37	25.7	
10	102	9	51.4	24	36	2.9	
11	102	7	54.1	24	32	23.6	
12	102	2	39.7	24	30	34.7	
13	101	56	53.5	24	26	15.4	
14	101	59	55.2	24	23	5.8	
15	101	59	34.4	24	14	20.5	
16	102	2	55.0	24	12	37.5	
17	102	8	49.2	24	12	16.0	
18	102	13	27.0	24	3	28.0	
19	102	22	29.6	24	9	6.8	
20	102	42	17.7	24	14	32.1	
21	102	38	29.6	24	19	56.3	
22	102	37	35.6	24	23	36.6	DEL 22 AL 23 POR EL LIMITE ESTATAL
23	102	33	54.5	24	52	55.2	
1	102	29	40.2	24	51	1.5	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Camacho pertenece al Organismo de Cuenca VII "Cuencas Centrales del Norte", al Consejo de Cuenca "Altiplano", instalado el 23 de noviembre de 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas. La totalidad de su territorio se encuentra 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. Esta veda es tipo III, en la 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 3. El uso principal es el agrícola. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo estudios geohidrológicos de evaluación, algunos de cobertura regional. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA Y EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN LAS ZONAS MARGINADAS DEL ESTADO DE ZACATECAS, realizado en 1990 por EXYCO S.A., para la Comisión Nacional del Agua. Entre sus actividades más importantes destacaron los sondeos geofísicos, piezometría, censo de aprovechamientos y toma de muestra de agua subterránea para análisis fisicoquímicos. Se registró la existencia de 107 obras que aprovechaban el agua subterránea, 40 activas y 67 inactivas; se midieron niveles freáticos en algunas zonas y se identificaron zonas de descarga tanto por flujo vertical como horizontal. En cuanto a la salinidad, la concentración promedio en el agua subterránea fue de 2000 ppm de STD. De acuerdo a la interpretación hidrogeoquímica, de los resultados de los análisis físico-químicos, se concluyó que los pozos someros y norias extraen agua de reciente infiltración. Se identificaron y cartografiaron 19 unidades litológicas; que se agruparon en 7 unidades hidrogeológicas.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS VILLA GARCÍA, EL SALVADOR, GUADALUPE GARZARÓN, CAMACHO Y EL CARDITO, ESTADO DE ZACATECAS Y EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS GARCÍA DE LA CADENA, PINO SUÁREZ Y CORRALES, ZAC., elaborado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C., para la Comisión Nacional del Agua, en 2007. El objetivo del estudio fue actualizar el conocimiento del flujo subterráneo, profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea, mediante la obtención de información procedente de las redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua de acuíferos del estado de Zacatecas, entre los cuales se incluye Camacho, para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, determinar la recarga media anual del agua subterránea y las componentes de balance de agua subterránea.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DEL ACUÍFERO CAMACHO, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2017. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático y la hidrometría para cuantificar el volumen de extracción.

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 en la transición de dos provincias fisiográficas. La región norte y este del acuífero pertenece a la provincia fisiográfica V "Sierra Madre Oriental", que se caracteriza por un conjunto de sierras con orientación NW-SE y E-W, que presentan una flexión al N-S, constituidas por rocas sedimentarias, principalmente calcáreas, producto del levantamiento y deformación de rocas principalmente mesozoicas; la superficie restante se localiza en la provincia fisiográfica IX "Mesa del Centro", que se caracteriza por presentar amplias llanuras, con pequeñas sierras aisladas y lomeríos.

Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), la zona que corresponde al área del acuífero comprende dos subprovincias fisiográficas: Sierras Transversales, que pertenece a la provincia Sierra Madre Oriental, y Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande, perteneciente a la provincia Mesa del Centro.

La Sierra Madre Oriental representa una franja alargada orientada en sentido noroeste-sureste, desde Chihuahua-Coahuila hasta el Istmo de Tehuantepec, que presenta una flexión con orientación este-oeste entre Torreón y Monterrey; está integrada principalmente por sedimentos calcáreos del Cretácico y Jurásico que se encuentran plegados, formando valles estructurales (Manuel Álvarez Jr.) en los sinclinales y serranías en los anticlinales cuando las formaciones son resistentes a la erosión, pero cuando estos últimos dejan al descubierto un núcleo constituido por rocas menos resistentes, entonces se forman valles en su centro. Debido a la intensidad de los plegamientos, la topografía es sumamente accidentada, ofreciendo perfiles típicamente aserrados. La subprovincia Sierras Transversales está integrada por sierras perpendiculares a los cuerpos centrales de la Sierra Madre Oriental, separadas unas de otras por llanuras más o menos amplias. En la parte central varios pequeños pliegues paralelos descienden desde la subprovincia de los Pliegues Saltillo-Parras, hasta el distrito minero de Concepción del Oro, Zacatecas. Su característica más notable es la complejidad litológica que se presenta, manifestada por afloramientos de rocas tan diversas como sedimentarias, principalmente calcáreas, metamórficas e ígneas intrusivas y extrusivas.

La Mesa Central es una gran cuenca rodeada por montañas más elevadas, más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras, tiene áreas poco elevadas, disectadas por las rocas volcánicas. Se trata de una planicie elevada que se localiza en la región central de México, más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2,000 msnm y las elevaciones en su interior son moderadas, con desniveles inferiores a los 600 m. La subprovincia Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande se caracteriza por ser la subprovincia más accidentada, sus sierras, mesetas y lomeríos rodean un llano rocoso central, situado a unos 2,000 msnm, que está orientado burdamente de norte

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en el área que comprende al acuífero domina el clima seco tipo B en 4 variantes: en la mayor parte de su superficie el clima es BS₀hw árido semicálido, en la porción noroccidental que limita con el estado de Durango, se presenta clima BWhw muy árido, semicálido; ambos con temperatura entre 18 y 22°C, temperatura del mes más frio menor de18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. En las zonas topográficamente más altas ubicadas al noreste y este, el clima es BS1kw semicálido templado y BSokw árido templado; con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frio entre -3 y 18°C, temperatura del mes más cálido menor de 22°C. En todos los casos el régimen es de lluvias en verano, con porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 10 estaciones con influencia en el área del acuífero: Camacho, Caopas, Cedros, Concepción de la Norma, Ejido San Rafael, Gruñidora, Nuevo Mercurio, Nuevo Tampico, Purísima de Sifuentes y Rancho San Francisco.Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1963-2018 y el más corto 1995-2018, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **322.6 mm y 17.8°C**, respectivamente. En lo que respecta a la evaporación potencial, solo cinco estaciones tienen información, con estos registros se determinó un valor de evaporación media anual de **1795.9 mm**.

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 abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. Se presenta heladas en un rango de 20 a 40 días por año y granizadas de 0 a 2 días anuales, en la mayor parte del área del acuífero se presenta condición de canícula.

3.3. Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 37 "El Salado", cuenca "Camacho-Gruñidora". Está comprendida entre los meridianos 99°29' y 102°57' de longitud oeste y los paralelos 21°47' y 25°23' de latitud norte. Su área es de 94,243 km²; limita al norte con la Región Hidrológica 24c, al noreste con la Región Hidrológica 25, al este y sureste con la Región Hidrológica 26, al suroeste con la Región Hidrológica 12 y al oeste y noroeste con la Región Hidrológica 36.

Debido a que la lámina media anual de precipitación es baja, los arroyos son escasos y de tipo intermitente, cuyos escurrimientos desaparecen hacia el centro de los valles en los que el material aluvial alcanza los máximos espesores. Es una de las vertientes interiores más importantes del país; se localiza en la altiplanicie septentrional y la mayor parte de su territorio se sitúa a la altura del Trópico de Cáncer, que lo atraviesa. La región se caracteriza por tener una serie de llanuras desérticas, en general con escurrimiento superficial de muy corta longitud, ya que se infiltra en las rocas calizas que conforman las sierras y en los piedemonte. El tipo de drenaje es dominantemente de tipo enrejado en las zonas que presentan plegamientos, que se transforma a subparalelo y subdendrítico conforme se desciende por el pie de monte y se llega a la llanura. En el bolsón los escurrimientos desaparecen por evaporación o se infiltran lentamente, originando la presencia de suelos salinos.

Localmente, en el área de la cuenca donde se ubica el acuífero, existen algunas corrientes como son los arroyos El Mimbrito, Tanquecillos, Las Lajas, El Peregrino, El Guajilloy Las Playas, los cuales se originan en las sierras y desaparecen al descender hacia la llanura o piso de bolsón. Existe escasa infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua superficial, está representada por presas de reducida capacidad, pero de gran importancia para la zona, destacando las presas El Mapache, El Nuevo Mapache, Tanque de Abajo, Tanque de Arriba, Opal, Tanque San Marcos y El Ejido II; que suman una capacidad de almacenamiento de 2.5 hm³.

3.4. Geomorfología

El paisaje del relieve dentro del área se caracteriza por la presencia predominante de los siguientes sistemas de topoformas: sierrascomplejas con lomeríos, que se presentan hacia las porciones norte, este y sureste del acuífero; bajadas y bajadas con lomeríos, que se extienden bordeando las sierras, en el norte este, sureste y suroeste; en la región centro y noroeste se presenta un piso de bolsón o llanura aluvial de piso rocoso; al sur predominan los lomeríos muy suaves o aislados con bajadas y en la porción suroeste del acuífero los rasgos son de llanuras desérticas de piso rocoso o cementado.

El área del acuífero se caracteriza por la presencia de un grupo de sierras alargadas, orientadas en sentido NW-SE. La intensa erosión ha contribuido en el modelado del relieve caracterizado por cimas redondeadas con pendientes suaves, dando origen en la porción norte a las sierras Las Iglesias y El Cajón, con elevaciones de 1,950 y 2,290 msnm, respectivamente; la sierra El Solitario de Teyra se ubica en la porción noreste, su elevación varía de 2,630 a 2,790 msnm, la sierra El Borrado delimita el acuífero en la porción sureste y oriente, con elevaciones del orden de 2,320 msnm. En las partes bajas se han acumulado depósitos de piedemonte, así como abanicos y extensas llanuras aluviales que presentan una elevación media de 1,700 msnm. La región se encuentra surcada por arroyos intermitentes que forman un sistema de drenaje de tipo enrejado y subdendrítico. Los fenómenos cársticos se presentan de manera aislada y se manifiestan con la presencia de algunas cavernas de disolución.

4. GEOLOGÍA

La geología general que aflora en la zona que comprende el acuífero está constituida por rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas intrusivas y volcánicas distribuidas en los terrenos tectonoestratigráficos Sierra Madre al oriente y Parral al poniente. En terreno Parral está distribuido en la Sierra de Yerbaniz, San Marcos, La Roca, Carbonera y Francisco Mendoza; su estratigrafía está constituida por una secuencia turbidítica calcáreo-arenosa con niveles de lutitas, tobas, módulos y bandas de pedernal negreo de edad neocomiana que posiblemente alcance el Turoniano. Está densamente deformada por corrimientos tectónicos y apilamientos de cabalgaduras. Se puede interpretar la existencia de cambio de facies del Terreno Sierra Madre ya que afloran capas masivas de brechas calcáreas de facies de talud, de posible edad Albiano-Cenomaniano. El Terreno Sierra Madre cubre la mayor parte de la zona oriental. La base de la columna está constituida por filitas y meta-areniscas con novaculitas de la Formación Taray, de posible edad Trásico Inferior-Medio, que afloran en la Sierra del Solitario de Teyra. La cubren en discordancia derrames de tobas andesíticas, dacitas con horizontes de limolitas y areniscas con metamorfismo de facies de esquistos verdes, de la Formación Rodeo-Nazas del Triásico Medio-Jurásico Inferior. También muestra metamorfismo dinámico progresivo desde cataclasitas hasta blastomilonitas. Está distribuida en las áreas de Rodeo, Sierra de San Julián y Sierra de Ramírez, ubicadas en la región nororiental. Está intrusionada por el granitoidemilonitizado de la Formación Caopas. Presenta diferenciaciones a pórfido andesítico y foliación de aspecto esquistoso a gnéisico; su edad se asigna al Triásico Superior-Jurásico Inferior. Cubriendo a las unidades anteriores en forma discordante se presenta un conglomerado polimíctico constituido principalmente por fragmentos derivados de la Formación Rodeo-Nazas, con intercalaciones de arenisca roja y limolita de la Formación La Joya del Jurásico medio (Bajociano).

Cubren a la unidad capas gruesas a masivas de caliza biógena y dolomía de la Formación Zuloaga del Oxfordiano. Le sobrevace en forma concordante y transicional capas delgadas de lutita y caliza arcillosa con horizontes fosforíticos de la Formación La Caja del Oxfordiano-Titoniano. Presentan cambio lateral de facies a areniscas calcáreas y limolitas de la Formación La Casita del Titoniano. Afora en el núcleo del Anticlinal de la Sierra de Palotes. Está cubierta por una secuencia de calizas arcillosas de estratificación media a delgada con intercalaciones de lutita de la Formación Taraises y calizas gruesas con nódulos de pedernal de la Formación Cupido del Neocomiano. Sobrevaciendo concordantemente, se tiene una alternancia de rocas calcáreo-arcillosas con lentes y bandas de pedernal, de edad Aptiano-Cenomaniano, que constituyen las formaciones La Peña y Cuesta del Cura, esta última muestra un cambio lateral de facies a una caliza masiva del Albiano-Cenomaniano de la Formación Aurora. El Cretácico Superior está representado por depósitos rítmicos tipo flysch, iniciando con una sedimentación calcáreo-arcillosa del Cenomaniano-Turoniano de la Formación Indidura, que sobrevace concordantemente a la Formación Caracol del Senoniano. La suprayace y presenta cambio lateral de facies la Lutita Parras, constituida por areniscas y lutitas negras de edad Campaniano. Representa la última etapa de sedimentación marina en el área.

Discordantemente se depositó un conglomerado polimíctico del Cenozoico que corresponde a la Formación Ahuichila, constituido por fragmentos de calizas y rocas volcánicas del Paleoceno-Eoceno, que afloran en la porción norte. Intrusionando a las unidades descritas se presentan rocas ígneas intrusivas que corresponden a diferentes etapas de magmatismo; una de edad Eoceno con intrusivos de composición granodiorítica y sienítica, como se observa en el Pico de Teyra, con 7.3 Ma (PEMEX, 1963). El segundo evento se manifiesta en un grupo de cuerpos plutónicos e hipabisales variando de granito a granodiorita, monzonita y diorita, que están localizadas en San José de Reyes, Cerro Prieto y Caopas, de posible edad Eoceno-Mioceno. Están cubierta por rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno, representadas por flujos de ignimbritas, riolitas y domos riolíticos, que en algunas localidades se encuentran interestratificadas con andesita, que se observan en la región centrooeste. Las unidades sedimentarias del Cenozoico Superior están constituidas por rocas clásticas continentales, conglomerados y brechas polimícticas que se encuentran depositadas en las partes bajas de las cuencas. La última etapa de vulcanismo se manifiesta por derrames basálticos fisurales, del Plioceno-Pleistoceno. En los vales afloran limos y arcillas que constituyen los depósitos aluviales del Cuaternario. (Carta GeológicO-Minera G13-12 "Juan Aldama", Esc. 1:250,000, SGM, 1999) (figura 2).

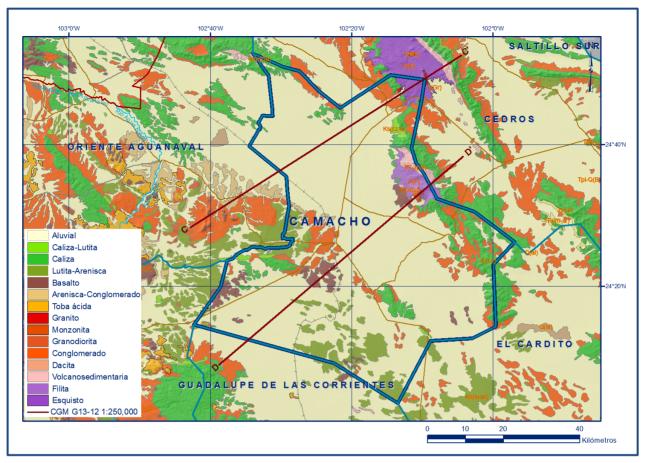


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

La columna estratigráfica de la región en la que se localiza el acuífero presenta rocas sedimentarias metamórficas e ígneas extrusivas e intrusivas, cuya edad comprende del Triásico al Reciente. A continuación, se describe cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

TRIÁSICO

Formación Taray

Aflora principalmente en la sierra de Teyra, formando un conjunto de rocas bandeadas, constituidas de grauvacas y filitas, con inter-estratificaciones de novaculita, que cubren a la Formación Rodeo. La parte inferior de esta formación está constituida por filitas de color café claro y la parte superior por novaculitas, interestratificadas con dolomitas y grauvacas.

JURÁSICO

Formación Nazas

También conocida como Formación Huizachal, aflora en la Sierra de San Julián, del Teyra y en el Cerro de Europa. Constituye una serie vulcanosedimentaria conformada por lavas interestratificadas con tobas, lutitas, areniscas y conglomerados, que en el área del acuífero está representada por una secuencia sedimentaria dominada por limolitas y un conglomerado polimíctico de coloración rojiza con clastos de rocas andesíticas y riolíticas. Aflora de manera aislada en la porción norte del acuífero, al este y noreste del poblado La Unión. Su contacto inferior no se observa en el área del acuífero, mientras que su contacto superior es discordante con las rocas de la Formación Zuloaga.

Formación La Joya

Aflora en la Sierra Madre Oriental, en el subsuelo se encuentra distribuida en la Planicie Costera del Golfo. En su localidad tipo tiene más de 1,200 m de espesor que consisten de conglomerados, areniscas, areniscas conglomeráticas, lutitas y limolitas de color rojo, ocasionalmente de color verde, de origen continental. En la región en la que se ubica el acuífero está representada por un conglomerado constituido principalmente por fragmentos derivados de la Formación Nazas, a la cual sobreyace discordantemente y subyace, también en discordancia, a las calizas con nerineas de la Formación Zuloaga.

Formación Zuloaga

Está representada por una caliza resistente a la erosión que forma los núcleos de los anticlinales en la que se distinguen dos unidades bien definidas: la parte inferior que contiene capas de caliza, cuyo color varía de gris claro a ligeramente oscuro, presenta una coloración rojiza o amarillenta al intemperismo, contiene también algunas capas de limolita calcárea débilmente consolidada. La parte superior está constituida por caliza masiva de color gris, que se caracteriza por presentar estilolitas de gran amplitud y algunos horizontes donde se presentan pequeños nódulos de pedernal de color negro. Aflora en las sierras plegadas ubicadas al norte del acuífero que rodean la planicie. Sobreyace discordantemente a la Formación Nazas y está cubierta en forma concordante por la Formación La Caja, su espesor aproximado es del orden de 500 m.

Formación La Caja

Consiste en capas delgadas de calizas margosas con pedernal, fosforitas, alternando con limolitas y areniscas bituminosas, que se hacen progresivamente más finas hacia la cima. Aflora en la mayoría de las sierras plegadas, generalmente en los núcleos anticlinales en forma de estrechas bandas paralelas que limitan a la Formación

Zuloaga. Debido a que es poco resistente a los agentes erosivos, frecuentemente se caracteriza porque en ella se desarrollan puertos y valles, que se alargan paralelamente al rumbo de las capas. A menudo se encuentra enmascarada por una pequeña cobertura aluvial, su espesor es del orden de 100 m. Sus contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Zuloaga y Taraises, respectivamente.

CRETÁCICO

Formación Taraises

Está constituida de caliza con cantidades menores de limolita, que descansan sobre sedimentos arcillosos de la Formación La Caja. En las partes altas de las montañas plegadas que forma, las capas de caliza son de espesor mediano a grueso, densas y de color gris claro a oscuro. La limolita que contiene se presenta intercalada en proporciones variables. La Formación Taraises es un depósito que se llevó a cabo en aguas relativamente profundas, alcanza un espesor aproximado de 150 m. Aflora en forma de franjas delgadas de poco espesor en las sierras plegadas ubicadas principalmente en la porción sur del acuífero, cuyos contactos, inferior y superior son concordantes con las formaciones La Caja y Cupido respectivamente.

Formación Cupido

Representada por rocas muy resistentes y homogéneas constituidas principalmente por calizas de estratificación mediana a gruesa de coloración gris claro, que presentan concreciones de pirita, lentes y nódulos de pedernal color gris y estilolitas; en algunas localidades con intercalaciones de limolitas calcáreas y en menor proporción lutitas. Sus mejores afloramientos se localizan en el Cañón Mimbre de la porción media de la Sierra de Parras, en Coahuila. Dentro del área del acuífero aflora principalmente en las sierras plegadas de la porción sur, en donde sus contactos estratigráficos con la unidad inferior, Formación Taraises, y superior, Formación La Peña y la Formación Cuesta del Cura, son concordantes. Su espesor medio es de 300 m.

Formación La Peña

Se describe como un grupo de estratos calcáreo arcillosos, cuya base comienza como una secuencia de calizas de estratificación delgada de color gris claro y continúa en la parte media con calizas que presentan cantidades variables de arcilla deleznable, de color amarillento y gris, con abundante pirita en las calizas y lentes pequeños de sílice blanca. En la cima se observa una alternancia entre caliza arcillosa, con caliza micrítica con bandas y lentes de pedernal negro y estratificación ondulada. Por su naturaleza arcillosa, es fácilmente erosionable y constituye un horizonte índice ya que su identificación resulta sencilla al formar depresiones entre las calizas más resistentes de la Formación Cupido. Sus afloramientos en el área del acuífero representan franjas

de espesor reducido, asociadas a la Formación Cupido, a la cual sobreyace concordantemente. A su vez, es cubierta concordantemente por la Formación Cuesta del Cura. Su espesor promedio es de 60 m.

Formación Cuesta del Cura

Está constituida por una caliza laminar de color gris claro a oscuro con estratificación ondulada y numerosos lentes y nódulos de pedernal negro. Sus afloramientos se localizan principalmente en la porción norte del acuífero, en los flancos de los anticlinales, así como en la región centro y suroriental, al noreste y sureste del poblado Primero de Mayo, en forma de elementos topográficos aislados, sobreyaciendo concordantemente a la Formación La Peña, y subyaciendo también concordantemente a la Formación Indidura. Presenta un espesor promedio de 80 m, aunque puede alcanzar hasta 250 m.

Formación Indidura

Generalmente aparece aflorando en las laderas de las sierras; consiste principalmente de dos series diferentes que están formadas en la parte inferior, de caliza arcillosa dispuesta en capas delgadas y lajeadas, con numerosas capas medianas o gruesas de caliza laminar color gris oscuro y de limolita calcárea que es de color amarillento. La parte superior está formada de una lutita gris muy homogénea, fácilmente erosionable, que, en la parte más alta, casi en contacto con la Formación Caracol, presenta un cambio de facies a una lutita arenosa. El espesor total promedio de la formación es de 200 m. Aflora de manera aislada en la sierra plegada ubicada en el margen noroeste, al norte del poblado Gruñidora.

Formación Caracol

Aflora localmente en las laderas de las sierras transversales de Santa Rita, Santa Rosa, La Laja y Zuloaga. Está constituida por capas de lutitas, con intercalaciones de arenisca en forma alternante. La lutita es moderadamente calcárea y suave, de color oscuro localmente con ligero contenido de arena, mientras que la arenisca está bien consolidada y es resistente; está dispuesta en capas delgadas y gruesas que tienen colores gris pardo y verdoso. El espesor de esta unidad puede alcanzar hasta 900 m en el valle de Mazapil (ubicado en el acuífero vecino Cedros), cubriendo concordante y transicionalmente a la Formación Indidura, mientras que es cubierta por rocas volcánicas y sedimentarias cenozoicas. Los afloramientos más importantes de esta unidad dentro del área del acuífero Camacho, se presentan en la porción centro-occidental, principalmente en las inmediaciones de los poblados San Martín y San Sebastián. Es cabalgada por la Formación Zuloaga del Jurásico.

Formación Parras

Secuencia detrítica constituida por lutitas calcáreas carbonosas de color gris oscuro a negro, muy fisiles, que alternan con estratos delgados de arenisca calcárea de color amarillento y de grano fino. Sus afloramientos son muy restringidos, sobreyaciendo a la Formación Caracol y cubierta discordantemente por la secuencia detrítica del Neógeno.

CENOZOICO

Rocas ígneas intrusivas

En la región se existen rocas ígneas intrusivas de edad Cenozoica, que corresponden a diferentes etapas de magmatismo; una de edad Eoceno con intrusivos de composición granodiorítica y sienítica como se ve en el Pico de Teyra, con 57.3 Ma. (PEMEX, 1983); el segundo evento se manifiesta en un grupo de cuerpos plutónicos e hipabisales cuya composición varía granito a granodiorita, monzonita y diorita, que se localizan en Caopas, ubicado al noreste del acuífero, de posible edad Eoceno-Mioceno.

Formación Ahuichila

Definida por Rogers (1961) en los afloramientos expuestos en el "Frontón de Ahuichila", ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas. Fue descrita originalmente como una serie dominantemente detrítica de conglomerado polimíctico de color rojizo, compacto con textura clástica, constituido por fragmentos de 0.10 a 0.40 m de calizas, esquistos, granitos, riolitas, arenisca, lutita, caliza lacustre y andesitas, en una matriz arenosa, con intercalaciones de tobas y areniscas. No aflora dentro del área del acuífero, pero se le ha identificado fuera de su límite noroccidental, al sur del poblado La Pardita y al noreste de Puerto del Rosario. Regionalmente su espesor es muy variable, en la zona su espesor promedio es de 250 m. De manera local, se correlaciona con la Grava Peribañez (Córdoba D.A., 1965), constituida por fragmentos calcáreos sin clasificar, subangulosos y del tamaño que varía de 10 a 15 cm de diámetro, inmersos en una matriz arcillosa, escasamente cementados con carbonato de calcio; que aflora formando lomeríos de poca elevación al este de El Cardito, en el Cañón La Manga y al noroeste de la comunidad Puerto del Rosario.

Unidad Volcánica Basáltica

Se propone este nombre para denominar una serie de rocas volcánicas máficas que se encuentran cubriendo a las rocas pre-oligocénicas. Principalmente están constituidas por derrames de basaltos que presentan coloración negra en superficie fresca y pardo-rojiza cuando se intemperiza; de textura vesicular a amigdaloide, con relleno de cuarzo y calcita, cuyos afloramientos más importantes se localizan al sur de

la localidad Estación Camacho, en la sierra El Solitario de Teyra y en la porción sureste del acuífero.

Conglomerado Polimíctico del Neógeno

Estos depósitos conglomeráticos se depositaron durante el periodo Mioceno-Pliocenoen un ambiente continental, al pie de los terrenos recién emergidos. Se cree que, durante la acumulación de este potente depósito, la región septentrional del área se comportaba tectónicamente inestable, debido a la dinámica de un sistema de fallas de desplazamiento lateral que actuaba en dicho sector, ocasionando la acumulación de un prisma relativamente potente de clásticos conglomeráticos. Está constituido por gravas no consolidadas hasta semi-consolidadas ampliamente distribuidas en el área, con un espesor de hasta de 130 al suroeste del acuífero. La edad asignada a esta unidad es del Mioceno al Plioceno, y se presenta cubriendoa los basaltos del Mioceno.

CUATERNARIO

Aluvión

Los materiales que constituyen esta unidad se encuentran rellenando las depresiones, generalmente sinclinales, como llanuras de piedemonte y llanuras aluviales que forman los rellenos de cuencas cerradas, denominadas bolsones. En general los aluviones se presentan como una mezcla de materiales de granulometría fina a gruesa, con una disposición heterogénea, en la cual superficialmente están sueltos y con una consolidación moderada a profundidad. Dentro de la unidad de aluviones también se incluyen algunos conglomerados y depósitos muy locales de travertino, relacionados con la existencia de manantiales. Su espesor en algunos sitios alcanza 100 m, aunque localmente se presentan también pequeños depósitos de terrazas aluviales con espesores de 10 a 20 m.

4.2. Geología estructural

En la zona se distinguieron dos eventos de deformación: el primero pre-oxfordiano que dio origen a la esquistosidad de las formaciones Taray, Rodeo y Caopas, relacionada a la evolución del arco continental cordillerano. Asociada a la esquistosidad se desarrolla una lineación mineral de dirección mineral. El segundo evento de deformación se evidencia principalmente en el paquete sedimentario del Cretácico, durante la Orogenia Laramide, originando una serie de pliegues anticlinales y sinclinales, generalmente asimétricos, orientados NW-SE y E-W, desarrollando al mismo tiempo una gran cantidad de cabalgamientos con transporte tectónico al Ne. Este tipo de estructuras se manifiesta ampliamente en la Sierra Yerbaniz, La Herradura, La Piedra Blanca, La Candelaria, Sierra Vieja de Ramírez, San Julián, El Solitario de Teyra y Guadalupe, en donde se observan apilamientos de cabalgaduras intraformacionales

produciendo sierras abruptas con fuertes pendientes. El efecto de la Orogenia Laramide es claramente observable en el flanco oriental del anticlinal San Julián, que corresponde a un pliegue de fondo en compresión, orientados en dirección NE-SW, en donde se desarrollaron cinco estructuras anticlinales, orientadas en dirección NE-SW, recostados al NW, es decir en forma oblicua a la estructura principal de la Sierra San Julián, que se conocen con los nombres de Cerros Las Mulas, Las Palomas, Las Tinajas, San Miguel y Jiménez. En estas localidades es claramente observable las dos fases de deformación: abajo las rocas metamórficas foliadas y en la parte superior la cobertura mesozoica con la deformación laramídica, definiéndose claramente la zona de despegue ("Decollment") o zona de desplazamiento en la base de la Formación Zuloaga, quedando la Formación Nazas como tegumento. El límite entre los terrenos Parral y Sierra madre es relevado por el cambio de estratigrafía y estilo estructural, plegamiento isoclinal con desarrollo de una superficie de anisotropía, acopñado por un sinnúmero de cabalgaduras en la cubierta del Terreno Parral y grandes estructuras de anticlinales y sinclinales que se extienden por decenas de kilómetros en la cubierta del Terreno Sierra Madre. A este límite se asocian campos volcánicos con sistema de domos riolíticos e intrusivos con manifestaciones de alteración hidrotermal y mineralización, que se extiende desde la Sierra Yerbaniz hasta el sureste de Juan Aldama (Carta Geológico-Minera G13-12 "Juan Aldama", Esc. 1:250,000, SGM, 2000).

La zona se encuentra ubicada en la subprovincia Sierras Transversales, perteneciente a la Sierra Madre Oriental, las cuales tienen características de montañas plegadas, falladas y en ocasiones afectadas por macizos intrusivos y por rocas volcánicas. Dentro de la zona se pueden distinguir tres grupos de sierras, separadas por amplias llanuras denominadas Bolsones, formados al rellenarse de sedimentos, antiguas depresiones originadas por fallas o por erosión. A partir del este, de una manera sucesiva se pueden distinguir las siguientes Sierras y Llanuras: Sierra de Guadalupe Garzarón, Zona del Bolsón de San Carlos o Laguna Jazminal, Zona de Sierras Transversales, Zona del Bolsón de Cedros, Zona de la Sierra de Teyra y Zona del Bolsón de San Simón.

Las sierras presentan características estructurales diferentes: La Sierra de Guadalupe Garzarón, localizada al oriente, corresponde a sierras plegadas que tienen orientación NW-SE. Está afectada por un macizo intrusivo de tipo monzonítco; la parte poniente de ésta sierra está cortada por una falla cuya orientación es la misma que la de la sierra. En la región central se localizan las sierras del Carpintero, La Caja, Santa Rosa y Santa Rita, cuyas características estructurales, pertenecen a anticlinales orientados en sentido E-W, separados por pequeñas llanuras, que corresponden a sinclinales rellenos de sedimentos. Las Sierras La Caja y Santa Rosa han sido afectadas por numerosas fallas paralelas al rumbo de las capas, por macizos intrusivos y por

derrames volcánicos. Este conjunto de sierras transversales, está limitado al oriente y al poniente por el Bolsón de San Carlos y el Bolsón de Cedros, respectivamente.

La zona de sierras localizada hacia el poniente, está formada por el Cerro de Europa y las Sierras de San Julián, Teyra, Gruñidora, Candelaria y Tanquecillos. La parte norte de este conjunto de sierras presenta condiciones estructurales bien definidas ya que se trata de un homoclinal con orientación NW-SE, que descansa directamente sobre rocas del basamento; mientras que en la porción sur, las sierras de Gruñidora, Candelaria y Tanquecillos, tienen una estructura geológica complicada, pues los estratos cambian frecuentemente de posición, en respuesta a los plegamientos y al fracturamiento. Todo este conjunto está limitado hacia el oriente por el Bolsón de San Simón. En general, se considera que los tres conjuntos de sierras mencionadas están limitados por fallas, que solo son evidentes por los cambios morfológicos bruscos y por la posición estructural de las capas que presentan discontinuidades.

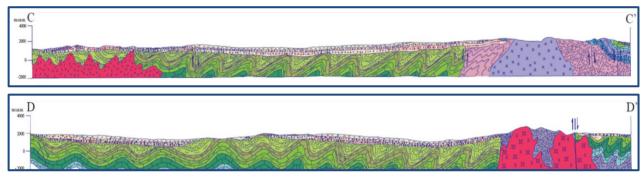
4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, se puede afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos aluviales y los conglomerados polimícticos del Paleógeno-Neógeno que rellenan el bolsón. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la zona. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas de la Formación Caracol, cuando presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El predominio de sedimentos granulares y conglomerados polimícticos, de granulometría fina, le confieren muy baja permeabilidad al acuífero, dado que los bajos caudales que aporta sólo son suficientes para el abastecimiento de las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas sedimentarias cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento, así como por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de calizas arcillosas y lutitas de las formaciones La Peña e Indidura.

Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas constituidas durante la Orogenia Laramide Debajo de este paquete de

rocas existe un acuífero alojado en rocas calizas que puede presentar condiciones de semiconfinamiento debido a la presencia de lutitas. Sus fronteras y barreras al flujo subterráneo están constituidas principalmente por rocas arcillosas cretácicas y jurásicas, así como por rocas ígneas extrusivas e intrusivas y rocas metamórficas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-12 "Juan Aldama". Esc. 1:250,000 (SGM, 1999) Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado. La porción superior está conformada por sedimentos aluviales, de granulometría variada, depósitos lacustres y eólicos, así como conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos de metros en el centro del bolsón; debajo de ellos se presentan areniscas y lutitas fracturadas. 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 sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas de la Formación Caracol, cuando presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que aún no ha sido explorado, que puede presentar condiciones de **semiconfinamiento**, debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas. Desde el punto de vista hidrogeológico, se pueden identificar siete unidades, dos de ellas consideradas prácticamente impermeables o acuifugos, con interconexión hidráulica entre algunas de ellas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades realizadas en el estudio de 2007, se ejecutó una prueba de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento (4 horas) como de recuperación (10.5 horas). El resultado de su interpretación, porlos métodos analíticos convencionalesdio como valor promedio de transmisividad de **1.25 x 10⁻³ m²/s** y de

conductividad hidráulica de 1.25 x 10-5 m/s (1.08 m/d), considerando un espesor saturado promedio de 100. Adicionalmente se recopiló información de 12 pruebas más, realizadas en el acuífero vecino El Cardito,que tiene el mismo origen y constitución geológica. Los resultados de su interpretación por métodos analíticos indican que los valores medios de transmisividad varían entre 7.0 x 10-5 m²/s y 1.8 x 10-3 m²/s, con un valor promedio de 4.1 x 10-4 m²/s. Los valores de conductividad hidráulica varían de 8.9 x 10-7 y 2.1 x 10-4 m/s (0.07 a 18.1 m/d), con un valor promedio de 7.7 x 10-6 m²/s (0.7 m/d), que se asocian a sedimentos de granulometría fina.

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. De acuerdo a la granulometría de los depósitos, para el balance de agua subterránea se adoptaron valores de rendimiento específico de **0.01** y **0.001**.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades de los estudios previos, 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 2007-2017, que es el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial. Debido a que la profundidad a los niveles del agua subterránea no muestra cambios importantes en su posición en los últimos años, únicamente se describe la piezometría más reciente.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2017 muestra que los valores varían, de manera general, de 20 a 110 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles. Los niveles estáticos menos profundos, de 20 a 40 m, se registran en la porción norte del acuífero, en la zona que rodea al Ejido Hidalgo, y en el área de San José de la Sierrita; en tanto que los más profundos, de 90 a 110 m, se midieron en la región suroriental, hacia al parteaguas entre este acuífero y El Cardito. En toda la zona que rodea al bolsón, la profundidad al nivel del agua subterránea varía de 80 a 90 m (figura 4).

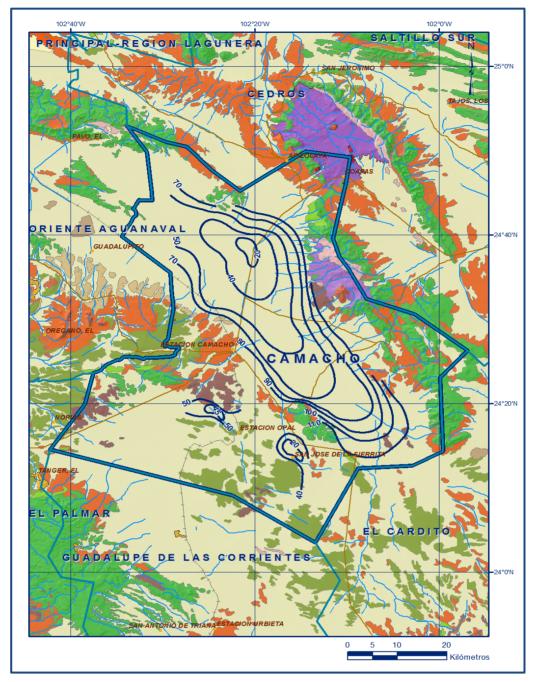


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2017)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2017 registró valores que variaron de 1,750 a 1,560 msnm, decreciendo desde la porción suroriental del acuífero, en la zona de San Felipe Nuevo Mercurio, hacia la planicie aluvial localizada en la región centro y noroccidental. Los valores más altos, 1,600 a 1,620 msnm se presentan en la porción norte y suroriental, desde donde descienden gradualmente hacia el sur y noroeste, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo SE-NW, en

dirección hacia el límite con el acuífero Oriente Aguanaval del estado de Durango, con alimentaciones provenientes de los flancos norte y sur (figura 5).

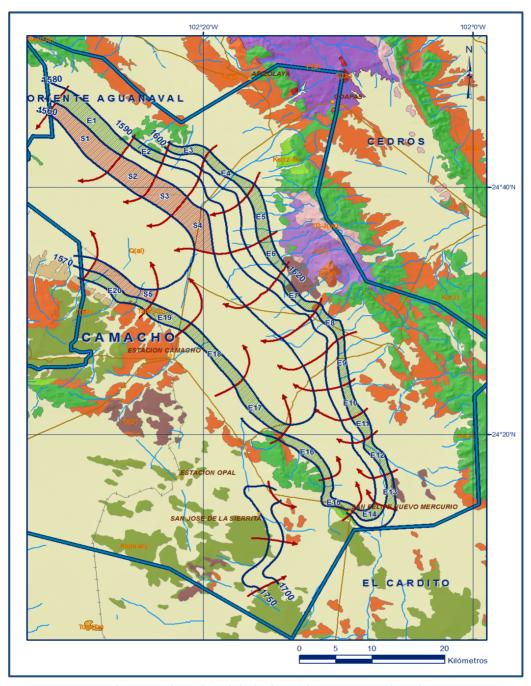


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2017)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2007-2017 registra valores puntuales de abatimiento que varían de 1 a 5 m, que representan 0.1 a 0.5 m anuales, con valores hasta 8 m, que se registraron al sur de Ejido Hidalgo, en el área de San José de la Sierrita y al norte de San Felipe Nuevo Mercurio. De manera general, en

la mayor parte de la superficie de explotación del acuífero, no se registraron variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo (figura 6).

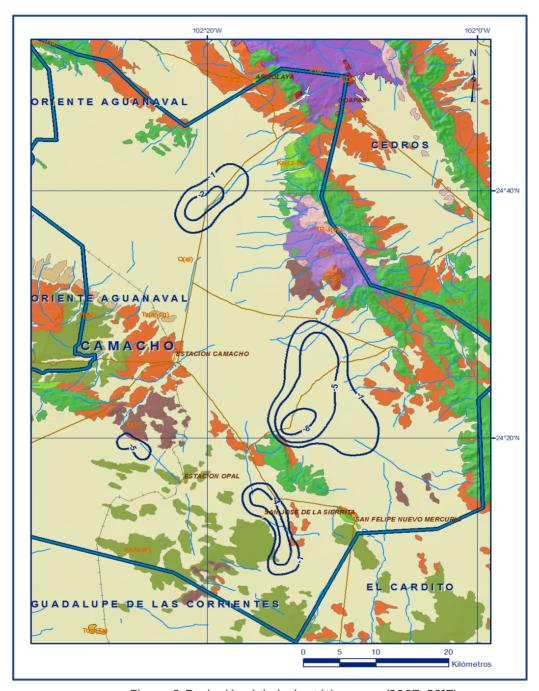


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2007-2017)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se tomaron 12 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, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio. Adicionalmente se tomaron 4 muestras de agua subterránea en el año 2018, como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018). Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, los valores extremos de concentración de SDT varían de 234 a 2000 mg/l; del total de muestras obtenidas, la mitad de ellas presentan una concentración que supera el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Los otros parámetros cuyas concentraciones superan los LMP establecidos en la norma referida para consumo humano son coliformes, fluoruro y arsénico. La concentración de coliformes fecales alcanzan valores de 173 NMP/100ml, que supera el LMP no detectable; las concentraciones de fluoruro en rebasan el LMP de 1.5 mg/l, con una concentración máxima de 6.05 mg/l. Las concentraciones de arsénico de algunas muestras rebasan el LMP para consumo humano de 0.025 mg/l, con concentraciones máximas de 0.222 mg/l.

En cuanto a la conductividad eléctrica, de manera general, el agua se clasifica como dulce a salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que se registraron valores inferiores y superiores a 2000 μ S/cm; con valores extremos de 483 y 3900 μ S/cm. Las temperaturas del agua subterránea registradas varían de 16.1 a 33.1 °C y el pH varía de 7.1 a 8.2.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que las familias de agua que predominan son la Sulfatada Cálcica y Sulfatada Sódica, que se asocian a materiales de origen químico sedimentario que es muy común en acuíferos con sedimentos de origen evaporítico de ambiente lagunar.

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 16 muestras de agua obtenidas, 2 se clasifican como C_4S_2 (muy alto contenido de sales y contenido medio a alto de sodio intercambiable) que sólo puede usarse en suelos permeables y con buen drenaje; 6 se clasifican como C_3S_1 (alto contenido de sales y baja concentración de sodio) que es poco apta para el uso agrícola ya que no puede usarse en suelos con drenaje deficiente; 5 se clasifican como C_4S_1 (riesgo muy alto por salinidad y bajo por alcalinidad) no recomendable para el uso agrícola bajo condiciones ordinarias; 2 muestras más se clasifican como C_2S_1 que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, que se considera apta para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos..

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2007, se registraron un total de 79 obras que aprovechan el agua subterránea:44 pozos, 34 norias y 1 manantial; del total de obras,60 están activas y18 inactivas.De las obras activas, 16 se destinan al uso agrícola, 21 al uso público-urbano, 18 para uso pecuario y 5 tienen uso múltiple;se incluye en el censo la existencia de 1 manantial que es aprovechado para uso público urbano.

El volumen de extracción asciende a **1.0 hm³ anuales**, de los cuales 0.7 hm³ (70 %) se destinan al uso agrícola, 0.2 hm³ (20 %) se utilizan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región y 0.1 hm³ (10 %) son para usos múltiples, el cual incluye el uso doméstico y pecuario. El volumen que se descarga a través del manantial es muy pequeño, razón por la cual para fines del balance se considera despreciable.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el para el periodo 2007-2017, en una superficie de **1,370 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:

Entradas (E) - Salidas (S) = 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 en el acuífero:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

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

De manera 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 de extracción para usos agrícola y público-urbano son pequeños, para fines del balance de agua subterránea se considera que no existe recarga incidental.

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

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

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Eh= Entradas por flujo subterráneo horizontal

B= Bombeo;

Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal;

ΔV(S)=Cambio de almacenamiento;

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

$$Rv = B + Sh - Eh \pm \Delta VS$$
 (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 delos 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 el valle 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 2017 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

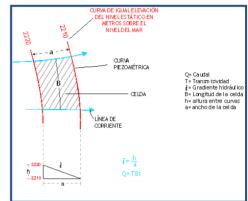
Donde:

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 **2.7 hm³** anuales.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2017)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)
E1	11465	2265	10	0.0044	0.00004	0.0020	0.06
E2	4870	1300	10	0.0077	0.00004	0.0015	0.05
E3	5190	1185	20	0.0169	0.00005	0.0044	0.14
E4	7720	1345	20	0.0149	0.00007	0.0085	0.27
E5	7535	1570	20	0.0127	0.00003	0.0029	0.09
E6	5165	1480	20	0.0135	0.00003	0.0021	0.07
E7	7315	1100	10	0.0091	0.00003	0.0020	0.06
E8	5430	1255	10	0.0080	0.00005	0.0022	0.07
E9	7005	1070	10	0.0093	0.00010	0.0065	0.21
E10	4910	1400	10	0.0071	0.00010	0.0035	0.11
E11	3635	1590	10	0.0063	0.00005	0.0011	0.04
E12	6065	1310	10	0.0076	0.00010	0.0046	0.15
E13	5135	950	10	0.0105	0.00010	0.0054	0.17
E14	4100	1535	10	0.0065	0.00005	0.0013	0.04
E15	7295	960	10	0.0104	0.00010	0.0076	0.24
E16	8840	1260	10	0.0079	0.00007	0.0049	0.15
E17	9370	1715	10	0.0058	0.00010	0.0055	0.17
E18	10595	1365	10	0.0073	0.00010	0.0078	0.24
E19	5600	2025	10	0.0049	0.00020	0.0055	0.17
E20	9585	1500	10	0.0067	0.00010	0.0064	0.20
						TOTAL	2.70

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo y de los obtenidos por correlación hidrogeológica en los acuíferos vecinos El Cardito, Cedros y Guadalupe de las Corrientes, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y de manera natural mediante salidas por flujo subterráneo (Sh).

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 **1.0 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 2017, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **2.6 hm³ anuales**.

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)
S1	11485	2650	10	0.0038	0.0003	0.0130	0.41
S2	5695	3460	10	0.0029	0.0007	0.0115	0.36
S3	4625	3720	10	0.0027	0.0007	0.0087	0.27
S4	7850	2830	10	0.0035	0.0010	0.0277	0.87
S5	9410	1675	10	0.0060	0.0004	0.0225	0.71
						TOTAL	2.62

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2017)

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 2007-2017 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.001 se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔV(S)= Cambio de almacenamiento en el período analizado

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

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

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

El cambio en el volumen de agua almacenado para el intervalo 2007–2017 fue de -1.1 hm³, es decir **-0.1 hm³ anuales** (tabla 4).

Área ΔV(S) **Evolución Evolución** Sy (m) media (m) (km²) (hm³/año) -8 -8.0 11.7 0.001 -0.1 -5 a -8 72.0 -0.5 -6.50.001 -5 9.1 0.0 -5 0.001 -4 -4 17 0.001 -0.1 0.001 0.0 -2 -2.0 12.8 -1 a -5 -3.0 95.0 0.001 -0.3 -1 a -4 -2.5 28.4 0.001 -0.1 -1 a -2 -1.5 40.5 0.001 -0.1 **TOTAL TOTAL** 286.5 -1.1 **Promedio anual** -0.1

Tabla 4. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2007-2017)

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:

Rv = B + Sh - Eh
$$\pm \Delta$$
VS
Rv = 1.0 + 2.6 - 2.7 - 0.1
Rv = 0.8 hm³ anuales

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

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:

DISPONIBILIDAD	RECARGA	DESCARGA	EXTRACCIÓN DE
MEDIA ANUAL DE	TOTAL	NATURAL	AGUAS
AGUA DEL SUBSUELO	- MEDIA	COMPROMETIDA	SUBTERRÁNEAS
EN UN ACUÍFERO	ANUAL		

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **3.5 hm³ anuales**, de recarga natural.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero, su valor es de 1.3 hm³ anuales que corresponden al 50% de las salidas subterráneas hacia el acuífero Oriente Aguanaval del estado de Durango. El 50% restante se podrá aprovechar en el acuífero Camacho; de esta manera se podrá favorecer el desarrollo en ambas zonas del límite entre estos acuíferos de esta región árida y pobre, en la que recarga se genera en el acuífero del estado de Zacatecas y se dirige hacia el estado de Durango. Por lo tanto, **DNC = 1.3 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 (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **2'240,373 m³** anuales, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

DMA = R - DNC - VEAS

DMA = 3.5 - 1.3 - 2.240373

DMA = - 0.040373 hm³ anuales

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su déficit es de **40,373 m**³.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1990. Estudio de Prospección Geohidrológica y Exploración Geofísica en las Zonas Marginadas del estado de Zacatecas. Realizado por EXYCO S.A.

Comisión Nacional del Agua. 2007. Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico y de Calidad del Agua en los Acuíferos Villa García, El Salvador, Guadalupe Garzarón, Camacho y El Cardito, Estado de Zacatecas y Evaluación Geohidrológica de los Acuíferos García de la Cadena, Pino Suárez y Corrales, Zac. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C.

Comisión Nacional del Agua. 2008. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Camacho (3221), estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2017. Información piezométrica e hidrométrica del acuífero Camacho, Zacatecas.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera G13-12 "Juan Aldama", Esc. 1:250,000.