

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO PUERTO MADERO (3224) ESTADO DE
ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia fisiográfica.....	6
3.2	Clima.....	7
3.3	Hidrografía	8
3.4	Geomorfología.....	8
4	GEOLOGÍA	9
4.1	Estratigrafía	10
4.2	Geología estructural	18
4.3	Geología del subsuelo	20
5	HIDROGEOLOGÍA.....	22
5.1	Tipo de acuífero	22
5.2	Parámetros hidráulicos.....	22
5.3	Piezometría	23
5.4	Comportamiento hidráulico.....	23
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	23
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	24
5.4.3	Evolución del nivel estático	25
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	26
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	27
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	28
7.1	Entradas	28
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	29
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	29
7.1.3	Recarga incidental (Rr).....	30
7.2	Salidas.....	31
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	31
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	31
8	DISPONIBILIDAD	32
8.1	Recarga total media anual (R).....	33
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	33
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	33
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	34
9	BIBLIOGRAFÍA	35

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 Puerto Madero, definido con la clave 3224 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-oriental del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de San Luis Potosí, entre los paralelos 23°16' y 23°47' de latitud norte y entre los meridianos 101°36' y 102°22' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,931 km².

Limita al norte con los acuíferos El Cardito y Guadalupe de las Corrientes; al suroeste con Chupaderos, y al oeste con Guadalupe de las Corrientes.

Todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas; al sur con el acuífero El Barril y al este con Santo Domingo, ambos pertenecientes al estado de San Luis Potosí (figura 1). Geopolíticamente su territorio se ubica totalmente en el municipio de Villa de Cos.



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.

ACUIFERO 3224 PUERTO MADERO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	45	45.1	23	27	25.3	DEL 1AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	102	17	5.5	23	16	20.8	
3	102	19	46.1	23	16	59.6	
4	102	20	35.1	23	18	25.1	
5	102	20	10.3	23	21	10.5	
6	102	21	16.3	23	24	27.3	
7	102	18	10.5	23	31	52.8	
8	102	14	23.4	23	34	27.8	
9	102	15	10.2	23	38	0.5	
10	102	4	38.3	23	39	51.2	
11	102	3	22.7	23	44	44.8	
12	101	58	54.1	23	46	15.2	
13	101	56	6.4	23	44	19.3	
14	101	47	58.9	23	42	34.6	
15	101	39	8.0	23	36	3.7	
16	101	36	42.9	23	34	40.1	DEL 16 AL 1POR EL LIMITE ESTATAL
1	101	45	45.1	23	27	25.3	

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

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero 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. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del decreto de veda;

Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de los Municipios de Fresnillo y Villa de Cos y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en esos Municipios” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de abril de 1981. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El uso principal 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 el área que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios de exploración geológica e hidrogeológica de evaluación, algunos de cobertura regional o en acuíferos vecinos. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIOS ELÉCTRICOS DE RESISTIVIDAD EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado en 1981 por Compañía Mexicana Aerofoto S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). El estudio tuvo como objetivo realizar sondeos eléctricos realizados en algunas localidades de la zona de estudio, para evaluar el potencial hidrogeológico de los sitios explorados e identificar los sitios más adecuados para la perforación de pozos para uso agrícola.

ACTUALIZACIÓN DE ESTUDIOS GEOHIDROLÓGICOS DE LA PORCIÓN NORESTE DEL ESTADO DE ZACATECAS (ACUÍFERO PUERTO MADERO). Realizado en el año 2000 por GEOFISICA DE EXPLORACIONES GUYSA, S.A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua y la Unión Agrícola Regional de Productores de Frijol y Granos Básico Francisco Villa. El estudio tuvo como objetivo general determinar las condiciones geohidrológicas del acuífero y recabar información para calcular su recarga. Mediante la realización de actividades de campo, que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total anual y determinar su disponibilidad media anual.

Concluye que el acuífero se encontraba en condición de sobreexplotación ya que la magnitud de la extracción superaba al valor de la recarga total media anual

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS DE: GUADALUPE DE LAS CORRIENTES, PUERTO MADERO, VILLA HIDALGO, PINOS Y ESPÍRITU SANTO. Realizado en 2010 por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C., para la Comisión Nacional del Agua. Los trabajos contemplaron actualizar el conocimiento del flujo subterráneo y mediciones piezométricas mediante la definición de una red de pozos de monitoreo para elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea. Consideró además la nivelación de brocales y toma de muestra de agua para análisis fisicoquímico; con la información generada y recopilada plantea el balance de aguas y determina la disponibilidad.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO PUERTO MADERO, ZACATECAS.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2015. Se utilizó la información piezométrica reciente para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

El último estudio y la piezometría obtenida por la Dirección Local Zacatecas, son la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se ubica totalmente en la Provincia Fisiográfica Mesa Central. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica Mesa del Centro, en dos subprovincias, la mayor parte de la superficie en la Subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas; una pequeña porción de su extremo norte y la región nororiental se localizan en la Subprovincia Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande. 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 Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas domina extensos terrenos áridos con lomeríos y sierras bajas sobre una gran llanura desértica situada a unos 2000 m de altitud con piso de caliche; en tanto que 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 a sur.

El paisaje de relieve dentro del área se caracteriza por la presencia de los siguientes sistemas de topoformas: bajada con lomerío, bajada típica, llanura aluvial, llanura desértica con piso rocoso o cementado, lomerío con bajadas, lomerío típico, sierra baja escarpada y sierra baja plegada.

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 predomina el clima de tipo BS₀kw, seco, templado, con condición de canícula hacia la parte norte de la zona en estudio; en la porción sur, se presenta el clima semiseco subtipo BS₁kw semiseco templado.

El clima es seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo seco (0), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), es una característica establecida considerando la temperatura media anual del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido.

El régimen de lluvia (w), define el comportamiento de la lluvia durante el año, indica la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, en este caso es en verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año.

El último término (w) indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual), varía entre 5 y 10.2. Se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C, la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 7 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero: San Juan del Salado, Agua Nueva, Villa de Cos, Tierra y Libertad, Sierra Hermosa, San Andrés, y Concepción de la Norma, cuyo registro que comprende el periodo 1980-2009. Con estos datos y utilizando el método de isoyetas e isotermas, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **348 mm y 15.6 °C**, respectivamente.

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

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 37 “El Salado”, cuenca “Fresnillo-Yesca”. 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.

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. Todo este conjunto hidrográfico está constituido por una serie de cuencas cerradas de muy diferentes dimensiones. En su mayor extensión carece de corrientes superficiales permanentes, sólo existen escurrimientos efímeros en las partes topográficamente más altas

Localmente, el acuífero se localiza casi en su totalidad en la subcuenca “Yesca” la cual carece de corrientes de importancia, solo algunos arroyos presentan escurrimientos en temporadas de lluvia. La infraestructura hidráulica está representada por una serie de bordos y algunas lagunas efímeras en las regiones topográficamente más bajas, entre las que destacan la conocidas con los nombres de San Andrés, Las Hermanas, La Loma, Víboras, El Pinto, Los Pobres y la más importante que es Santa Clara, que se localiza fuera del área del acuífero, en el acuífero vecino El Barril, en el estado de San Luis Potosí, hacia donde fluye el escurrimiento superficial.

3.4 Geomorfología

Entre las geoformas características de la región donde se ubica el área pueden distinguirse sierras, lomeríos y llanuras aluviales.

Las sierras se encuentran separadas por amplias llanuras aluviales y aumentan en magnitud hacia el norte del área. En la porción nororiental se localiza la Sierra La Sarteneja y al oriente, en territorio del estado de San Luis Potosí, la Sierra El Sabinal; ambas presentan forma alargada con orientación general ligeramente hacia el noroeste, cuyas elevaciones varían de 2150 a 2600 msnm, que destacan sobre las extensas llanuras aluviales. Los sedimentos marinos que forman la mayor parte de estas montañas se presentan fuertemente plegadas y la intensa erosión que ha actuado sobre ellas ha contribuido al modelado de las actuales formas. El drenaje que presentan es de tipo radial.

Los lomeríos se encuentran distribuidos en la región noroccidental; su forma y elevación están condicionadas por las rocas que los conforman: las lutitas y areniscas de la Formación Caracol dan lugar a lomeríos amplios y de poca altura; las calizas y lutitas de la Formación Indidura originan lomas alargadas de suave relieve y poca altura; mientras que las formaciones Cuesta del Cura y Cupido presentan cerros aislados redondeados con alturas de 50 y 100 m; son de morfología muy suave y presentan un horizonte petroclástico impermeable de muy poca profundidad.

Mientras que en la porción baja, correspondiente al llano de piso rocoso que cubre la mayor parte del territorio, se presentan suelos profundos en los cuales se desarrolla la actividad agrícola.

Los cerros están erosionados en forma característica, redondeados y con pendientes suaves, en cuya base se han acumulado depósitos de pie de monte, que continúan hacia las llanuras aluviales extensas y poco inclinadas.

Las llanuras aluviales se encuentran principalmente en la región central del área, tienen un relieve relativamente plano con ligeras ondulaciones y un drenaje muy escaso e intermitente de tipo endorreico, sin corrientes superficiales de importancia, en las porciones altas donde afloran las calizas el tipo de drenaje es dendrítico e intermitente.

Están formadas por pequeños grabens tectónicos, que fueron rellenados por depósitos aluviales durante el Terciario y Cuaternario, depósitos lacustres y por rocas ígneas vulcanoclásticas, cuyos espesores varían de 100 a 300 m.

4 GEOLOGÍA

La región se ubica en la provincia geológica del Altiplano Mexicano, en su límite occidental con la provincia Sierra Madre Occidental; en ella se presentan tres ambientes geológicos definidos: los Terrenos Tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1987) Parral, Guerrero y Sierra Madre, cuyos límites entre ellos se infiere que son tectónicos.

De estos terrenos, en la zona sólo está representado el Terreno Sierra Madre. Del Terreno Parral se podría interpretar la existencia de cambios de facies con la cubierta del Terreno Sierra Madre ya que afloran capas masivas de brechas calcáreas de facies de talud de posible edad Cretácico Inferior.

El basamento del Terreno Sierra Madre o Cuenca Mesozoica del Centro De México, está constituido por filitas y metareniscas con novaculitas de la Formación Taray, de posible edad Triásico Inferior-Medio que afloran en la Sierra de Teyra.

La cubre en discordancia derrames y tobas de andesita, dacita, riolita con horizontes de limolita y areniscas con metamorfismo que presentan facies de esquistos verdes, que constituyen la Formación Rodeo-Nazas, de edad Triásico Medio a Jurásico Inferior. También muestra metamorfismo dinámico progresivo. (Figura 2.)

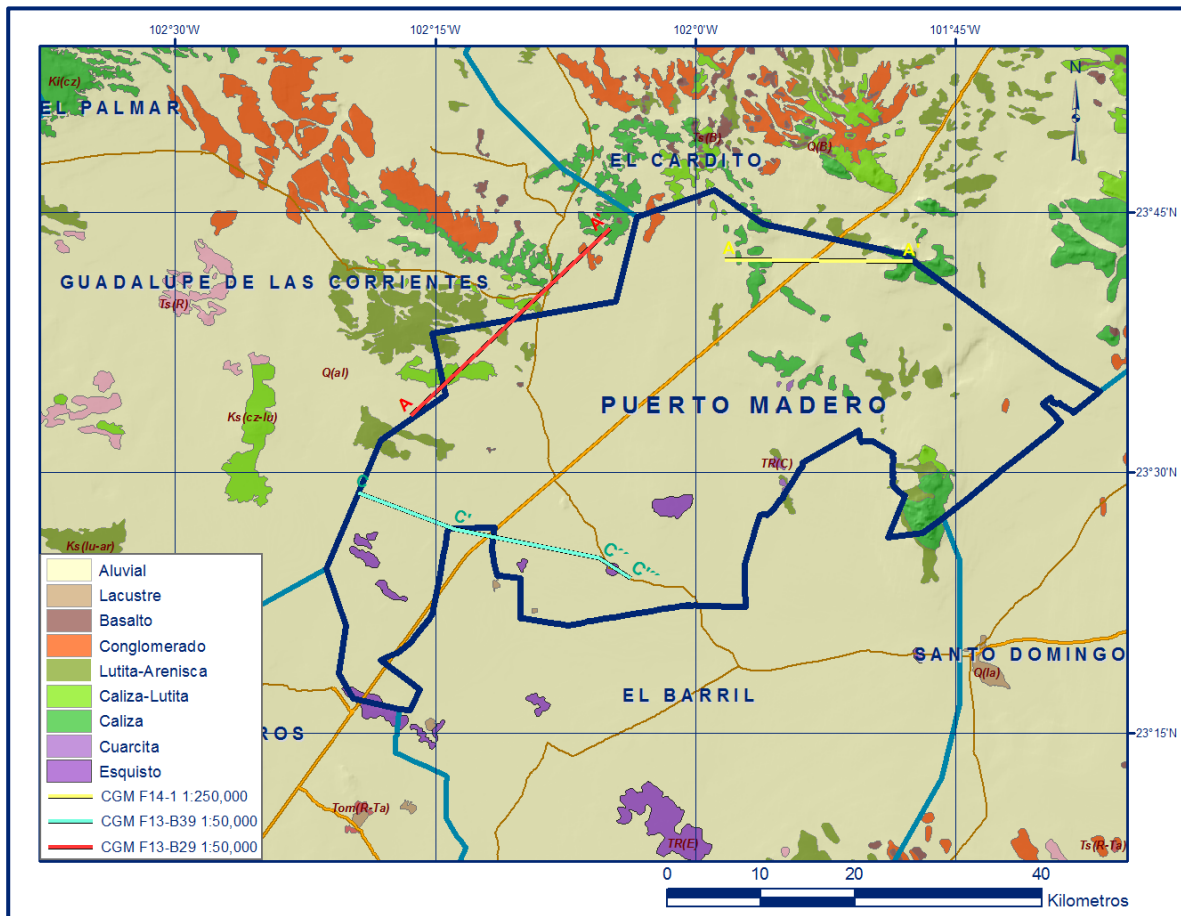


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La columna geológica de la zona de estudio, está constituida por rocas sedimentarias y materiales volcánicos, cuyas edades varían del Triásico al Reciente distribuidos principalmente en el Terreno Tectonoestratigráfico Sierra Madre, su distribución geográfica se muestra en la figura 2.

TERRENO GUERRERO

JURÁSICO-CRETÁCICO INFERIOR

Formación Chilitos

Término informal propuesto por De Cserna (1972) para denominar a una secuencia vulcanosedimentaria conformada por lavas masivas y almohadilladas de composición basáltica-andesítica.

Con intercalaciones de rocas sedimentarias, vulcanoclásticas y calcáreas, metamorfizadas en facies de esquistos verdes, que cabalgan a la Formación Zacatecas, cuya edad tentativamente se le asignó al Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

Esta unidad es la principal receptora de los yacimientos de oro, plata y polimetálicos. En el área del acuífero está representada por una secuencia vulcanosedimentaria constituida por derrames de andesita y estratos delgados a medianos de caliza, de edad Tithoniano-Neocomiano.

Esta formación presenta dos cambios laterales de facies; la primera es una secuencia de areniscas y lutitas de estratificación delgada a mediana, correlacionable con la Formación Valdecañas. La segunda es una secuencia de areniscas y calizas de estratificación delgada a mediana, correlacionable con la parte superior de la Formación Valdecañas.

En ambas unidades se presentan intercalaciones de rocas volcánicas extrusivas y, muy puntualmente, la unidad de areniscas-calizas está intrusionada por un cuerpo ígneo de composición dioríticas, de edad Cretácico Inferior.

Este cuerpo diorítico se encuentra afectando principalmente a la unidad de areniscas-calizas de la Formación Valdecañas y no se observa cortando a las unidades del Terreno Sierra Madre, por lo que se puede interpretar como parte del paquete alóctono que conforma a las rocas del Terreno Guerrero.

De acuerdo con el SGM (1991), la edad de estas formaciones ha sido determinada con base en su contenido faunístico, consistente en amonitas colectadas en el arroyo Chilitos y radiolarios colectados en Pánfilo Natera, y se le ha asignado una edad del Cretácico Inferior, correlacionada con la Formación Taraises del Terreno Sierra Madre.

TERRENO SIERRA MADRE (CUENCA MESOZOICA DEL CENTRO DE MÉXICO)

TRIÁSICO

Formación Zacatecas

Nombre con el que Carrillo Bravo (1971) se refirió a una secuencia de filitas y metalutitas sericitizadas con nódulos de cuarzo, meta-areniscas, metatobas, metaconglomerados y metacalizas, interestratificadas con filitas, sobre las cuales sobreyace transicionalmente metalavas de composición andesítico-basáltica; todas ellas con metamorfismo de facies de esquistos verdes, que afloran al noroeste y sureste de la ciudad de Zacatecas.

Con base en los restos fósiles Burckhardt y Scalia (1906), la dataron en el Triásico Superior. Dentro del área de estudio se encuentran distribuidas principalmente al norte y noroeste del poblado Guadalupe.

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

Las cuarcitas son de color gris rosáceo amarillento, muy compactas; las calizas se presentan en forma de cuerpos lenticulares, de color gris y se encuentran recrystalizadas. En las cuarcitas y filitas se llegan a presentar lentes de cuarzo lechoso, seguramente producto de los procesos hidrotermales.

En los trabajos consultados no se tiene reportado el espesor de la unidad, por lo que se asume que su potencia corresponde con los 1,000 m que le asignó Mc Ghee en 1977. La base de la unidad no se observa, en tanto que su contacto superior con la Formación Chilitos es tectónico (Centeno, 1997).

La edad estimada para esta formación es del Triásico Superior. Su depósito se considera que ocurrió en un ambiente marino marginal.

JURÁSICO

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 al noreste y sureste de Villa de Cos. De acuerdo con su carácter litológico y a su posición estructural se considera que los materiales que la conforman corresponden a un depósito de tipo “molasse” en un ambiente continental, con una intensa actividad volcánica y fallamiento en bloque, el cual estuvo asociado a un vulcanismo de composición calcoalcalino relacionado con la rápida apertura del Golfo de México.

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 1200 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 zona del acuífero está representada por un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos de areniscas y lutitas, cuyo espesor aproximado es de 50 m.

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, sobreyaciendo 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 Mimbres 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. Su espesor promedio en esta área se ha estimado entre 350 y 500 m. Su depósito ocurrió en una plataforma lagunar de aguas someras y tranquilas, templadas a cálidas, con buena oxigenación y poca influencia de arcillas, lo que permitió el desarrollo y crecimiento de abundantes organismos.

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. Aflora en el área del acuífero en la porción noroccidental de la Sierra de Guadalupe, en el acuífero vecino Guadalupe de las Corrientes. Su espesor varía de unos cuantos metros hasta 100 m. El contacto inferior es transicional y concordante con la Formación Cupido, mientras que su contacto superior es nítido y concordante con la Formación Cuesta del Cura. Su depósito ocurrió en un medio ambiente de mar abierto, en aguas sensiblemente profundas, bajo condiciones tectónicas inestable, lo que ocasionó el aporte abundante de sedimentos clásticos finos.

Formación Cuesta del Cura

Secuencia de calizas compactas, de estratificación delgada y ondulada, con nódulos y bandas de pedernal e intercalaciones delgadas de arcilla, que aflora en la porción noroccidental del área, sobre todo en la Sierra de Guadalupe. La unidad consiste de calizas tipo “mudstone”, dispuestas en capas que varían de 10 a 25 cm de potencia, cuyo espesor total es del orden de 200 a 300 m. La relación con la Formación La Peña es por medio de contacto nítido, mientras que el contacto superior con los sedimentos calcáreos-arcillosos de la Formación Indidura es concordante. El depósito de esta unidad se llevó a cabo en una zona de mar abierto, en un ambiente de cuenca poco profunda.

Formación Indidura

Se encuentra constituida en general por una secuencia calcárea arcillosa, conformada por calizas arcillosas, en capas que varían en espesor de 5 a 40 cm, con intercalaciones de calizas y lutitas calcáreas laminares.

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 es de 200 m; sobreyace de manera concordante a la Formación Cuesta del Cura y subyace de igual manera la Formación Caracol. Su depósito ocurrió en un medio ambiente de mar abierto, con una aportación intermitente de clásticos pelíticos, bajo condiciones tectónicas inestables de relleno de cuenca.

Formación Caracol

Unidad compuesta de areniscas de grano medio, con cementante calcáreo y matriz arcillosa, en capas de 20 cm de espesor, que muestran estratificación cruzada y turboglifos; intercaladas con limolitas y lutitas, y ocasionalmente con margas.

Las lutitas son moderadamente calcáreas y suaves, 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.

Se estima que su espesor puede alcanzar los 1000 m de potencia; en el área, el contacto inferior con la Formación Indidura es transicional y concordante; mientras que el superior está cubierto de manera discordante por materiales más recientes.

Los afloramientos se encuentran ampliamente distribuidos en toda el área.

TERCIARIO

Conglomerado polimíctico

Se presenta estratificado, medianamente clasificado y constituido por fragmentos del tamaño de grava, con horizontes arenosos de grano fino a grueso, matriz y cementante de carbonato de calcio.

Ocasionalmente con estratificación cruzada; que afloran de manera aislada al NW y S de los poblados Santa Clara, Banderillas y el NW de la Laguna San José Caligüey.

Rocas volcánicas riolíticas-intermedias

Se denomina con este nombre a una secuencia de rocas piroclásticas en la base y un grueso paquete de riolitas fluidales en la cima.

Los piroclásticos que subyacen al cuerpo de riolita están conformados por tobas arenosas, pómez y lapilli. Se estima un espesor máximo del orden de 100 m; en la mayor parte del área sobreyace y subyace de manera discordante a las formaciones Caracol y depósitos aluviales más recientes, respectivamente. Se acumuló aun cuando se depositaba el conglomerado polimíctico y posteriormente también, está representado por eventos de nubes rasantes y tobas vítreas, muestra color café claro a rosáceo, de matriz parcialmente desvitrificada.

Caliza y depósitos lacustres

Sedimentos lacustres que rellenan una fosa tectónica ubicada principalmente en las lagunas Santa María, Saldivar, La Prieta, Santa Clara y San José Caligüey; presentan coloración que varía de blanco a café rosáceo, con horizontes evaporíticos de yeso en mantos y fracturas y ocasionalmente interestratificados con horizontes de conglomerados, embebidos todos estos elementos en una matriz calcoarcillosa-arenosa y precipitación de caliche.

Durante la depositación de los sedimentos lacustres se llevó a cabo un depósito de carbonatos en cuencas secundarias o en zonas cercanas a las márgenes de la cuenca, dando origen a una caliza, que por correlación estratigráfica se le asignó una edad Oligoceno-Mioceno. Sus afloramientos se restringen a la laguna San José de Caligüey y en algunos pozos artesianos; es una caliza biomicrítica, terrígena, sedimentaria de origen lacustre.

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 amigdaloides, con relleno de cuarzo y calcita, que aflora de manera aislada en la porción oriental del acuífero. Representan la segunda etapa de vulcanismo, al parecer de tipo fisural, posiblemente asociada a una distensión ocurrida durante el Terciario, a través de lineamientos de dirección NW-SE. Aflora de manera aislada.

CUATERNARIO

Conglomerado polimíctico

Cubre discordantemente a las unidades anteriores y es producto posiblemente de la desecación y agrietamiento ocurridos durante la retirada temporal de aguas someras y el subsiguiente desplazamiento durante las crecidas.

Depósitos aluviales

Los materiales que constituyen esta unidad se encuentran rellenando las depresiones, generalmente sinclinales y pequeñas fosas tectónicas, así como llanuras de piedemonte y llanuras aluviales que forman los rellenos de cuencas cerradas, denominadas bolsones.

Se encuentran representados en el área por depósitos de talud, terrazas aluviales, depósitos de acarreo en cauces de arroyos, así como en suelos residuales, limos y arcillas, que fueron depositados en las partes bajas y planas.

Se encuentran cubriendo a rocas cretácicas y terciarias y tienen una distribución muy extensa en el área.

4.2 Geología estructural

Estructuralmente la región se caracteriza por la abundancia de plegamientos, cuyos ejes de simetría presentan una orientación general NW-SE y NE-SW, algunos de ellos afectados por fallas inversas y cabalgamientos que son el resultado de procesos compresivos desarrollados posiblemente a fines del Cretácico y principio del Terciario (Pérez y Benítez, 1990) en el occidente del continente.

Durante el Terciario principalmente en el Eoceno, se llevó a cabo el emplazamiento de cuerpos ígneos intrusivos (stocks) originados por una fase distensiva que generó fallas y grabens con orientación NW-SE (Carta Geológico-Minera Matehuala F14-1, escala 1:250,000. SGM, 1996). El marco estructural regional está definido por los contactos de los Terrenos Guerrero, Parral y Sierra Madre, cuyos límites se caracterizan por presentar sistemas complejos de plegamientos asociados a cabalgaduras en un régimen de deformación dúctil. Se interpreta que el evento ocurrió durante la Orogenia Laramide en donde el Terreno Guerrero cabalgó sobre los Terrenos Sierra Madre y Parral.

Esta deformación, al interior del Terreno Sierra Madre, causó plegamiento formando anticlinales y sinclinales de rumbo NW-SE, con apilamiento de cabalgaduras en la Sierra de Guadalupe de las Corrientes, en un estilo de deformación contrastante al que existe en la región SW de la zona. Posterior al evento laramídico se desarrolló un evento distensivo con componente lateral izquierda, que causó zonas de cizallamiento que sirvieron para la inyección de intrusiones multifásicas de granitoides hipoabisales y domos, así como la extrusión de rocas volcánicas félsicas (Carta Geológico-Minera Fresnillo F13-3, escala 1:250,000. SGM, 1998).

Localmente, las estructuras presentes en la secuencia vulcanosedimentaria al parecer fueron generadas por eventos compresivos orogénicos, asociados a la acreción del arco volcánico del Jurásico Superior, en el cual se desarrolló un depósito extenso de terrígenos en la cuenca post-arco (cuenca Mesozoica del Centro de México).

A finales del Cretácico Inferior el Terreno Guerrero se amalgama con el Terreno Sierra Madre por medio de un ensamble tectónico y a fines del Cretácico Superior, con la Orogenia Laramide del Cretácico Superior-Eoceno, las unidades de ambos fueron deformadas.

Después de la Orogenia Laramide ocurrió una fase distensiva que generó fallas normales de orientación NE-SW, como las conocidas con el nombre Cerro La Culebra, Cerros Prietos, Laguna Las Hormigas y Cerro San Julián, y con dirección NW-SE entre las que destacan Cerro La Mariola y Bajío Las Coloradas; ambas muestran basculamiento al NW y SE.

La deformación dúctil-frágil se manifiesta por cabalgamientos como es la Loma La Majada Blanca y Cerro El Jabalí, donde están involucradas las unidades mesozoicas de los terrenos Guerrero y Sierra Madre. El marco tectónico que domina la región de la Mesa del Centro son los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide y los posteriores eventos distensivos del Oligoceno-Mioceno que afectaron a las rocas mesozoicas y cenozoicas (Carta Geológico-Minera La Abundancia F13-B29, escala 1:50,000. SGM, 2009).

Las estructuras desarrolladas en la secuencia vulcanosedimentaria corresponden a pliegues cerrados cuyos planos axiales tienen orientaciones al NE-SW y NW-SE. Las estructuras están recostadas preferentemente hacia el NE y en menor proporción al NW; son pliegues de escala métrica generados por eventos compresivos orogénicos, asociados a la acreción de un arco volcánico durante el Cretácico Superior.

Después de la Orogenia Laramide ocurrió una serie de eventos extensivos que generaron fallas normales de orientación NE-SW y NW-SE, los cuales al parecer segmentaron altos del basamento y muestran basculamientos al SW.

El sistema anterior es disectado por fallas NE-SW, con un pobre basculamiento al NW, para finalmente, con un evento de extensión tardío, se marca un sistema de fallas N-S. La formación de fallas normales en el Terciario.

Está asociada a dos fenómenos principales, el primero como respuesta a los fenómenos tectónicos y térmicos que resultaron del choque y subducción de la dorsal del Pacífico Oriental bajo la placa norteamericana (hace aproximadamente 30 Ma.) y el segundo a cambios de la velocidad de convergencia de las placas continental y oceánica en el occidente de México; se interpreta que estos fenómenos originaron las pulsaciones de actividad volcánica. La formación de un arco volcánico sobre la corteza oceánica presenta una historia compleja de sedimentación y vulcanismo.

En sus proximidades pueden ocurrir una serie de intrusiones, como diques e intrusivos generadores de fluidos hidrotermales, que se desarrollan a partir de los centros de emisión, dando origen a depósitos minerales importantes como Fresnillo y Zacatecas y los vulcanosedimentarios de Francisco I. Madero. Estos depósitos son un ejemplo de los yacimientos que se han desarrollado en las rocas del Terreno Guerrero, en donde la estratigrafía, así como la estructura o estructuras, juegan un papel importante en la generación de estos yacimientos.

Como se mencionó anteriormente, la tectónica del Terciario se desarrolló en un régimen de extensión que generó fallamiento normal y vulcanismo asociado, el cual en esta zona es principalmente piroclástico y de carácter riolítico.

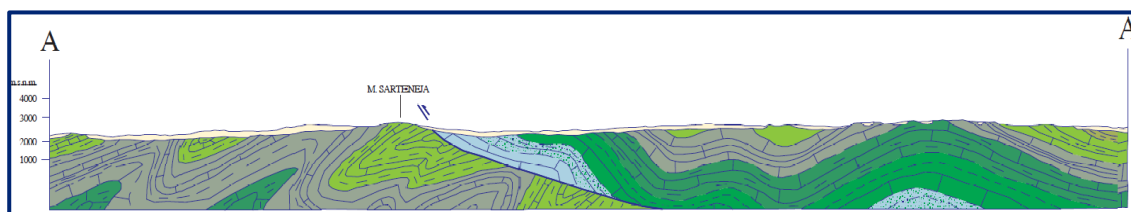
Este fenómeno ha sido asociado a dos eventos principalmente: un aumento en la velocidad de convergencia de las placas Norteamericana y Pacífica y a la subducción y choque de la Dorsal del Pacífico Oriental bajo la Placa Norteamericana, en este régimen extensivo se originaron sistemas hidrotermales que dieron origen a depósitos minerales epitermales de manganeso y mercurio, con algunos metales base, en la región (Carta Geológico-Minera El Rucio F13-B39, escala 1:50,000. SGM, 2001).

4.3 Geología del subsuelo

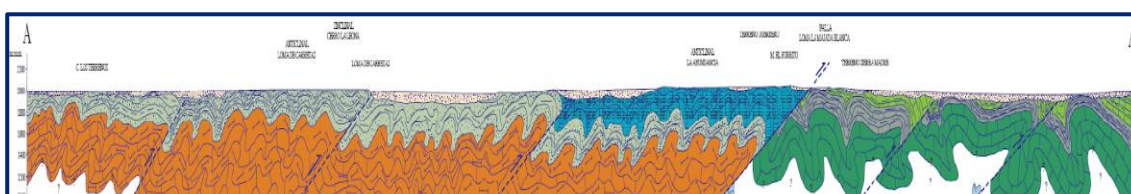
De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, se puede afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares, y los conglomerados polimícticos que rellenan los valles. 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, así como rocas volcánicas, 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 rocas metamórficas y la secuencia de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas.

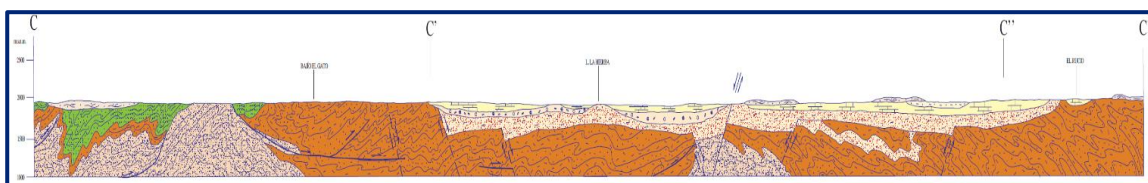
A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de calizas arcillosas y lutitas de las formaciones La Peña e Indidura (figura 3). El espesor de este acuífero puede alcanzar 400 m. Debajo de este paquete de rocas existe un acuífero alojado en rocas calizas que puede presentar condiciones de semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas. Sus fronteras al flujo subterráneo y basamento están constituidas por las lutitas, limolitas y areniscas, que constituyen la Formación Nazas.



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-1, Matehuala. Esc. 1:250,000 (SGM, 1996)



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B29, La Abundancia. Esc. 1:50,000 (SGM, 2009)



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B39, El Rucio. Esc. 1:50,000 (SGM, 2001)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, los cortes litológicos de algunos pozos así como la correlación con otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, 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 y conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede 200 m en la porción central del valle. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua en la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas de la Formación Caracol, y en menor proporción rocas volcánicas, 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.

5.2 Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas que constituyen el acuífero se analizó la información de pruebas de bombeo de corta duración realizadas en estudios previos en este y otros acuíferos vecinos. De acuerdo a la caracterización de la geología del subsuelo y a la interpretación de resultados, se puede afirmar que la mayoría de las pruebas muestran un acuífero libre alojado en un medio granular con efecto de drenaje diferido.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad obtenidos varían de **2.3×10^{-5} a 7.2×10^{-3} m²/s**; si consideramos que el espesor saturado varía de 70 a 170 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **1.15×10^{-7} a 5.1×10^{-5} m/s (0.01 a 4.4 m/d)**.

Los valores más altos corresponden sedimentos clásticos de mayor granulometría o rocas volcánicas, en tanto que los más bajos se presentan en las lutitas, areniscas y conglomerados cementados.

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 adoptó un valor de rendimiento específico promedio de **0.01**, considerando los materiales aluviales arcillo arenosos y las rocas arcillosas de la Formación Caracol, que constituyen el acuífero en explotación.

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 2008-2015, 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 2015 presentó valores que variaron, de manera general, de 10 a 90 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro del valle hacia las estribaciones de las sierras que lo delimitan, excepto en la porción centro-occidental donde la concentración de la extracción ha causado la profundización de los niveles del agua subterránea.

Los niveles estáticos someros, de 10 a 20 m, se presentan en la región suroccidental, en las inmediaciones del poblado Cañas; así como en toda la porción occidental que circunda al valle. Los más profundos, de 70 a 90 m, se registran en la porción centro-occidental del valle, en la zona ubicada al este del poblado Emiliano Zapata (figura 4).

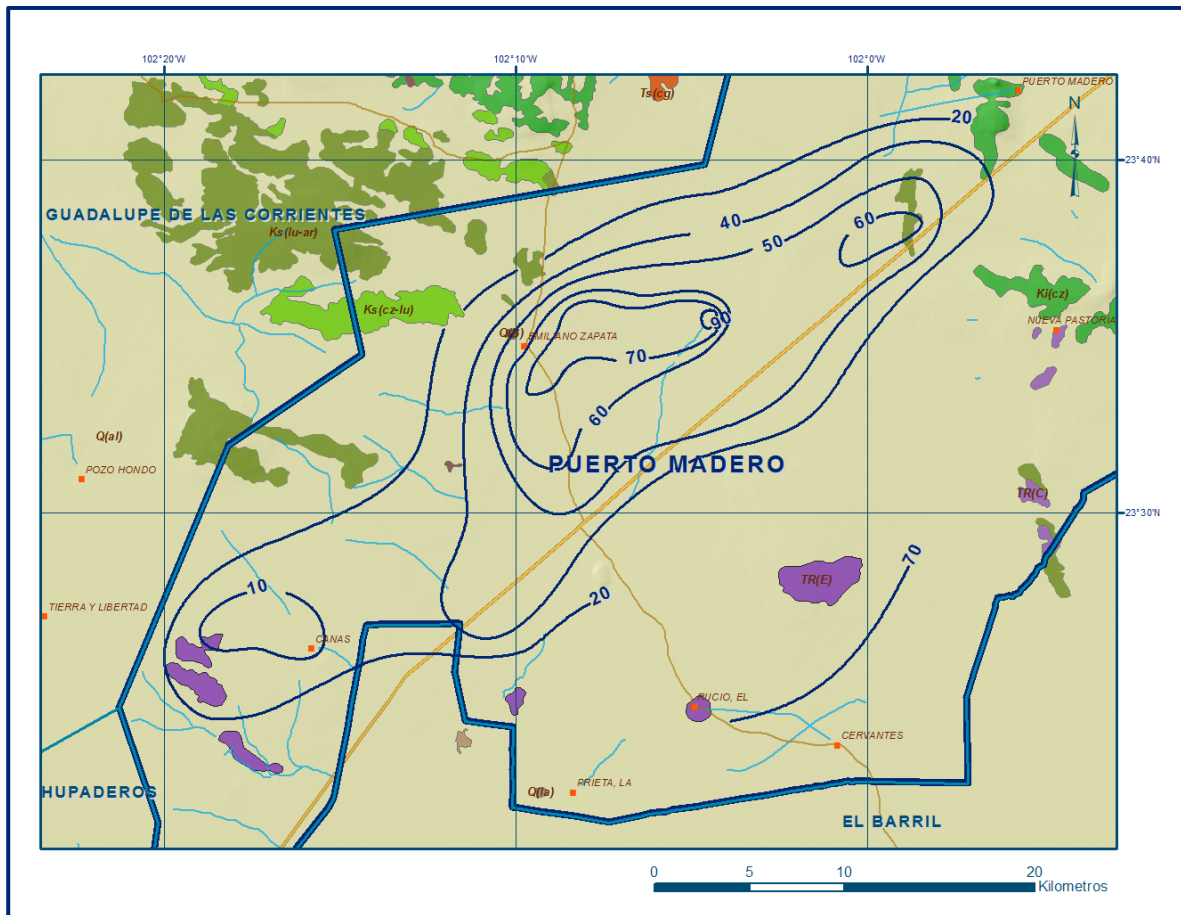


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2015 registró valores que variaron de 2050 a 1890 msnm, decreciendo desde la porción suroccidental del acuífero hacia la planicie aluvial localizada en la región central, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo SW-NE, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental, occidental y norte, para finalmente dirigirse hacia la laguna ubicada al este de Emiliano Zapata, donde la concentración de la extracción para uso agrícola ha formado un cono de abatimiento, definido por la curva 1890 msnm e interceptando flujo subterráneo que antes en condiciones naturales se dirigía al sur, hacia el acuífero El Barril, en el estado de San Luis Potosí. Los valores más altos, de 2000 a 2050 msnm, se presentan en la porción suroccidental y occidental del acuífero, entre las comunidades Cañas y El Venado (figura 5).

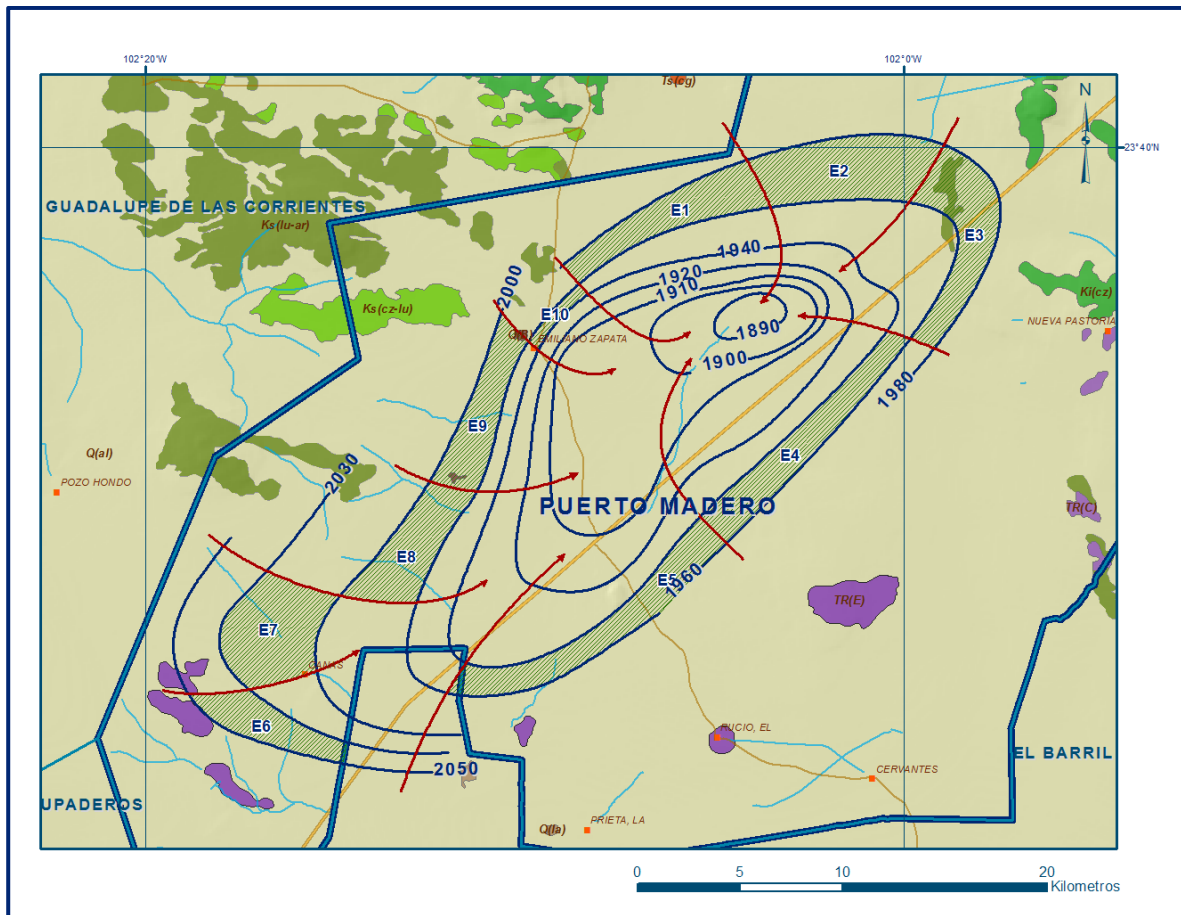


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2008-2015 registró valores de abatimiento que variaban de 5 a 10 m, que representan un promedio anual de 0.7 a 1.4 m, con valores puntuales de hasta 15 m que se observaron al este de Emiliano Zapata, donde se concentra la extracción por bombeo; en estas zonas el abatimiento promedio anual es de 1.7 m.

Hacia los extremos de mayor elevación topográfica y hacia el extremo sur del acuífero los abatimientos disminuyen gradualmente hasta desaparecer. 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 (figura 6).

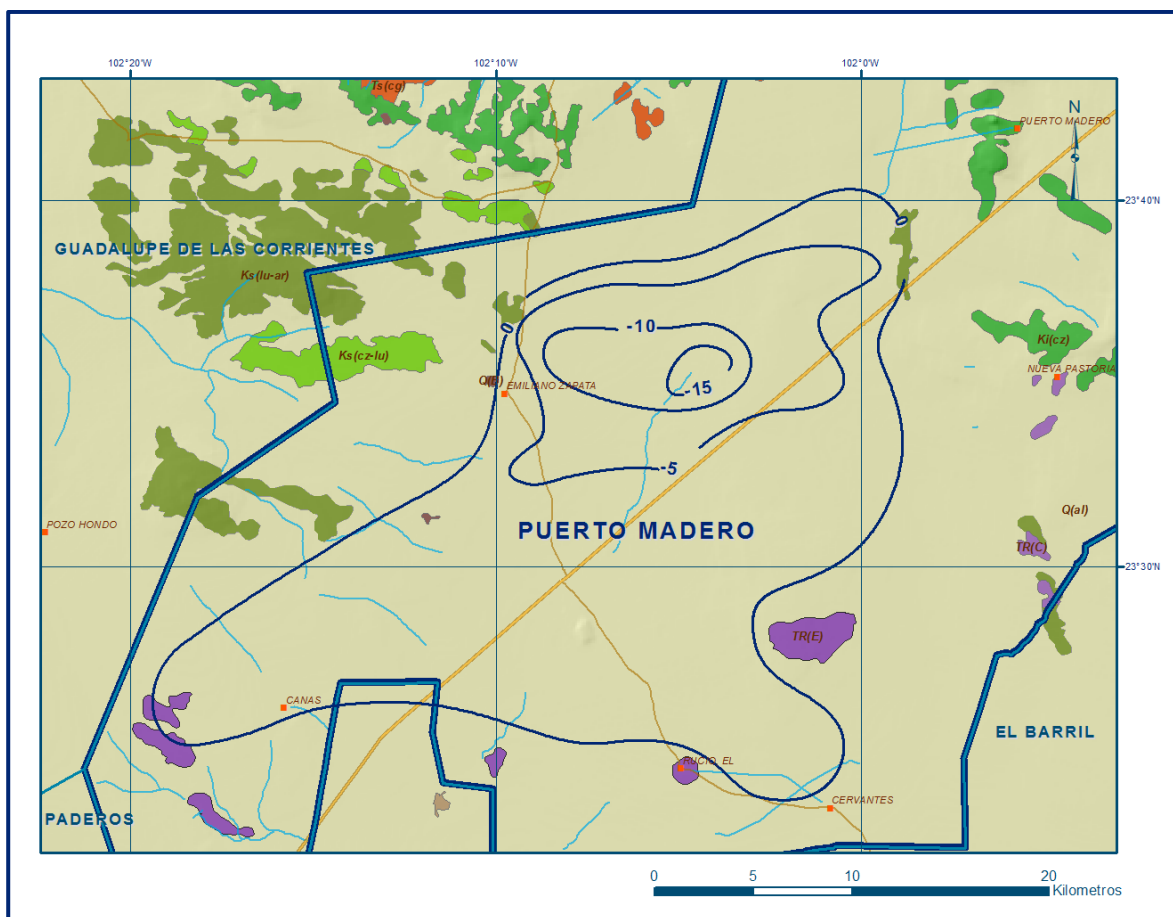


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2008-2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de censo e hidrometría realizados en el año 2010 (CONAGUA, Dirección Local en Zacatecas), se tomaron 10 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, flúor, así como iones principales. Adicionalmente, en 4 muestras se determinaron las concentraciones de arsénico, mercurio y cianuro.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de STD variaron de 248 a 1283 mg/l, únicamente 2 muestras superaron el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a la NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022.

de STD, para el agua destinada al consumo humano. Sin embargo, en 8 muestras se detectaron concentraciones de flúor que exceden los 1.5 mg/l que establece dicha norma como límite máximo permisible. Respecto a la ubicación de estas muestras, no existe un patrón de ocurrencia, ya que se localizan tanto en pozos emplazados en material aluvial, como en conglomerados y en tobas.

De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica de manera general como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica, en su mayoría, son inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, únicamente dos muestras sobrepasan este valor que las clasifica como agua salobre; presentan concentraciones extremas de 509 a 2582 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores de conductividad eléctrica más altos se localizan en la parte central del acuífero, justo donde se encuentran los materiales sedimentarios lacustres del cuaternario. Las temperaturas registradas varían de 17.5 a 24.8 °C y el pH de 7.4 a 8.6.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que la familia del agua que predomina es la sulfatada sódica, que se asocia a agua de relativa reciente infiltración, que se ha almacenado y circulado en materiales volcánicos ácidos como tobas y riolitas, enriquecida en sodios en la parte baja del valle, por presencia de suelos salinos.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), 6 muestras de agua se clasifican como C_2S_1 , que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, que se considera apta para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos.

En menor proporción, las aguas pertenecen a la clasificación C_3S_1 , índice obtenido en otras 3 muestras, que corresponde a salinidad alta con bajo contenido de sodio intercambiable; esta agua representa un riesgo moderado, cuya utilización en la agricultura requiere de suelos con buen drenaje y lavados periódicos y/o utilización en cultivos tolerantes a la salinidad.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos más reciente llevado a cabo por la Comisión Nacional del Agua, en 2011, se registraron un total de 303 obras que aprovechan el agua subterránea, 244 pozos, 58 norias y 1 manantial; de las cuales

229 están activas y 74 se consideran inactivas. De las obras activas, 116 se destinan al uso agrícola, 15 para uso público-urbano, 81 más para uso doméstico y pecuario, 16 son de uso múltiple y 1 de servicios.

El volumen de extracción conjunto calculado asciende a **19.7 hm³ anuales**, de los cuales 18.2 hm³ (92.4 %) se destinan al uso agrícola, 0.4 hm³ (2.0%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 0.1 hm³ (0.5%) para usos pecuario y doméstico, y 1.0 hm³ (5.1%) para uso múltiple.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2008-2015, en una superficie de **565 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh). De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri).

Para este caso, debido a que el volumen para uso público-urbano es pequeño, para fines del balance de agua subterránea únicamente se considera la infiltración de los excedentes de riego agrícola (R_r).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

R_v : Recarga vertical

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

R_r : Recarga Incidental por retornos de riego

B : Bombeo

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

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

$$R_v = B + \Delta V(S) - E_h - R_r \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre e la llanura y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2015 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

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

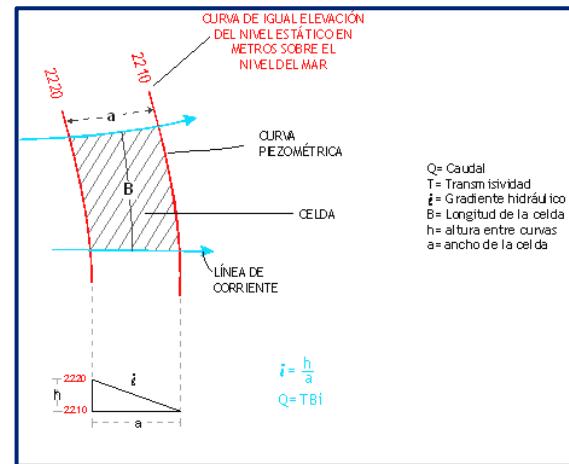
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas definidas. En la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **10.5 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2015)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	10380	1140	20	0.0175	0.0002	0.0364	11
E2	8860	1890	20	0.0106	0.0002	0.0188	0.6
E3	10885	1770	20	0.0113	0.0002	0.0246	0.8
E4	13165	2025	20	0.0099	0.0004	0.0520	16
E5	13670	2280	20	0.0088	0.0004	0.0480	15
E6	10125	2025	20	0.0099	0.0003	0.0300	0.9
E7	6330	3290	30	0.0091	0.0003	0.0173	0.5
E8	5570	2150	40	0.0186	0.0002	0.0207	0.7
E9	8860	1520	40	0.0263	0.0003	0.0699	2.2
E10	3035	885	20	0.0226	0.0003	0.0206	0.6
TOTAL							10.5

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 realizadas en estudios previos, en este acuífero y otros vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, adaptados al espesor saturado en cada zona.

7.1.3 Recarga incidental (Rr)

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

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 5 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a 40 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad baja en el subsuelo.

De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 18.2 hm³ anuales, el retorno agrícola es de 0.9 hm³ anuales. Por lo tanto, **Rr = 0.9 hm³ anuales.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre únicamente mediante bombeo (B).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **19.7 hm³ anuales.**

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2010-2015 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.01, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

$\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

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

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo 2008-2015 es de -22.3 hm³, por lo que el promedio anual es de **-3.2 hm³.**

Por lo tanto **$\Delta V(S) = -3.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales.}$**

Tabla 2. Cálculo del cambio de almacenamiento (2008-2015)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
0 a -5	-2.5	438.4	0.01	-11.0
-5 a -10	-7.5	93.1	0.01	-7.0
-10 a -15	-12.5	28.7	0.01	-3.6
-15.0	-15.0	4.8	0.01	-0.7
Área de balance		565.0	TOTAL	-22.3
		Promedio anual		-3.2

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

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

$$R_v = 19.7 - 3.2 - 10.5 - 0.9$$

$$R_v = 5.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 5.1 + 10.5 + 0.9$$

$$R = 16.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental.

Para este caso su valor es **16.5 hm³/año**, de los cuales 15.6 hm³ son recarga natural y 0.9 hm³ recarga incidental.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso de este acuífero no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto **DNC = 0.0 hm³/año**.

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 **25,872,051 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 16.5 - 0.0 - 25.872051 \\ \text{DMA} &= -9.372051 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **9,372,051 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua-Unión Agrícola Regional de Productores de Frijol y Granos Básico Francisco Villa, 2000. Actualización de Estudios Geohidrológicos de la Porción Noreste del estado de Zacatecas (Acuífero Puerto Madero). Realizado por Geofísica de Exploraciones, GUYSA, S.A. de C. V.

Comisión Nacional del Agua. 2003. Determinación de la Disponibilidad de Agua Subterránea en el Acuífero Puerto Madero, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua. 2010. Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico y de Calidad del Agua en los Acuíferos de: Guadalupe de las Corrientes, Puerto Madero, Villa Hidalgo, Pinos y Espíritu Santo. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C.