



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SANTA CLARA (1020), ESTADO DE
DURANGO**

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	4
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia fisiográfica.....	6
3.2	Clima.....	7
3.3	Hidrografía	7
3.4	Geomorfología.....	8
4	GEOLOGÍA.....	8
4.1	Estratigrafía.....	8
4.2	Geología estructural	17
4.3	Geología del subsuelo	18
5	HIDROGEOLOGÍA.....	19
5.1	Tipo de acuífero	19
5.2	Parámetros hidráulicos.....	19
5.3	Piezometría	20
5.4	Comportamiento hidráulico.....	20
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	20
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	21
5.4.3	Evolución del nivel estático	22
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	23
7	BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	24
7.1	Entradas	24
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	25
7.1.2	Entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh).....	25
7.2	Salidas.....	27
7.2.1	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	27
7.2.2	Evapotranspiración (ETR).....	27
7.2.3	Bombeo (B).....	29
7.3	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	29
8	DISPONIBILIDAD	30
8.1	Recarga total media anual (R).....	30
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	30
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	31
9	BIBLIOGRAFÍA	32

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-2000 "Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA). 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 Santa Clara, definido con la clave 1020 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Durango, en el límite con el estado de Zacatecas, entre las coordenadas 24° 00' y 24° 45' latitud norte y 103° 10' y 103° 50' longitud oeste, abarcando una superficie de 1,871 km² (figura 1). Limita al norte con el acuífero Pedriceña-Velardeña, al este con Oriente Aguanaval, al oeste con Cuauhtémoc y Peñón Blanco y al sur con los acuíferos Vicente Guerrero-Poanas y El Palmar, Los primeros pertenecientes al estado de Durango y los últimos al Estado de Zacatecas.

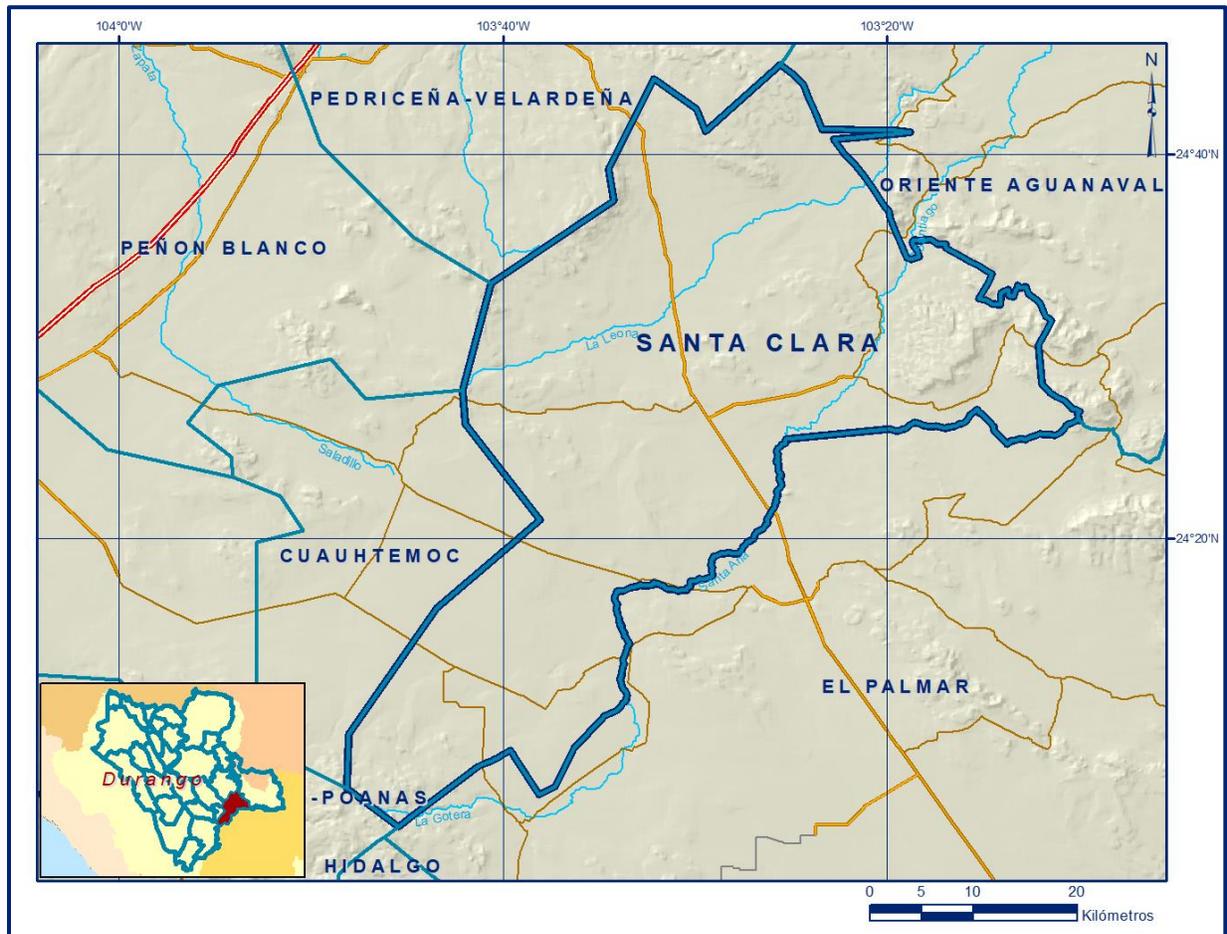


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, la porción oriental del acuífero comprende totalmente el municipio de Santa Clara y su región occidental pertenece al municipio Cuencamé.

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 del acuífero

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	38	5.3	24	20	57.1	
2	103	41	56.8	24	25	58	
3	103	42	5.4	24	27	41.9	
4	103	40	38.1	24	33	18.2	
5	103	34	13.6	24	37	35	
6	103	34	29.9	24	39	15.5	
7	103	32	8.6	24	43	55.4	
8	103	29	55.4	24	42	23	
9	103	29	27	24	41	11.1	
10	103	25	34	24	44	39.6	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE MUNICIPAL
11	103	9	57.8	24	26	7.7	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	103	45	27.7	24	4	58	
13	103	48	6.6	24	6	56.9	
14	103	48	3.4	24	9	46.7	
15	103	43	25.7	24	16	22.6	
1	103	38	5.3	24	20	57.1	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero, pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Durango. Su territorio completo no se encuentra sujeto a ninguna veda para la extracción de agua subterránea.

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 del agua subterránea es el agrícola. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación; recientemente se realizaron estudios para determinar su recarga media anual.

A continuación, se describen los objetivos de los estudios más importantes:

REPORTE FINAL DEL ESTUDIO GEOFÍSICO DE LAS ÁREAS DE CUAUHTÉMOC Y PEÑÓN BLANCO, ESTADO DE DURANGO. Realizado para Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1979 por la empresa Consultores en Aguas Subterráneas S.A. El propósito de este estudio consistió en identificar la roca basal, así como obtener información sobre las resistividades eléctricas de las diversas formaciones del subsuelo y sus espesores, correlacionándolos posteriormente con la litología de perforaciones ubicadas en el área, así como con datos hidrogeoquímicos y piezométricos del área.

La información obtenida proporcionó áreas con posibilidades para la extracción de agua subterránea.

ESTUDIO DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLOGICOS Y GEOFÍSICOS DE LA ZONA DE CUENCAMÉ-SANTA CLARA.

Realizado para la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subdirección de Geohidrológica y Zonas Áridas, Durango 1981 por la empresa Estudios Físicos de la Tierra, S.A. Su objetivo fue la definición del potencial geohidrológico de las distintas unidades que conforman el subsuelo de la región e identificar zonas favorables para la perforación de pozos.

SONDEOS DE GEOFÍSICA ELÉCTRICA EN VARIOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE DURANGO,

Realizado para la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaria de Infraestructura Hidráulica en 1983, por la empresa, Lesser y Asociados, S.A. Este estudio se realizó con la finalidad de obtener un mayor conocimiento sobre las características del subsuelo para la localización de sitios favorables para la perforación de pozo. Se ejecutaron para ello sondeos de geofísica eléctrica en los municipios de catalán, Guadalupe Victoria, Nombre de Dios, Durango, Panuco de Coronado, San Juan del Río, Vicente Guerrero y Peñón Blanco.

ESTUDIO PARA EL RESPALDO DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN DOS ACUÍFEROS DEL ESTADO DE DURANGO. 2006. Convenio de colaboración CONAGUA – IPN (Ciencias de la Tierra ESIA).

Los objetivos del estudio fueron delimitar y caracterizar hidrogeológicamente los acuíferos Pedriceña-Velardeña y Peñón Blanco, determinar la ocurrencia, movimiento y calidad del agua subterránea; cuantificar la recarga del acuífero mediante determinación de la magnitud de cada una de sus componentes; identificar y caracterizar las fuentes de contaminación que inciden en el deterioro de la calidad del agua y conocer el valor de la conductividad hidráulica por medio de pruebas de bombeo.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS CABRERA-OCAMPO, MATALOTES-EL ORO, SAN JOSÉ DE NAZARENO, GALEANA-EL QUEMADO, LA VICTORIA, BUENOS AIRES, TORREÓN DE CAÑAS, SAN FERMÍN, SAN JUAN DEL RÍO, CABRERA, LA ZARCA-REVOLUCIÓN Y REVOLUCIÓN, EN EL ESTADO DE DURANGO.

Realizado en Convenio por la Universidad de Sonora (UNISON) para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO SANTA CLARA, EN EL ESTADO DE DURANGO. Realizado en Convenio por la Universidad de Sonora (UNISON) para la Comisión Nacional del Agua, 2010.

El objetivo del estudio fue el conocer las condiciones geohidrológicas del acuífero mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, obtener información necesaria para calcular la recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron 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 acuífero se encuentra ubicado dentro de la Provincia Fisiográfica Mesa Central, la cual está definida como una cuenca rodeada por montañas más elevadas, más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras.

En lugar de sierras elongadas, tiene áreas poco elevadas, disectadas por las rocas volcánicas antiguas. Se trata de una planicie elevada que se localiza en la parte central de México, más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2000 y las elevaciones en su interior son moderadas, con desniveles inferiores a los 600 m.

La zona donde se localiza el acuífero muestra un estado de erosión avanzado con grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres, algunas de ellas endorreicas.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el clima que predomina en la zona del acuífero, es el BS₁kw que es un clima semiseco templado, el cual ocupa desde el centro-norte hasta el sur del acuífero.

El segundo lugar lo ocupa el tipo de clima BS₀hw que corresponde a un clima seco semicálido que se presenta en la porción noroeste de la región, desde Santa Clara hasta los límites del acuífero. El clima clasificado como BS₁kw(w) se registra en la zona norte del acuífero y corresponde a semiseco templado.

En la porción sur del acuífero, en la zona más alta de la cuenca, existe una pequeña área que es de tipo C(w₀) que corresponde con clima templado subhúmedo.

Para la determinación de las variables climatológicas se tiene información de cinco estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Atotonilco, Cuauhtémoc, Santa Clara, Simón Bolívar y 12 de diciembre, cuyo registro comprende los periodos 1969-2007, 1977-2007, 1963-2007, 1969-2007 y 1977-2007, respectivamente. De acuerdo con estos datos y utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **442.9 mm** y **17.3° C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,999.2 mm** anuales.

3.3 Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica RH36 Nazas-Aguanaval, Cuenca del Río Aguanaval y subcuenca de los ríos Ramos y Otros, en la porción suroriental del estado de Durango.

El área de esta región es de 89,239 km²; limita al norte con la región hidrológica 35, al noroeste con la región hidrológica 24c, al este con la región hidrológica 37, al sur con la región hidrológica 12, al suroeste con la región hidrológica 11, al oeste con la región hidrológica 10, y al noroeste con la región hidrológica 24a. Los ríos más importantes son el Nazas, el cual nace en el estado de Durango, y el Aguanaval, que nace en el estado de Zacatecas.

La fisiografía de la región se conforma básicamente por dos zonas, una alta y una baja; la primera queda definida por las estribaciones de las sierras, donde se forman los ríos que descienden a la segunda zona; en la parte más baja y se originan las lagunas en donde desembocan los arroyos y ríos.

En el acuífero Santa Clara se localiza el río Santa Clara o Santiago y el arroyo Mazamitote, los que descargan sus escurrimientos al río Aguanaval, el cual sirve de límite con el Estado de Coahuila.

3.4 Geomorfología

La provincia de la Mesa Central se caracteriza por tener amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas. Los altos topográficos más sobresalientes se localizan al suroriente, en donde alcanzan elevaciones de 2,150 msnm en los cerros denominados San Bartolo, Mota y Mesa Las Vacas. El área presenta rasgos de madurez morfológica en su última etapa. Los tipos de drenaje varían de paralelo a subparalelo en las rocas sedimentarias, anular en zonas de intrusivos, y meándrico y anastomosado en las zonas planas.

4 GEOLOGÍA

De acuerdo con la Carta Geológico-Minera “Juan Aldama” G13-D75 escala 1:50000 del Servicio Geológico Mexicano, la geología de la región está conformada por rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende del Jurásico Superior al Reciente (figura 2).

A continuación, se presenta la descripción de las distintas unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente.

4.1 Estratigrafía

Jurásico Superior (Tithoniano). Formación La Casita (JKt Ar-Lu)

Esta unidad fue originalmente descrita por Imlay (1936) en el Cañón La Casita, ubicando al sureste de Saltillo en Coahuila, en donde está conformada por lutita, arenisca y caliza, formando taludes cerca de un escarpe de calizas del Cretácico; caliza gris alternando con lutita carbonatada de delgada a gruesa, lutita gris oscuro, arenisca de cuarzo de grano grueso, caliza yesífera con nódulos de limo ferruginoso y lutita amarilla a rosa con un horizonte de amonitas.

Dentro del área del acuífero Santa Clara los afloramientos de esta unidad están restringidos en el límite nororiental, formando en centro de un anticlinal. En este afloramiento, la Formación La Casita consiste de lutita negra y margas con concreciones de caliza negra que corresponden a los afloramientos más antiguos del terreno tectonoestratigráfico Sierra Madre en Durango.

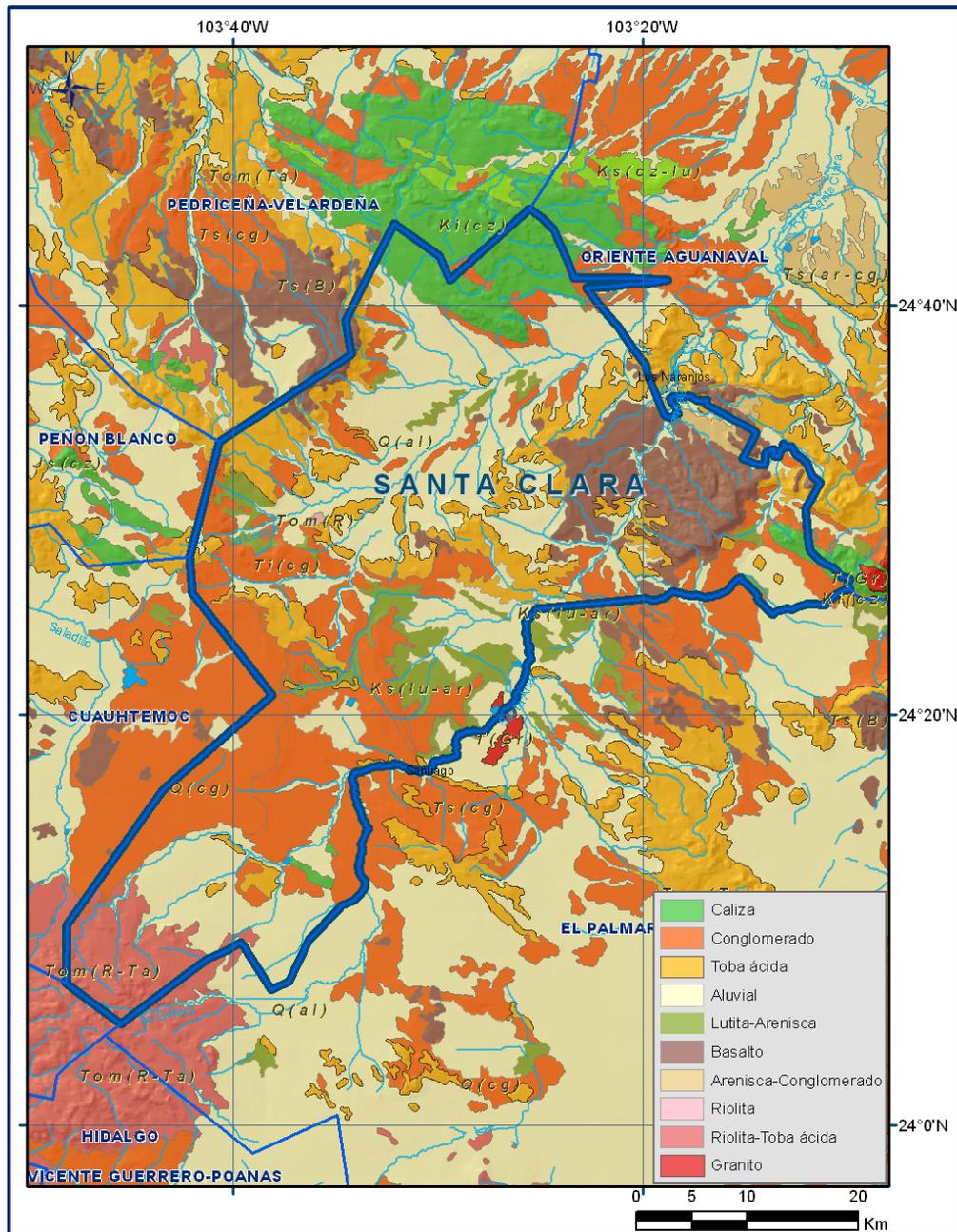


Figura 2. Geología general del acuífero

Cretácico Inferior (Neocomiano-Aptiano). Formación Cupido (KnCz)

La Formación Cupido fue reportada por primera vez por Imlay (1937) para describir una secuencia carbonatada constituida principalmente por calizas de estratificación mediana que ocasionalmente presenta concreciones de pirita y una gran cantidad de pedernal en forma de lentes y nódulos, cuyos afloramientos se tienen en el Cañón Mimbres de la porción media de la Sierra de Parras, Coahuila.

Dentro del área del acuífero Santa Clara, esta unidad tiene sus principales afloramientos en las sierras plegadas de la porción norte. Está representada por rocas muy resistentes y homogéneas, principalmente calizas de estratificación mediana y gruesa y de colores claros. Localmente también se caracteriza por presentar estilolitas y algunos nódulos y lentes de pedernal color gris, e intercalaciones de limolita calcárea y lutita.

La Formación Cupido representa un sistema sedimentario de plataforma carbonatada somera que se desarrolló entre el Barremiano y el Aptiano (Barragán, 2004). Regionalmente esta unidad presenta un cambio de facies lateral hacia las rocas de ambientes más profundos que representan las rocas de la Formación Tamaulipas. Dentro del área del acuífero, los contactos estratigráficos con la unidad infrayacente Formación La Casita y la suprayacente Cuesta del Cura son concordantes.

Albiano- Cenomaniano. Formación Cuesta del Cura (Kapce Cz-Ar)

La Formación Cuesta del Cura fue definida por Imlay (1936) en el sector denominado Cuesta del Cura, en la Sierra de Parras, al sur de Coahuila. La secuencia descrita originalmente son estratos delgados de caliza con arcillas intercaladas y bandas de pedernal. Dentro del área del acuífero Santa Clara, esta unidad presenta afloramientos importantes en la porción norte de la misma, donde se encuentra en los flancos de los anticlinales. Está constituida por una caliza laminar de color gris oscuro con estratificación ondulada y numerosas lentes y nódulos de pedernal negro.

Por su contenido faunístico y microfaunístico, así como su litología se interpreta que la Formación Cuesta del Cura se depositó en un ambiente marino pelágico de cuenca con profundidades, particularmente en el área estudiada, correspondientes a una zona circalitoral a epibatial de más de 200 m en aguas tranquilas bien oxigenadas. En el área estudiada, esta formación sobreyace concordantemente a la Formación Cupido, y su contacto superior fuera de los límites del acuífero es también concordante con la Formación Indura.

Cretácico Superior (Conaciano-Santoniano). Formación Caracol (Kse Ar-Lu)

Esta formación fue descrita por Imlay (1937) como tobas desvitrificadas, lutita y caliza en menor proporción, que sobreyacen a la Formación Indidura en la parte media de la Sierra de Parras en Coahuila. Los afloramientos más importantes de esta unidad se tienen hacia la porción centro-norte del área el acuífero. Esta formación está constituida por capas de lutitas, con intercalaciones de arenisca.

La lutita es moderadamente calcárea y suave, de color oscuro localmente con algo de arena, mientras que la arenisca es de color gris pardo a verdoso y presenta estratificación de delgada a gruesa.

Por su litología y rasgos sedimentológicos, las rocas de la Formación Caracol se depositaron en una cuenca poco profunda, con libre circulación y parcial influencia del oleaje, dentro de una zona sublitoral entre 50 y 100 m de profundidad (Barboza-Gudiño *et al.*, 2004). Dentro del área estudiada no se tiene aflorando su límite inferior, aunque regionalmente es transicional con la Formación Indura; mientras que, hacia la cima, es cubierta discordantemente por las rocas de la Formación Santa Inés.

Cretácico Superior

Formación Mezcalera (JsKi Ar-Lu).

Es la unidad más antigua y está representada por una alternancia rítmica tipo flysch de areniscas y lutitas, cuyos afloramientos principales se localizan al noroeste de la sierra La Sierrita, en los alrededores del Rancho Borrueal, al noroeste del poblado Dos de Abril, en el Arroyo Santa Bárbara.

Litológicamente está constituida por una secuencia rítmica de areniscas de grano fino y lutitas intercaladas con horizontes gruesos de calizas y limolita. Como cambio de facies de esta secuencia, se presentan rocas calcáreas de la Formación Aurora (KaCz-Lu), constituida por calizas, dolomías, pedernal y horizontes arcillosos, que afloran en la sierra La Sierrita y al noroeste en los cerros Andrés y Sotoles. Aflora de manera local en la porción sur del acuífero.

Formación Aurora

El nombre Formación Aurora fue propuesto por Burrows (1910) para aquellas rocas que afloran en la porción noreste del estado de Chihuahua, donde están constituidas por capas gruesas de calizas fosilíferas, que presentan abundantes nódulos de pedernal.

Está constituida por calizas de estratificación media a gruesa con diversos desarrollos arrecifales y algunos horizontes de calcarenitas. Presenta una coloración de tonalidad gris a oscura, escasos nódulos de pedernal y hematita hacia la cima. Presenta fracturamiento general que varía de moderado a intenso, estructuralmente forma pliegues anticlinales cuyo eje se orienta al noroeste-sureste y echados suaves más o menos uniformes.

Paleógeno (Eoceno)

Formación Ahuichila

Sobreyace discordantemente a las rocas mesozoicas, y corresponde a un conglomerado de origen continental, tipo “Molasse”, compuesto de fragmentos angulosos a subredondeados de caliza en una matriz de calcarenita, que aflora en bancos masivos y gruesos que conforman lomeríos suaves. Sus mejores afloramientos en la región se localizan al sur y noroeste de Pedriceña y en el área del acuífero se localizan al oeste de la Sierra El Temascal. Su espesor medido es de 450 m y su edad se ha establecido en el Eoceno Superior- Oligoceno Inferior por correlación con depósitos clásticos del centro de México (Fries *et al.*, 1955; Edwards, 1955). Constituida por capas de conglomerados, areniscas, lutitas, calizas lacustres y tobas.

Posterior a esta sedimentación ocurre una fase de vulcanismo que deposita en la base del paquete andesitas-basaltos (TomA-B) que van gradando de andesitas a basaltos vesiculares. La unidad se distribuye en toda la superficie del acuífero, aflorando en la sierra El Temascal en los cerros La India y La Chicharronera, en las mesas Santa Bárbara y en las planicies de los alrededores del poblado Cuauhtémoc. La unidad Andesita-basalto sobreyace en discordancia a las rocas sedimentarias jurásicas-cretácicas y subyace a depósitos riolíticos. Por relaciones estratigráficas observadas en campo, se le asignó una edad Oligoceno-Mioceno.

La segunda fase de vulcanismo deposita la unidad riolita-toba riolítica (TmR-TR), compuesta por una secuencia de derrames y flujos piroclásticos, que afloran en los cerros La India, formando parte del paquete volcánico que aflora en la región. Por la relación estratigráfica que guarda con las rocas sedimentarias del jurásico-Cretácico, se le considera de edad correspondiente al Mioceno. Continuando con la secuencia volcánica, se deposita la unidad riolita-ignimbrita (TmR-Ig), constituida por riolitas e ignimbritas con estructura fluidal y cristalovítreas masivas, algunas ignimbritas contienen fragmentos líticos y presencia de pómez.

Estas rocas forman parte del paquete volcánico y sus afloramientos se distribuyen en la sierra El Temascal, en los Cerros La India y la Chicharronera y en las mesas Carrillo y Santa Bárbara. Posterior a toda la secuencia volcánica surge el emplazamiento de estructuras dómicas composición riolítica (TmR) se afloran en la porción noreste y al sur del poblado Emiliano Zapata.

Estas rocas se encuentran afectando a rocas sedimentarias de la Formación Mezcalera y al paquete volcánico, es favorable para la mineralización principalmente de mercurio y antimonio. Es en estas rocas donde se encuentra encajonada la mineralización de las áreas “La Roca” y “Cerro Blanco”, actualmente abandonadas.

A finales del Paleógeno y principio del Cuaternario se depositaron sedimentos clásticos continentales de la Formación Llanos (TplQptCgp), constituida por fragmentos volcánicos sin consolidar, así como abanicos aluviales de fragmentos de caliza cementados por caliche, que se encuentran aflorando en toda la superficie del acuífero, sobre todo en las grandes planicies, cubierta por aluvión y suelos residuales.

Por similitud litológica y estratigráfica, se correlacionan con la Formación Santa Elena y se les asigna una edad Plioceno Tardío-Pleistoceno.

Paleógeno Oligoceno

Supergrupo Volcánico Superior (Tolg-Tr)

Esta unidad presenta la mayor parte de los afloramientos litológicos dentro del acuífero Santa Clara, dominando la mayor parte de éstos en la porción centro sur y oriente.

Están caracterizados por rocas volcánicas ácidas, tales como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e ignimbritas. Regionalmente, esta unidad incluye varias unidades caracterizadas por litologías volcánicas félsicas afines (Uramex, 1981): a) tobas líticas con pequeños fragmentos de rocas hipabisales y volcánicas con pseudoestratificación de delgada a masiva, aflora en los flancos de la Sierra de Coneto, con un espesor aproximado de 186 m (Formación Ocampo); b) ignimbritas fluidales y vitrófidos pelíticos asociados a tobas y brechas riolíticas piroclásticas con contenido de calcedonia; su espesor varía de 50 a 100 m (Formación Alumbre); c) ignimbritas masivas con escasos fragmentos líticos, siendo más abundante en la cima, en su parte media contiene areniscas tobáceas con un espesor variable de 20 a 90 m (Formación El Salto); d) ignimbritas rosadas, moradas y rojizas con estructura fluidal y juntas columna res, con un espesor aproximado de 75 m (Formación Yerbabuena); y e) tobas cricoides y aglomeráticas de composición ácida con fragmentos de bloques a bombas envueltos en una matriz de ceniza litificada (Formación Trincheras).

Neógeno (Plioceno)

Formación Los Llanos

Designada formalmente por Enciso de la Vega (UNAM, 1968) para referirse a los clásticos continentales probablemente de edad Plioceno o Pleistoceno, que están presentes en el área de la hoja Cuencamé y que se encuentran ampliamente distribuidos en el área estudiada. Está constituida principalmente de gravas, arenas, arcillas y limos; los clásticos gruesos se presentan sin consolidar y los finos débilmente consolidados.

La mayor parte de sus componentes son derivados de roas volcánicas de composición ácida principalmente. La forma de los clásticos varía de subredondeados a redondeados. Presenta generalmente una coloración café rojiza. Eventualmente contiene capas tobas andesíticas y lavas basálticas; algunas de ellas presentan evidencias de haber sido depositadas en cuerpos de agua, como en los afloramientos que se muestran y sobre la carretera Durango-Cuencamé, a 8 km al NE de Guadalupe Victoria.

Algunas de estas lavas han sido cortadas en los pozos perforados para explotación de agua potable. Presenta caliches distribuidos irregularmente que aparecen en forma de capas delgadas y onduladas, de espesor variable. Algunos de estos cuerpos muestran características de travertino y se depositaron seguramente en cuerpos de agua.

La Formación Los Llanos descansa tanto sobre las rocas mesozoicas como sobre las formaciones cenozoicas anteriormente descritas y excepto los depósitos aluviales recientes, forma la cima de la columna estratigráfica. Su espesor es uno de los puntos que más se presta a controversia. Enciso de La Vega (*op. cit.*) le asigna un espesor de 15 m, Sin embargo, se tienen evidencias por la información de pozos perforados, de que el espesor es considerablemente mayor, especialmente en los valles de origen tectónico, en los que podría alcanzar varios cientos de metros.

Constituye precisamente la unidad fisiográfica de la región, a cuál ha sido denominada “Región de Los Llanos”. Fisiográficamente se describe como amplias planicies, poco disectadas, en las que se desarrollan amplias superficies de cultivos. La edad de la formación está bien datada por la presencia de restos de mamut (algunos molares y posiblemente parte de un fémur descubiertos en la hacienda de Atotonilco, así como en otras localidades).

Cuaternario

Como última etapa del vulcanismo se depositaron basaltos de textura afanítica con estructura vesicular (QptB) cuyos afloramientos se localizan en la porción central y occidental del acuífero, cubriendo discordantemente a los conglomerados de la Formación Llanos.

Durante el Cuaternario se desarrolló una secuencia de clásticos de origen continental, constituida principalmente por guijas y cantos rodados de caliza subredondeados a redondeados, que varían de gravas semiconsolidadas hasta conglomerados cementados por arcillas, limo o caliche; esta formación, denominada Santa Inés, cubre en forma discordante a todas las unidades estratigráficas ya descritas. Su espesor máximo medido es de 300 m y se considera de edad Plioceno Tardío-Pleistoceno Temprano (Pantoja, 1963).

Los depósitos aluviales son de gran extensión y se presentan en los valles; estos corresponden a ejes de sinclinales que han sido rellenos por este material. Como última etapa del vulcanismo se depositaron basaltos de textura afanítica con estructura vesicular (QptB) cuyos afloramientos se localizan en la porción central y occidental del acuífero, cubriendo discordantemente a los conglomerados de la Formación Llanos.

Formación Santa Inés (TnCgp)

El término formacional de esta unidad fue propuesto por Pantoja (1963) para designar a las rocas conglomeráticas de origen continental que afloran en las cercanías de San Pedro El Gallo, Dgo. En la región se encuentran distribuidas en la mayor parte de las sierras formadas por rocas volcánicas cenozoicas (series volcánicas inferior y superior). Está constituida por conglomerados de rocas volcánicas, que en su contacto con las rocas subyacentes presenta capas arenosas de color rojizo, así como limos de color blanquecino, secuencia que paulatinamente cambia a conglomerados hacia la cima. Intercalaciones de derrames basálticos se observaron en las inmediaciones de San José de la Unión. Los constituyentes del conglomerado presentan fragmentos cuya granulometría varía desde arenas hasta bloques de 50 cm de diámetro, el grado de redondez varía de redondeado a subredondeado, el cementante es escaso, aunque en las inmediaciones de San José de la Parrilla el material está bien cementado; generalmente presenta matriz arenosa y la compactación varía con la profundidad del material, por lo que en superficie se presenta con baja compactación.

El espesor de la unidad es muy variable y depende de su distribución geográfica; los espesores mínimos se encuentran en las bases de las sierras, en tanto que en las porciones más bajas del valle su espesor rebasa los 300 m. De acuerdo con su génesis y características litoestratigráficas, a esta unidad se le considera una edad Plioceno-Pleistoceno, aunque si se considera que los basaltos interestratificados son del Paleógeno, su edad puede abarcar desde el Mioceno.

Por la similitud litológica y relación estratigráfica, estos depósitos se correlacionaron con la Formación Los Llanos, asignándole una edad correspondiente al Plioceno Tardío.

Formación Guadiana (Qpt B)

Albritton (1958) asigna el nombre de formación Guadiana a los derrames de basaltos que afloran a 25 km al este de la ciudad de Durango, en el poblado de Saltito de La Constanza. Está constituida por derrames de brecha basáltica; basalto de color oscuro en superficie fresca e intemperiza a café oscuro, de textura afanítica con estructura vesicular, con presencia de olivino de color amarillo verdoso.

Estos Basaltos son cubiertos por depósitos aluviales y lacustres del Reciente. Por la similitud litológica y posición estratigráfica, los basaltos del área se correlacionan con los de la localidad tipo, que se ubican en el Pleistoceno. Según Lyons (1975) la emisión de los basaltos ocurrió después del segundo colapso de la Caldera Chupaderos. Representan la última actividad volcánica del Neógeno y cubren grandes extensiones de terreno; por su color y forma son fáciles de identificar en campo. Se presentan en forma de derrames intercalados en el Conglomerado Polimíctico; volcanes y conos cineríticos. Los basaltos son de color gris oscuro a negro de textura afanítica que varía a fanerítica, puede ser compacta o vesicular dependiendo de su génesis, contiene plagioclasa sódica (andesina-Labradorita) (Labradorita-bytownita), con cristales de olivino y ferromagnesianos.

Holoceno Aluvión (Qhoal)

Dentro de esta unidad informal se incluyen aquellas acumulaciones de material de origen fluvial, producto de la intensa erosión de las unidades mesozoicas y volcánicas Cenozoicas y Cuaternarias, con su posterior transporte y depósito, lo cual ha originado la formación de extensas planicies aluviales y lacustres. Son sedimentos detríticos de forma subredondeada a redondeada con un rango granulométrico muy amplio desde gravas hasta arcillas.

Su espesor en algunos sitios alcanza los 100 m, aunque localmente se presentan también pequeños depósitos de terrazas aluviales con espesores de 10 a 20 m. Se le asigna arbitrariamente a esta unidad una edad del Holoceno.

4.2 Geología estructural

El origen de las estructuras identificadas se puede atribuir a dos procesos principales, uno de compresión y otro de distensión; el primero ocurrió a mediados y finales del Cretácico y el segundo durante el Paleógeno que generó Cuencas y Sierras.

Se presentan estructuras producto de deformación dúctil, representadas por las foliaciones de rumbo NW-SE con inclinación al suroeste y noreste, que se presentan en las rocas sedimentarias de la Formación Mezcalera, en las que el plegamiento de las foliaciones genera una serie de micropliegues muy cerrados. La deformación frágil es observada principalmente en las rocas sedimentarias del Cretácico Superior, manifestadas por fallas de tipo normal, en su mayoría de rumbo NW-SE con inclinaciones al suroeste y noreste.

Las deformaciones generadas como consecuencia de la subducción de la Placa del Pacífico Oriental, que se manifestó en el margen occidental de México hacia el oriente, generó esfuerzos compresivos de W-SW a E-NE, iniciando la denominada Orogenia Laramide desde el Cretácico Tardío hasta el Eoceno Tardío en varios episodios, (Araujo y Arenas, 1983); las rocas fueron comprimidas casi perpendicularmente contra la paleopenínsula de Coahuila, resultando una serie de pliegues angostos y alargados con dirección NW-SE en la región. Con la culminación de esta orogenia finaliza la deformación compresiva, y se desarrolla el vulcanismo riolítico de la Sierra Madre Occidental (Demant y Robin, 1975). Posteriormente se genera un periodo distensivo que originó una serie de fosas y pilares, acompañada con la erosión consecuente de las rocas deformadas que dieron origen a los depósitos continentales de la Formación Ahuichila. La geología estructural está influenciada por la presencia de pliegues simétricos y asimétricos, principalmente en las rocas de la zona oriente, así como fallas normales, todas con orientación NW-SE. Los pliegues se observan en las rocas sedimentarias en la sierra de Yerbanis y la sierra de San Jorge. Las fallas normales, se presentan principalmente en las rocas volcánicas, dando lugar a discontinuidades, como al norte de La Muralla.

Una serie de pliegues cerrados en superficies de estratificación forman pequeños sinclinales y anticlinales en la Formación Aurora. Anticlinales de radios de curvatura mayor, con ejes orientados y dirección NW-SE con vergencias al noreste y suroeste, se observan en esta misma unidad en La Sierrita y en los cerros Andrés. En la localidad La Sierrita los pliegues están rotos por una cabalgadura.

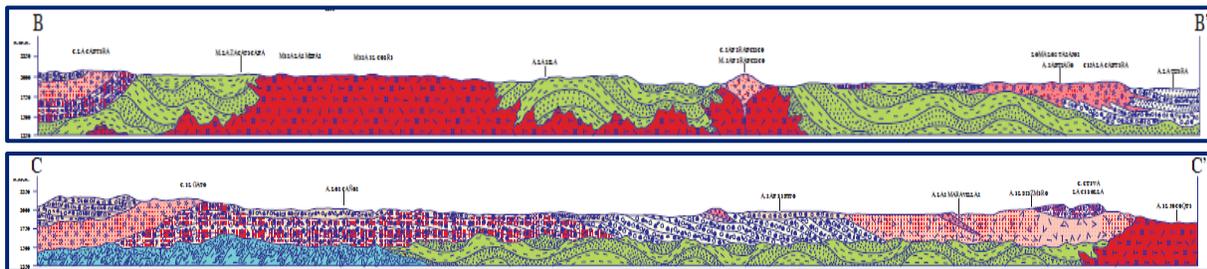
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los arroyos, así como en los depósitos de conglomerados.

Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas como son las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad las rocas calizas representan un acuífero potencial que aún no ha sido explorado y que puede presentar condiciones de semiconfinamiento.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas volcánicas, al desaparecer el fracturamiento, y a mayor profundidad las lutitas que forman parte de las secuencias cretácicas y de la secuencia que constituye la Formación Mezcalera. 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 que se produjeron durante la revolución Laramídica.



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-D75 "Juan Aldama" Esc. 1:50,000 (SGM, 2006)

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 tipo libre heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos de metros en el centro de los valles, principalmente los de origen tectónico.

La porción inferior puede alojar un acuífero de tipo confinado a semiconfinado en las areniscas, lutitas y rocas volcánicas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Su espesor confinante está constituido por lutitas interestratificadas con calizas.

A mayor profundidad las rocas calizas representan un acuífero potencial que aún no ha sido explorado y que puede estar confinado por la presencia de lutitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en el año 2010, se realizaron tres pruebas de bombeo de corta duración en etapas de abatimiento y recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Theis y Theis & Jacob. El primero se utilizó para los datos tomados en abatimiento y el segundo para los de recuperación (Tabla 2). De los resultados de la interpretación por los métodos analíticos, se establece que los valores de transmisividad varían entre 3.1×10^{-4} y 3.13×10^{-3} m²/s con un valor promedio de 1.2×10^{-3} m²/s; los valores de conductividad hidráulica varían de 3.29×10^{-5} y 1.8×10^{-4} m/s con un valor promedio de 1.0×10^{-4} m/s. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se pudieron obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos del acuífero

Aprovechamiento	Tipo	Abatimiento		Recuperación	
		T(m ² /s)	K(m/s)	T(m ² /s)	K(m/s)
CNA-1027-4	Noria	2.66×10^{-3}	1.53×10^{-4}	3.13×10^{-3}	1.80×10^{-4}
CNA-1027-15	Noria	3.10×10^{-4}	9.94×10^{-5}	3.47×10^{-4}	1.11×10^{-4}
CNA-1029-17	Noria	3.70×10^{-4}	3.29×10^{-5}	4.00×10^{-4}	3.56×10^{-5}

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en el año 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2010, que se muestra en la figura 4, los valores varían desde algunos metros, a lo largo arroyos, hasta los 60 m, aumentando gradualmente hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero.

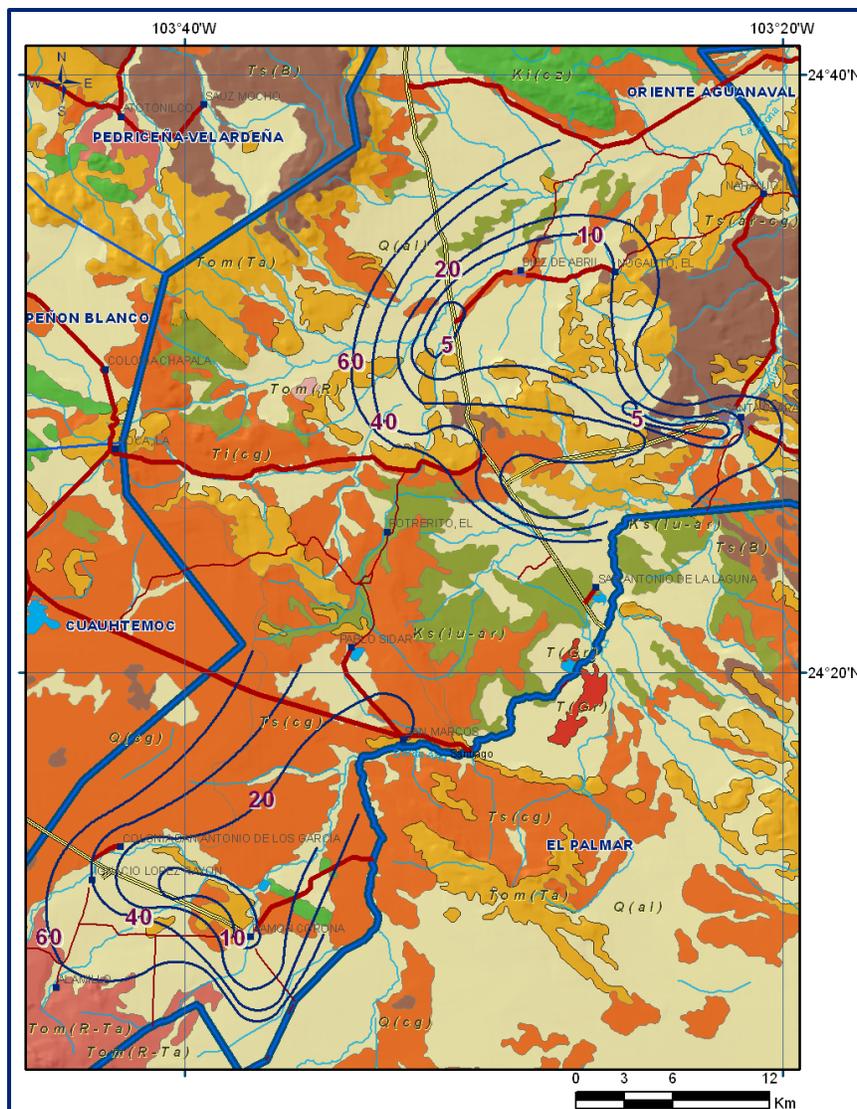


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

En cuanto a la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5, se observa que los valores varían de 2190 msnm, en el extremo sur del acuífero, hasta 1790 msnm que se presentan en su porción centro-norte, descendiendo gradualmente a lo largo del cauce de los arroyos y desde los piedemontes.

De esta manera la configuración muestra el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo. Es posible identificar la dirección preferencial del flujo subterráneo suroeste a noreste, con alimentaciones procedentes de los flancos oriental y occidental.

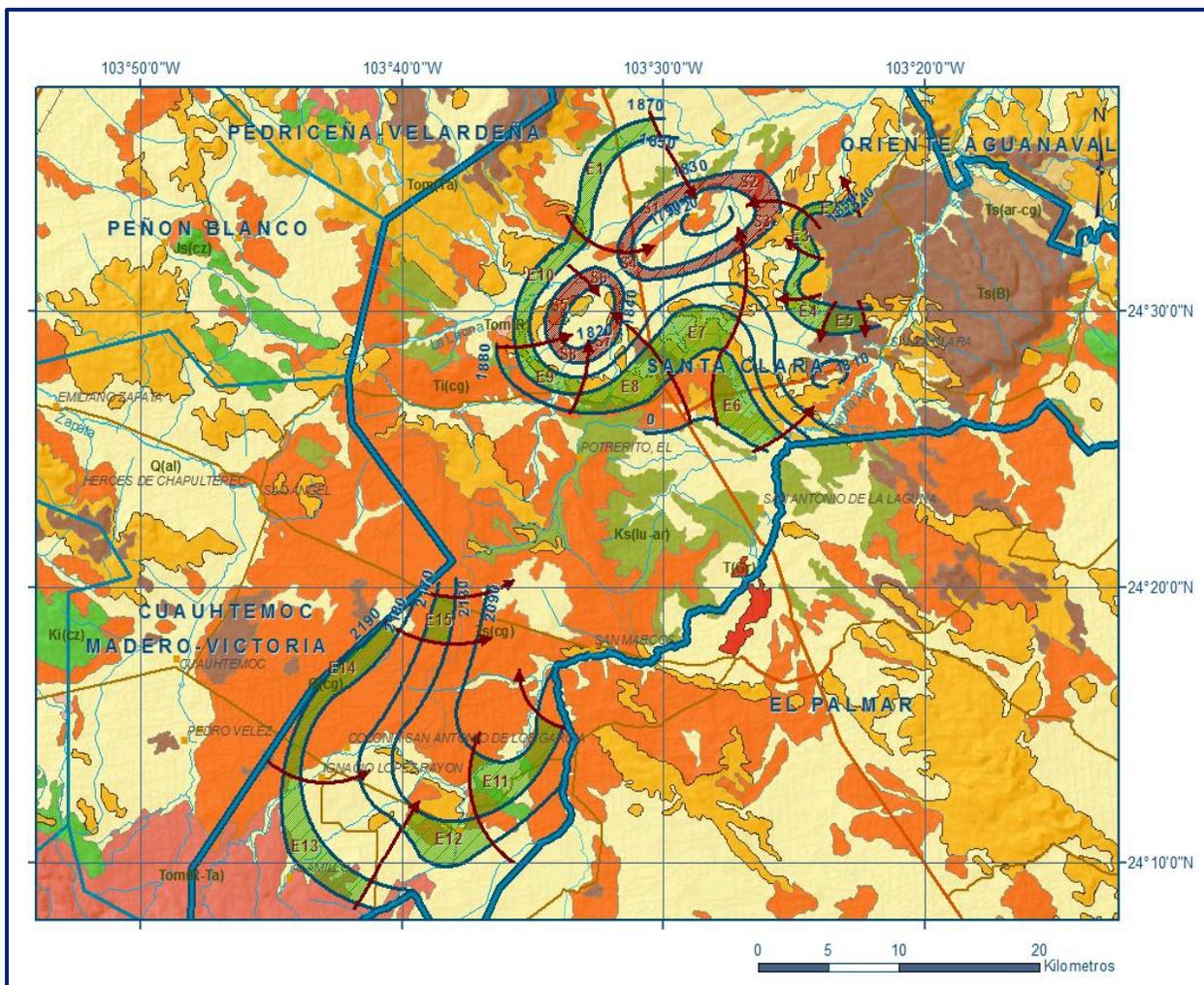


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 14 muestras de agua subterránea en aprovechamientos, pozos y norias, distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente (tabla 3).

Tabla 3. Aprovechamientos muestreados

APROVECHAMIENTO	DATUM NAD 27		pH	C.E ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (ppm)	T ($^{\circ}\text{C}$)
	X	Y				
CNA-1020-003	649138	2714527	7,2	1740	870	23
CNA-1020-010	651253	2710178	7,5	410	200	21
CNA-1020-013	653237	2703630	7,3	3460	1720	27
CNA-1020-015	653668	2716471	7,3	2680	1340	24
CNA-1020-020	659739	2716522	7,3	1420	710	25
CNA-1020-022	666652	2707795	7,4	1130	560	25
CNA-1020-023	666717	2708130	7,4	1270	630	25
CNA-1020-024	666416	2707772	7,2	1270	630	24
CNA-1020-025	665106	2707510	7,4	960	480	25
CNA-1020-031	660169	2705340	7,4	820	400	23
CNA-1020-032	659900	2707294	7,3	1320	650	23
CNA-1020-050	655368	2710013	7,4	590	290	22
CNA-1020-065	660354	2708243	7,4	980	480	18
CNA-1020-081	647678	2687338	7,3	550	270	24

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, etc., para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 200 a 1720 ppm, solo dos de ellos sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Los valores más bajos se ubican en los aprovechamientos ubicados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en los extremos oriental y occidental, mientras que los mayores se registran en la porción centro-norte, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como: C2S1 que representa agua con salinidad media y baja adsorción de sodio, C3S1 que es el tipo de agua con salinidad alta y con bajo contenido de sodio intercambiable y C4S1 agua con salinidad muy alta y nivel bajo de sodio intercambiable.

Las 2 primeras clases de agua (C2S1, C3S1), indican que es apropiada para uso en riego sin restricciones, sin embargo, la última clase (C4S1) por tener alta concentración de sales, requiere lavados de suelo y cultivos tolerantes a la salinidad.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante bicarbonatada-cálcica, que corresponde a agua de reciente infiltración que ha circulado principalmente a través de rocas sedimentarias y volcánicas.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamiento realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 113 aprovechamientos en el acuífero, de los cuales 81 son pozos y 32 norias.

El volumen de extracción se ha estimado en **5.1 hm³ anuales**, de los cuales 4.7 hm³ (92.2%) se destinan al uso agrícola, y los 0.4 hm³ restantes (7.8%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región. Un volumen muy pequeño se utiliza para satisfacer las necesidades doméstico-abrevadero.

7 BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010 en una superficie de 760 km² que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos.

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

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita sobre los depósitos aluviales y conglomerados que conforman los valles, así como la infiltración que se produce a lo largo de los escurrimientos superficiales (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo.

Debido a que el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) tiende a ser nulo, y se cuenta con información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$\mathbf{Rv + Eh - B - Sh - ETR = \pm \Delta V(S)} \quad \mathbf{(1)}$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas subterráneas por flujo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas subterráneas por flujo horizontal

ETR: Evapotranspiración real

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$\mathbf{Rv = Sh + B + ETR \pm \Delta V(S) - Eh} \quad \mathbf{(2)}$$

7.1.2 Entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemontes, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

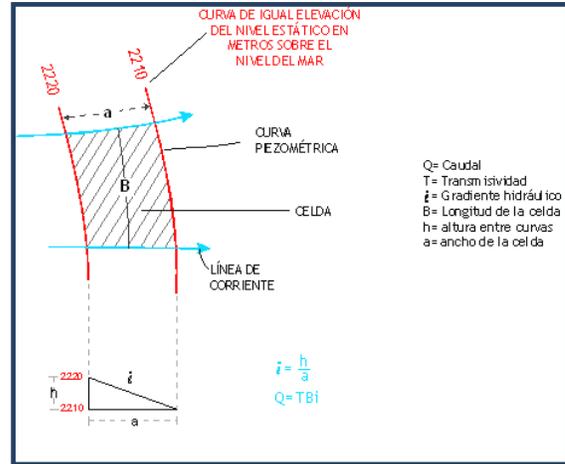
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde :

B = ancho de la celda

i = gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$); h y a son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T = transmisividad en el canal de flujo ($m^2/día$)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 4 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de **19.3 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

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	8460	1460	20	0.0137	0.0008	0.0927	2.9
E2	3500	1020	10	0.0098	0.0003	0.0103	0.3
E3	2330	1170	10	0.0085	0.0003	0.0060	0.2
E4	5830	1310	10	0.0076	0.0005	0.0223	0.7
E5	3210	1460	10	0.0068	0.0008	0.0176	0.6
E6	6410	2920	10	0.0034	0.0004	0.0088	0.3
E7	5250	3210	10	0.0031	0.0004	0.0065	0.2
E8	6420	2625	10	0.0038	0.0004	0.0098	0.3
E9	5830	1170	20	0.0171	0.0008	0.0797	2.5
E10	8750	1460	20	0.0137	0.0008	0.0959	3.0
E11	4375	1170	40	0.0342	0.0005	0.0748	2.4
E12	7290	3500	40	0.0114	0.0008	0.0667	2.1
E13	6420	3210	40	0.0125	0.0008	0.0640	2.0
E14	9625	2625	10	0.0038	0.0006	0.0220	0.7
E15	12540	1460	10	0.0068	0.0004	0.0344	1.1
Total entradas							19.3

Los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son valores promedio obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo. Estas son obtenidas tanto en el este acuífero con en los acuíferos vecinos Cuauhtémoc Madero-Victoria, Vicente Guerrero-Poanas, Peñón Blanco y Pedriceña-Velardeña, adaptadas al espesor saturado en cada zona y correlacionadas hidrogeológicamente debido a que tanto el origen como la evolución geológica son comunes en esta región del país.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por salidas horizontales (Sh), a través de evaporación directa en zonas de niveles freáticos someros (Ev) y por Bombeo (B).

No existen manantiales, ni flujo base en ríos, ya que ambos son de régimen intermitente.

7.2.1 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 la elevación del NE del año 2010, mostrada en la figura 5.

Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación.

El valor total estimado de **15.1 hm³ anuales** se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de Salidas subterráneas por flujo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	7580	875	10	0.0114	0.0010	0.0866	2.7
S2	6710	1020	10	0.0098	0.0010	0.0658	2.1
S3	4375	1165	10	0.0086	0.0010	0.0376	1.2
S4	8750	1310	10	0.0076	0.0010	0.0668	2.1
S5	4670	1460	20	0.0137	0.0004	0.0256	0.8
S6	3790	1170	20	0.0171	0.0010	0.0648	2.0
S7	4080	875	20	0.0229	0.0010	0.0933	2.9
S8	2330	1170	20	0.0171	0.0010	0.0398	1.3
Total entradas							15.1

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

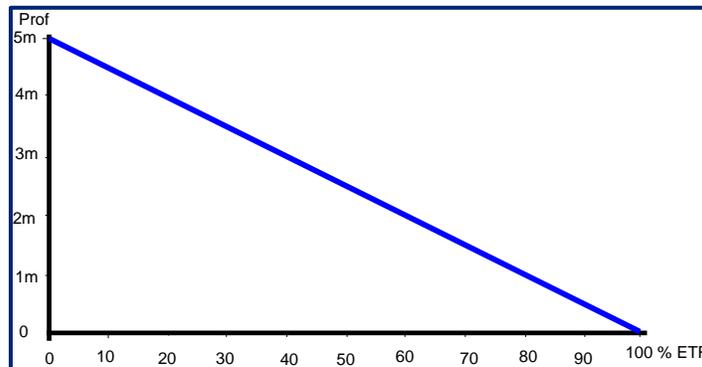
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real).

Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	17.3		
P(mm) =	442.9	P ² =	196160.41
L =	991.38585	L ² =	982845.9036
ETR (mm)	422.4		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el 50 % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior.

Tomando en cuenta una superficie de 10 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 2.5 m y la lámina de evapotranspiración obtenida de 422.4 mm (con valores de 442.95 mm anuales para la precipitación y 17.3 °C de temperatura).

$$ETR = 10 \text{ km}^2 (0.4224 \text{ m}) (0.5) = 2.1$$

Por lo tanto; **ETR = 2.1 hm³/año.**

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es del orden de los **5.1 hm³ anuales.**

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento. Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, **$\Delta V(S) = 0.$**

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se procedió a evaluar la recarga vertical por lluvia.

$$\mathbf{Rv = Sh + B + ETR \pm \Delta V(S) - Eh}$$

$$\mathbf{Rv = 15.1 + 5.1 + 2.1 - 0.0 - 19.3}$$

$$\mathbf{Rv = 3.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

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

$$\mathbf{R = Rv + Eh}$$

$$\mathbf{R = 19.3 + 3.0}$$

$$\mathbf{R = 22.3 \text{ hm}^3}$$

8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que, en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\text{DMA} = \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS}$$

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 de manera natural como inducida. Para este caso particular, su valor es de **22.3 hm³/año**.

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 Santa Clara, la descarga por flujo subterráneo ocurre dentro del acuífero, por lo que no se consideran descargas naturales comprometidas. **DNC = 0.0 hm³ anuales.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **18,716,083 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 22.3 - 0.0 - 18.716083 \\ \text{DMA} &= 3.583917 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **3,583,917 m³ anuales**.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de su disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero en la que actualmente existe información hidrogeológica para su evaluación. No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor; sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere al registro periódico piezométrico y ejecución de pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2006. Estudio para el respaldo de la disponibilidad media anual de agua en dos acuíferos del estado de Durango. Realizado por convenio con el Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior Ingeniería y Arquitectura.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para Determinar la Disponibilidad de los Acuíferos Cabrera-Ocampo, Matalotes-El Oro, San José de Nazareno, Galena-El Quemado, La Victoria, Buenos Aires, Torreón de Cañas, San Fermín, San Juan del Río, Cabrera, La Zarca-Revolución y Revolución, estado de Durango. Realizado por convenio con la Universidad de Sonora

Comisión Nacional del Agua 2010. Estudio para Determinar la Disponibilidad del acuífero Santa Clara, en el estado de Durango. Realizado por convenio con la Universidad de Sonora.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1979. Estudio Geofísico de las áreas de Cuauhtémoc y Peñón Blanco, Estado de Durango. Realizado por la empresa Consultores en Aguas Subterráneas S. A.,

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. Estudio de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos de la Zona de Cuencamé-Santa Clara. Realizado por la empresa Estudios Físicos de la Tierra, S.A.