



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VILLA JUÁREZ (1022), 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	5
3	FISIOGRAFÍA.....	8
3.1	Provincia fisiográfica.....	8
3.2	Clima.....	9
3.3	Hidrografía	9
3.4	Geomorfología.....	10
4	GEOLOGÍA.....	10
4.1	Estratigrafía.....	13
4.2	Geología estructural	24
4.3	Geología del subsuelo	25
5	HIDROGEOLOGÍA.....	27
5.1	Tipo de acuífero	27
5.2	Parámetros hidráulicos.....	27
5.3	Piezometría	28
5.4	Comportamiento hidráulico.....	28
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	28
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	29
5.4.3	Evolución del nivel estático	30
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	31
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	33
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	33
7.1	Entradas	33
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	34
7.1.2	Entradas subterráneas horizontales (Eh).....	34
7.1.3	Recarga inducida (Ri)	36
7.2	Salidas.....	36
7.2.1	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	36
7.2.2	Bombeo (B).....	37
7.2.3	Evapotranspiración (ETR).....	37
7.3	Cambio de Almacenamiento $\Delta V(S)$	38
8	DISPONIBILIDAD	40
8.1	Recarga total media anual (R).....	40
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	40
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	41
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	41

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 Villa Juárez, definido con la clave 1022 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-oriental del estado de Durango, en el límite con el estado de Coahuila, entre los paralelos 25°10' y 25°45' de latitud norte y entre los meridianos 103°29' y 103°55' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,457 km² (Figura 1).

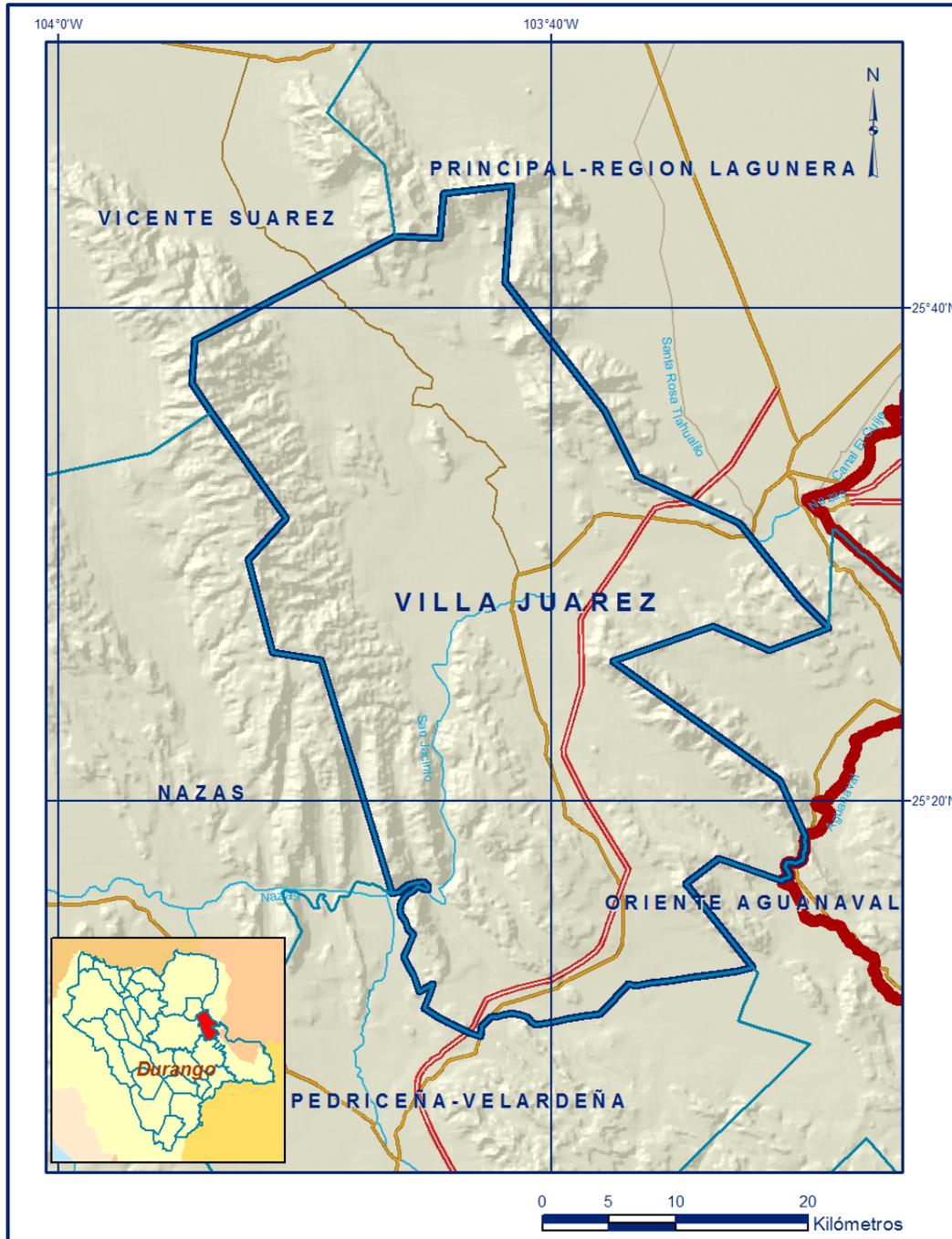


Figura 1. Localización del acuífero

Limita al norte y este con el acuífero Principal-Comarca Lagunera, del estado de Coahuila; al sureste con Oriente Aguanaval; al sur con Pedriceña-Velardeña; al oeste con Nazas y al noroeste con el acuífero Vicente Suárez, todos ellos pertenecientes al estado de Durango (figura 1). Geopolíticamente, la mayor parte de su territorio se ubica en el municipio de Lerdo; pequeñas porciones de sus extremos occidental y norte pertenecen a los municipios de Nazas y Mapimí, respectivamente.

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

ACUIFERO 1 022 VILLA JUAREZ							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	46	28.5	25	16	15.8	
2	103	49	21.5	25	25	42.1	
3	103	51	20.7	25	26	2.5	
4	103	52	18.6	25	29	47.3	
5	103	50	46.7	25	31	29.5	
6	103	53	48.5	25	35	46.3	
7	103	54	34.7	25	36	56.3	
8	103	54	28.9	25	38	42.2	
9	103	46	21.5	25	42	53.4	
10	103	44	32.2	25	42	50.3	
11	103	44	22.9	25	44	39.6	
12	103	41	37.9	25	44	57.1	
13	103	41	53.4	25	41	3.1	
14	103	37	50.0	25	35	49.6	
15	103	36	33.7	25	33	10.8	
16	103	32	24.0	25	31	15.8	
17	103	30	0.2	25	28	16.3	
18	103	28	47.6	25	27	0.1	
19	103	31	10.9	25	26	7.6	
20	103	33	28.4	25	27	7.0	
21	103	37	31.7	25	25	41.7	
22	103	30	46.1	25	20	48.8	
23	103	29	42.9	25	18	35.0	DEL 23 AL 24 POR EL LIMITE ESTATAL
24	103	30	41.1	25	16	45.8	
25	103	33	13.1	25	17	40.9	
26	103	34	34.6	25	16	38.9	
27	103	31	51.6	25	13	16.5	DEL 27 AL 1 POR EL LIMITE MUNICIPAL
1	103	46	28.5	25	16	15.8	

1.2 Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero Villa Juárez pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte” y al Consejo de Cuenca Nazas-Aguanaval, instalado el 1 de diciembre de 1998. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a tres decretos de veda para la extracción de agua subterránea. En la mayor parte rige el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las zonas de Ceballos y de La Laguna, que comprenden parte de los Estados de Chihuahua, Durango y Coahuila”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de diciembre de 1958. Este decreto establece veda tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En la porción occidental y sur está vigente el “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Región Lagunera”, publicado en el DOF el 17 de abril de 1965; esta veda es de tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Por último, en el extremo suroccidental rige el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del área que ocupa los límites geopolíticos de los Municipios de Nazas, Rodeo, San Luis del Cordero, General Simón Bolívar y San Juan de Guadalupe del Estado de Durango, para mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo de dicha zona”, publicado en el DOF el 27 de marzo de 1981.

Esta veda es de 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 2. El principal usuario del agua subterránea es el agrícola, en su territorio se localiza parte de Distrito de Riego 017 “Región Lagunera”, sin que se haya constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero y la región aledaña se han realizado algunos estudios geológicos, geofísicos e hidrogeológicos con fines geológico-mineros y para ubicar sitios adecuados para la perforación de pozos de abastecimiento de agua potable a las poblaciones más importantes. A continuación, se mencionan los resultados y conclusiones de los estudios más relevantes para este documento.

ESTUDIO DE LOS RECURSOS ACUÍFEROS SUBTERRÁNEOS DE LA ZONA DE VILLA JUÁREZ, DGO. Realizado en 1977 por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. para la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP). Su objetivo fue analizar la factibilidad técnica de extraer un caudal de los acuíferos aluviales del valle del Río Nazas, entre la Ciudad de Lerdo y la población de San Jacinto, y localizar sitios adecuados para la perforación de pozos.

Define que el área más favorable para la exploración y futura dotación de agua potable a la Región Lagunera, es la que se localiza entre el estrechamiento topográfico localizado frente a la población de San Jacinto y el último estrechamiento entre Villa Juárez y la Ciudad de Lerdo. Concluye que es posible extraer de esta zona 4 m³/s, mediante 60 pozos localizados sobre la margen izquierda del río hasta la altura del poblado León Guzmán y sobre ambas márgenes entre dicha población y San Jacinto.

ESTUDIO PARA LA DETECCIÓN DE ELEMENTOS TÓXICOS EN EL ÁREA DE VILLA JUÁREZ, ESTADO DE DURANGO. Realizado en 1987 por la Comisión Federal de Electricidad, Departamento de Geohidrología. Este estudio tuvo como objetivo conocer el grado y origen de la contaminación por arsénico y otros elementos tóxicos, que afectan tanto al agua subterránea como superficial y su aplicación al abastecimiento de la Central Termoeléctrica Lerdo. Define el esquema de dispersión de elementos tóxicos y como origen más probable de ellos, incluido el arsénico, la actividad minera en la zona de Velardeña y su contaminación hacia la subcuenca hidrológica de la Presa Francisco Zarco, cuya agua acumulada favorece el enriquecimiento en estos elementos durante el estiaje. Estos son removidos durante el desfogue de la presa y fluyen junto con el agua por el Río Nazas, recargando al acuífero.

ESTUDIO PARA LA DETECCIÓN DE ELEMENTOS TÓXICOS EN EL ÁREA DE VILLA JUÁREZ, ESTADO DE DURANGO. SEGUNDA ETAPA. Realizado en 1989 por la Comisión Federal de Electricidad, Departamento de Geohidrología. Su objetivo fue confirmar los resultados obtenidos en la primera etapa y los que se obtuvieron en la segunda. Ratifica la influencia de las aportaciones del área minera de Velardeña y permite conocer otro origen del arsénico, íntimamente relacionado con las actividades agroindustriales, confirmado por la presencia de ácido cacodílico, compuesto utilizado en las actividades agroindustriales como pesticida, que se deposita en los suelos, se lixivia por las aguas pluviales y se infiltra al subsuelo.

Concluye que la presencia del arsénico en el agua está asociada a varios orígenes; uno natural como es el caso de los manantiales localizados al sur de la Central Termoeléctrica Lerdo y otros inducidos por actividades antropogénicas, como la influencia de la actividad minera en la zona de Velardeña hacia la Presa Francisco Zarco, y las actividades agrícolas, manifestada por la presencia de compuestos orgánicos arsenicales en los suelos y sedimentos.

ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO DEL ACUIFERO GRANULAR DE LA COMARCA LAGUNERA. Realizado en 1990 por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para la Comisión Nacional del Agua. Tuvo como objetivos determinar el origen y evolución del arsénico en el acuífero granular, estimar la vulnerabilidad de las zonas de reserva exclusiva para agua potable, generar una base de datos de calidad para desarrollar modelos matemáticos y actualizar el conocimiento hidrogeoquímico.

Concluye que el agua con arsénico está asociada con los procesos volcánicos y magmáticos y de acuerdo con los resultados isotópicos de ^{14}C se determina un tiempo muy grande de residencia del agua en el subsuelo.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA COMARCA LAGUNERA, COAHUILA-DURANGO. Realizado en 1992 por grupo Profesional de Planeación y Proyectos, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Entre sus actividades de recopilación y de campo más importantes destacan la nivelación de brocales, la ejecución de pruebas de bombeo, muestreo de suelos, sedimentos y agua para la determinación de la presencia de arsénico, estratigrafía y sedimentología de las fases del subsuelo, identificación de hundimientos diferenciales del terreno, discretización de la geometría del subsuelo, instalación de medidores automatizados del nivel estático, análisis de la demanda, cobertura futura de agua y análisis de opciones de intercambio de agua entre los sectores usuarios.

Concluye que el relleno aluvial tiene un espesor de 600 a 700 m, conformado por diferentes unidades hidroestratigráficas, que funcionan como acuíferos y acuitardos, en el que las principales zonas productoras corresponden a los ejes de los principales depocentros de facies de canal, que constituyen los conductos preferenciales para la migración del agua y de los contaminantes. Así mismo, establece que la presencia del arsénico en el agua subterránea se explica por la presencia de aguas muy antiguas que han interactuado con rocas volcánicas e intrusivas con altas temperaturas, que por fracturas y fallas han llegado a niveles superiores; confirmando lo establecido por estudios isotópicos realizados por el IMTA en 1990.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA, HIDROMÉTRICA Y DE CALIDAD DEL ACUÍFERO VILLA JUÁREZ, DURANGO. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte (OCCCN), 2016. Contiene información piezométrica histórica y actualizada, así como de la estimación de los volúmenes de extracción. Además, proporciona información de calidad del agua procedente de la Evaluación de las Fuentes de Agua Potable del Región Lagunera, operada por el OCCCN y de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua (RENAMECA), para el año 2017.

La información piezométrica y su actualización al año 2016, fueron la base para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, que sirvieron para actualizar el balance de aguas subterráneas.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en la confluencia de dos provincias fisiográficas: la mayor parte se localiza en la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental; la porción centro-norte, a lo largo de una franja orientada en sentido norte sur, pertenece a la Provincia Fisiográfica Cuencas y Sierras del Norte. Por otra parte, según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1989)), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, Subprovincia Sierras Transversales y en la Provincia Fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte, Subprovincia Bolsón de Mapimí.

La Sierra Madre Oriental está orientada en sentido norte-sur y noroeste-sureste, que muestra una flexión con orientación este-oeste entre Monterrey y Torreón. Representa un conjunto de sierras en las que afloran secuencias mesozoicas plegadas de rocas sedimentarias marinas del Cretácico y Jurásico Superior, entre las que predominan las calizas, areniscas y secuencias arcillosas. El plegamiento se manifiesta de múltiples maneras, pero su forma más notable es la que produce topoforras onduladas y paralelas, en donde las partes topográficamente más altas, corresponden con anticlinales y las zonas bajas a sinclinales, cuando las formaciones son resistentes a la erosión. La flexión de las rocas en las crestas de los pliegues ocasionó extensión con el correspondiente fracturamiento, haciéndolas más susceptibles a los procesos erosivos. Cuando las estructuras mayores se encuentran erosionadas en sus núcleos sólo quedan flancos residuales de los anticlinales, con un valle al centro, denominadas "potreros".

La Subprovincia Sierras Transversales está conformada de sierras orientadas en forma paralela a los cuerpos centrales de la Sierra Madre Oriental, separadas unas de otras por llanuras más o menos amplias. La porción norte de la subprovincia es la que se ubica en el estado de Coahuila. La Provincia Fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte se caracteriza por presentar alternancia de llanuras y lomeríos compuestos por rocas sedimentarias y volcánicas del Cenozoico débilmente plegadas, que muestran un relieve suave. Las rocas, principalmente lutitas y areniscas, están afectadas por fallas normales y fracturas, mostrando una orientación noreste-suroeste y noroeste-sureste.

La subprovincia Bolsón de Mapimí está constituida por extensas llanuras aluviales o salinas, con lomeríos ramificados, sierras plegadas y campos de dunas. En las llanuras dominan suelos profundos de origen aluvial o lacustre, de textura media o fina.

3.2 Clima

De acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen, modificados por E. García (1964) para las condiciones de México, se establece que en la superficie cubierta por el acuífero predomina el tipo de clima BWhw, que se clasifica como seco a desértico, semicálido con invierno seco, muy extremo.

La temperatura media varía entre 18 y 22 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C y del mes más cálido mayor a 22 °C, con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total.

En las sierras el clima cambia a tipo (Cx') templado y subhúmedo, con una temperatura media anual que varía entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C, y la del mes más cálido mayor a 18 °C, con régimen de lluvias en verano.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 6 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Nazas, Pedriceña, CBTA 047 Lerdo, Villa Juárez (CFE), Ciudad Lerdo y Torreón cuyo registro comprende el periodo 1982-2013. Con estos datos y utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **365 mm, 19.0 °C y 2325 mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica No. 36 "Nazas-Aguanaval", Subregión Hidrológica "Nazas", cuenca "Río Nazas-Torreón", subcuenca "Río Nazas-Los Ángeles". Regionalmente, los ríos más importantes son el Nazas, el cual nace en el estado de Durango, y Aguanaval que se origina en el estado de Zacatecas, hacia los cuales confluye la mayoría de los escurrimientos superficiales.

El acuífero Villa Juárez se encuentra ubicado en la cuenca del Río Nazas, que descarga sus aguas en la Presa Lázaro Cárdenas. Este río se forma por la confluencia de los ríos Ramos y Sextín; en esa zona se construyó la Presa Francisco Zarco (Las Tórtolas o El Palmito) a la altura de la población El Palmito, ubicada al suroeste del acuífero, en el límite con Pedriceña-Velardeña. Posteriormente, en su curso hacia su cuenca baja, se le unen los arroyos San Juan, Peñón y Cuencamé por su margen derecha, cambiando de rumbo hacia la antigua Laguna, hoy Desierto de Mayrán, pasando por las ciudades de Lerdo, Gómez Palacio, estado de Durango y Torreón, estado de Coahuila.

En la zona ubicada entre la presa Francisco Zarco y la ciudad de Torreón, se observa una condición hidrográfica particular, en la que destacan hacia la margen izquierda afluentes cortos de cuenca reducida y poca contribución; en contraste con los afluentes de la margen derecha, de mayor extensión en cuencas de mayor magnitud y aportaciones de escurrimientos superficiales más significativos.

El drenaje presenta un patrón predominante de tipo subparalelo en las sierras El Rosario y Manzanares; en los valles el drenaje está controlado por las corrientes existentes.

3.4 Geomorfología

El relieve se caracteriza por presentar sierras con pendientes suaves, limitadas por valles, en donde confluyen los arroyos a las corrientes principales. En la porción sur existen cañones profundos, en donde la erosión define una topografía abrupta con pequeños y estrechos valles entre ellos. La topografía tiende a ser más suave hacia el centro y oriente de la zona, en donde se encuentran valles intermontanos y extensas llanuras aluviales y fluviales labrados por la erosión de las sierras circundantes y la escorrentía intermitente del Río Nazas, en los que la elevación promedio de 1,160 msnm; aquí las montañas se reducen a cerros con pendientes suaves. Las elevaciones varían de 2,770 msnm, en la Sierra El Rosario ubicada en la porción noroccidental del acuífero, a 1,200 msnm, en el estrechamiento de San Fernando.

El área presenta rasgos de madurez geomorfológica, la cual es más avanzada hacia las ciudades de Lerdo y Gómez Palacio, en donde se observa un relieve más suave y lomeríos aislados, y los ríos Nazas y Aguanaval presentan cauces más amplios y meandros.

4 GEOLOGÍA

La superficie cubierta por el acuífero se encuentra en el límite entre dos importantes provincias geológicas de la República Mexicana, la Sierra Madre Oriental y la Cuenca de Parras (Figura 2).

La mayor parte se ubica en la provincia Sierra Madre Oriental que forma parte del Geosinclinal Mexicano que cruza la República Mexicana de norte a sur. Este geosinclinal se caracteriza por la presencia de numerosos plegamientos anticlinales y sinclinales de rocas sedimentarias, que presentan una orientación general de sus ejes NW-SE.

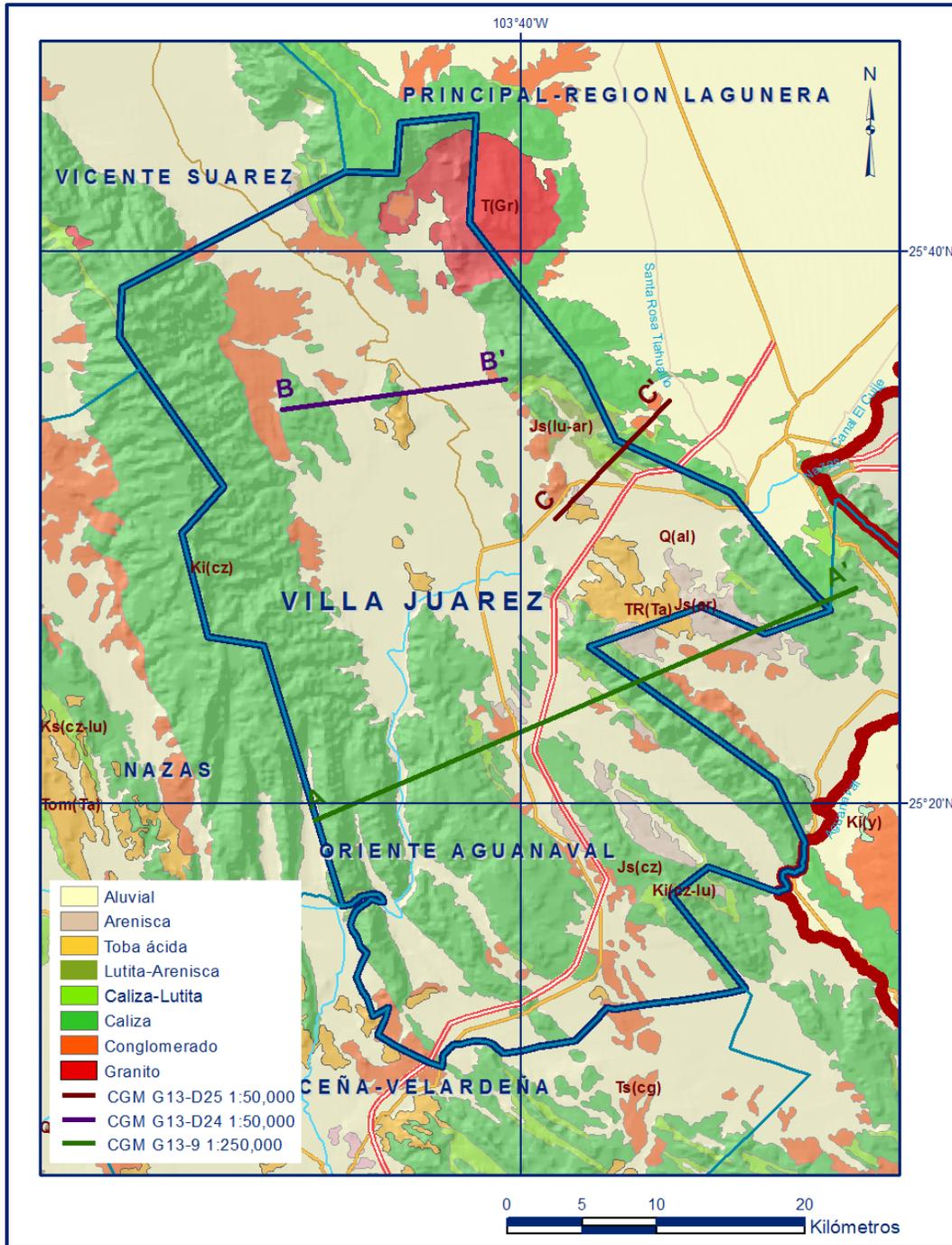


Figura 2. Geología general de acuífero

Esta serie de capas sedimentarias presentan una litología que varía desde rocas calcáreas hasta areniscas y conglomerados, así como lutitas de diferentes secuencias. Las formaciones plegadas han sufrido fuerte erosión, formando una serie de valles profundos, tanto a lo largo de sus ejes estructurales como transversales, cortando estas estructuras con profundidades máximas de 210 m.

Los valles erosionados se rellenaron posteriormente con depósitos aluviales de diferentes secuencias que actualmente constituyen el acuífero más importante de la región. Por su parte la Cuenca de Parras es una depresión topográfica que se extiende a través de Coahuila, desde Saltillo hasta Torreón, a lo largo de una longitud de 260 km y ancho de 50 km, que se hace más angosta hacia el este.

La base de la columna sedimentaria del área, está conformada por una secuencia vulcano-sedimentaria (Formación Nazas), depositada durante el Triásico-Jurásico Medio.

Esta sedimentación vulcanogénica tiende a cambiar en el Jurásico Tardío, tiempo en el inició el gran ciclo marino de sedimentación marginal, que perduró durante el resto del Mesozoico y cuya distribución y facies estuvo controlada por el paleoelemento denominado isla o plataforma de Coahuila, durante el Jurásico y el Cretácico.

Durante el Jurásico Tardío se acumularon grandes volúmenes de sedimentos clásticos hacia las márgenes de este paleoelemento con él depósito de las formaciones La Gloria y La Casita, sedimentación que se extendió hasta el Berriasiano-Valanginiano Temprano (Formación Carbonera); sin embargo, se manifiesta de manera simultánea una sedimentación marina (formaciones Zuloaga, La Caja y Taraises) al poniente y sur de la franja litoral, definiendo ya un marcado avance de la transgresión marina.

Durante el Barremiano-Aptiano Temprano el patrón de sedimentación se torna netamente carbonatado, ocurriendo sobre una extensa plataforma (Formación Cupido), la cual en la porción meridional del área tiene bien definido su borde, es en donde a partir de esta zona de talud, los sedimentos típicos de plataforma carbonatada, cambian a facies marinas de características batimétricas más profundas (Formación Tamaulipas Inferior). Simultáneamente en el Aptiano Temprano en el sector suroccidental del área, se depositó una secuencia típica de cuenca marginal (Grupo Mezcalera) cuya sedimentación se extendió en esta región hasta el Turoniano.

En el Aptiano Tardío se interrumpe la sedimentación de los potentes cuerpos tabulares de carbonatos, acumulándose en su lugar una secuencia delgada de composición calcáreo-arcillosa (Formación La Peña), asociada a la inestabilidad tectónica que existía en la porción occidental del área.

En el Albiano Temprano se desarrollan cuerpos de carbonatos en facies de plataforma abierta, ya sea sobre la Plataforma de Coahuila (Formación Paila), como en zonas distantes a este paleoelemento (Formación Tamaulipas Superior).

Durante el Albiano Medio se configura un borde en el límite entre la plataforma somera y la zona de aguas más profundas, desarrollándose en esta franja cuerpos arrecifales (Formación Viesca), dando así lugar a una sedimentación hacia el interior de la plataforma, de carbonatos en facies de plataforma semi-restringida (Formación Acatita), conformando una columna sedimentaria típica de plataforma; mientras tanto en la zona de plataforma abierta y de cuenca se depositan simultáneamente los sedimentos de las formaciones Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura, que conforman las unidades de cuenca.

Este patrón de sedimentación carbonatada que se desarrolló durante el Cretácico Medio, se interrumpió en el Cretácico Tardío (Turoniano a Maestrichtiano), debido a los efectos orogénicos iniciales provenientes del occidente, que provocaron la acumulación de sedimentos arcillo-calcáreos, arcillosos y clástico-carbonatados (formaciones Indidura y Caracol), típicos de las facies pre-flysch y flysch respectivamente, depositados sobre los grandes volúmenes de carbonatos de plataforma y cuenca.

Posterior al evento orogénico compresivo Laramídico, se manifestó una sedimentación de tipo "Molasse" (Formación Ahuichila), así como períodos de magmatismo calco-alcalino, manifestados por rocas extrusivas ignimbríticas (fuera del área), así como por el emplazamiento de cuerpos intrusivos (Intrusivo El Sarnoso).

Finalmente, durante el Plioceno, Cuaternario y Reciente, se desarrolla una serie de depósitos en forma de terrazas aluviales y de talud, denominado como Cenozoico Continental Indiferenciado, los cuales están asociados con abanicos aluviales, sedimentos fluvio-lacustres y aluviones, que se acumularon sobre las zonas topográficamente bajas, que rellenaron con sus depósitos clásticos la gran depresión formada por los antiguos valles intermontanos de la actual región de La Laguna.

4.1 Estratigrafía

La geología general del acuífero está representada por rocas sedimentarias e ígneas extrusivas e intrusivas (figura 2), cuyo registro estratigráfico comprende del Triásico-Jurásico al Reciente.

TRIÁSICO-JURÁSICO

Formación Nazas

Término formacional utilizado inicialmente por Pantoja (1963) para describir un conjunto de materiales vulcanosedimentarios cuya localidad tipo se encuentra en el anticlinorio de Villa Juárez, sobre el Río Nazas.

Es la unidad más antigua de la región y está representada por una serie de lavas antiguas interestratificadas con lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados, que presentan muy baja permeabilidad y que funcionan como basamento geohidrológico de la cuenca.

Aflora al sur y noroeste de Villa Juárez, conformando el núcleo de una estructura anticlinal con su eje en forma transversal al cauce del Río Nazas; así como también en las inmediaciones de los poblados Cinco de Mayo, al sur de Cerro Redondo y en la porción central de la Sierra de Jimulco donde consta de lutitas, limolitas y areniscas rojas, en ocasiones conglomeráticas.

Los estratos más delgados son laminares hasta de 15 cm de espesor y corresponden a las lutitas y limolitas, en tanto que los derrames de lava y las areniscas, presentan horizontes masivos que superan el metro de espesor.

Por sus características litológicas, se asocia a un depósito de tipo "molasse", que relleno las fosas tectónicas producidas en la fase post-orogénica (tafrogenia) de la Orogenia Apalacheana; en un ambiente continental con intensa actividad volcánica, fallamiento en bloques y erosión intensa de las estructuras producidas durante la fase compresiva, el cual estuvo asociado a un vulcanismo de composición calcoalcalino relacionado con la apertura del Golfo de México.

JURÁSICO

Formación Zuloaga

Fue originalmente estudiada por Burckhardt (1906, 1930) en la región septentrional del centro de la república, refiriéndose a ella como "Caliza con Nerineas" y posteriormente fue definida como Formación Zuloaga por Imlay en 1938, designando como localidad tipo a la Sierra de Sombreretillo, ubicada al norte de Melchor Ocampo, Zacatecas. Consiste de calizas estratificadas en capas gruesas con nódulos de pedernal, ocasionales bivalvos y gasterópodos.

No se observa su contacto inferior con las rocas que le subyacen, subyace concordantemente a los sedimentos clásticos de la Formación La Casita.

El contacto inferior en otras áreas más al sur, como el Distrito de Concepción del Oro, Zac., se encuentra descansando discordantemente sobre los lechos rojos de la Formación Nazas, Los Esquistos Rodeo y Caopas indistintamente. Por su disposición estratigráfica se le ha asignado una edad Jurásico Superior (Oxfordiano-Tithoniano), el equivalente extralitoral de la Formación La Gloria que aflora al oeste del área. Debido a la fauna encontrada y por su litología, sugiere que fue depositada en aguas tibias de poca profundidad propias de un ambiente de plataforma.

En el área, aflora al sur del Villa Juárez, donde está representada por calizas y dolomías con fragmentos biógenos y presencia de yeso y sal.

Formación La Gloria

Fue definida formalmente por Imlay (1936) en su localidad tipo que son los afloramientos expuestos en el Cañón del Mimbres, ubicado en la Sierra La Gloria, ubicada a 50 km al sureste de Parras, Coahuila, en donde está constituida por calizas de color gris claro y oscuro dispuestas en estratos gruesos, con intercalaciones de areniscas de grano medio a grueso, en ocasiones conglomeráticas, de color amarillento al intemperismo.

La litología de esta unidad se caracteriza por ser clástica de manera predominante; está constituida por areniscas de cuarzo en estratos delgados a gruesos, de color blanco rosado, gris claro y ocasionalmente ocre y rojo óxido. En el área de Villa Juárez, estos materiales presentan intercalaciones de estratos conglomeráticos, así como algunos intervalos arcillosos y, de manera ocasional, bancos calcáreos fosilíferos. Los espesores reportados en los diversos trabajos realizados son: 342 m en el anticlinal La Leona de la Sierra de Jimulco; 275 m, en la Sierra El Chocolate del Levantamiento de Villa Juárez y 567 m en la localidad tipo.

Aflora en la Sierra Chocolate, en el Levantamiento de Villa Juárez y en las cercanías del Anticlinal del Carmen de la Sierra de Jimulco. La cima de la unidad se relaciona concordantemente con los sedimentos clásticos de la Formación La Casita; localmente, descansa discordantemente sobre la Formación Nazas en la región de Villa Juárez y en contacto tectónico por medio de una falla lateral en la Sierra de Jimulco.

Está expuesta de manera regional al sur del sistema orogénico transversal Torreón-Monterrey. Por su contenido faunístico y posición estratigráfica, Kellum (1932) le asignó una edad correspondiente al Jurásico Superior, comprendiendo en su totalidad al Oxfordiano.

Formación La Casita

Definida formalmente también por Imlay en 1936, quién designó como localidad y sección tipo a la secuencia sedimentaria encontrada en el Cañón La Casita, ubicado 50 km al suroeste de Saltillo, Coahuila, donde está constituida por secuencia más o menos rítmica de intercalaciones de lutitas, areniscas, margas, calizas, carbón, yeso y algunos conglomerados.

Aflora al sureste de Villa Juárez en el Cerro Las Minas; en el flanco occidental de la Sierra de Mapimí y en el flanco oriental de la Sierra El Rosario, ubicados al oeste y suroeste, respectivamente. En la zona su litología está representada por areniscas de cuarzo, dispuestas en estratos medianos y delgados, de grano fino a medio, de color gris, con intemperismo pardo amarillento; algunos estratos de areniscas son gruesos y tienen abundantes pelecípodos; se le observa con interestratos de lutitas en estratos delgados a medianos, con algunos horizontes de limolitas; el color es gris verdoso que intemperiza en gris oscuro; también existen algunos horizontes de conglomerados, constituidos por fragmentos de roca ígnea y cuarzo blanco lechoso.

En el área la litología es bastante homogénea en todas las localidades en donde se encuentra expuesta y se caracteriza por carecer de estratos de calizas. Su espesor varía de 508 m en el Levantamiento de Villa Juárez a 692 m en la Sierra Chocolate.

Sus afloramientos se ubican al norte y sur de Villa Juárez, en donde está compuesta por tres miembros; el inferior y superior constituidos por areniscas interestratificadas con lutitas, separadas por un miembro intermedio de lutitas con intercalaciones de yeso. Sobreyace de manera transicional y concordante a las rocas de la Formación La Gloria y su contacto superior también es transicional y concordante con rocas de la Formación Carbonera; en las Sierras de Jimulco y El Carmen, subyace a los sedimentos de la Formación Taraises por medio de un contacto concordante, nítido y abrupto.

Por su posición estratigráfica y por su contenido faunístico, se le asigna una edad Kimmeridgiano-Tithoniano, correlacionable con la Formación La Caja del Altiplano Mexicano.

De acuerdo con las características litológicas observadas, se le atribuye un medio ambiente de depósito asociado a un sistema deltaico en el área de Torreón (Levantamiento de Villa Juárez y Sierra Chocolate), mientras que fuera de esta zona cambia a una facies de plataforma continental de aguas profundas (área de Jimulco).

CRETÁCICO INFERIOR Y MEDIO

Formación Carbonera

Nombre propuesto por Imlay (1940) para designar a una secuencia de areniscas de cuarzo, de color gris, con intercalaciones de lutitas, areniscas arcillosas y areniscas feldespáticas, dispuestas en capas gruesas, de color gris verdoso y rojizo, que afloran en la Cuesta de La Carbonera, ubicada a 3 km al sur del Rancho Las Cuevas, Durango.

Aflora en el Cañón del Soldado y en el borde oriental de la Sierra La Iglesia; en el Levantamiento de Villa Juárez, en donde se sitúa su localidad tipo, en el flanco occidental de la Sierra España y en la Sierra del Chocolate.

En el área de Villa Juárez en el cañón de La Carbonera, se reporta hacia la base de la formación una secuencia de areniscas de cuarzo, de color gris claro que intemperizan en pardo rojizo.

La parte media de la unidad está constituida por un paquete de areniscas, de color gris oscuro, que intemperizan en color anaranjado y ocasionalmente en pardo rojizo; es posible también encontrar intercalaciones delgadas de lutitas de color negro.

Dentro de esta parte de la columna se observan gasterópodos, pelecípodos y algunas amonitas. La cima de la formación se caracteriza por contener capas delgadas de calizas arcillosas, de color gris oscuro, con pelecípodos y gasterópodos.

En el área de Villa Juárez y en el flanco occidental de la Sierra de Mapimí, sobreyace de manera concordante y transicional a la Formación La Casita y subyace de manera concordante y franca a la Formación Cupido.

Su espesor reportado en el Levantamiento de Villa Juárez es de 283 m. Por su contenido fósil en la localidad tipo, se le asigna una edad Berriasiano–Valanginiano, equivalente con la Formación Las Vigas del norte de Chihuahua y con la Formación Taraises de esta misma región, con la que cambia de facies hacia el oriente y sur del área de estudio.

Su depósito ocurrió en un ambiente litoral restringido a los márgenes de la Isla de Coahuila, la cual presentaba una mayor extensión hacia el sector de Villa Juárez, debido a que en esta área drenaban los ríos que provenían del elemento tectónico de la Isla de Coahuila, distribuyendo un mayor volumen de material terrígeno.

Formación Taraises

Fue definida por Imlay (1936) para referirse a una sección calcárea y calcáreo-arcillosa, limitada en la parte inferior por la Formación La Caja o La Casita y en la parte superior por la Caliza Cupido,

Su localidad tipo es el Cañón de Taraises, ubicado en la porción occidental de la Sierra de Parras, donde la dividió en dos miembros: El inferior conformado por capas gruesas de calizas de color gris, interestratificadas con areniscas, y el superior constituido por calizas arcillosas de color gris, nodulares y con presencia de amonitas en la parte basal.

Aflora ampliamente en la región Torreón-Monterrey, en las Sierras de Garambullo, Fraile, San Jerónimo, Astillero y otras más. Debido a su litología, es fácilmente erosionable desarrollando pequeños valles y puertos suaves de erosión, así como pequeños morros redondeados. Presenta color gris claro que intemperiza en pardo amarillento, dispuesta en capas delgadas y medias de 20 a 50 cm de espesor, contiene nódulos de hematita y óxidos diseminados. Su espesor estimado es de 350 a 400 m, sobreyace concordantemente a las formaciones La Casita o La Caja, y su contacto superior con la Formación Cupido es nítido y concordante. De acuerdo a su posición estratigráfica, la edad asignada es Berriasiano-Hauteriviano Inferior.

Formación Cupido

Con este nombre Imlay en 1937 definió originalmente a una secuencia calcárea situada entre las formaciones Taraises y La Peña que presenta estratificación gruesa a delgada y es de color gris, definiendo como localidad tipo la pared norte del Cañón del Mimbres, ubicado en la parte media de la Sierra de Parras, Coahuila, asignándole una edad Hauteriviano Superior al Barremiano. Garza-García (1972), propuso que el nombre fuera utilizado exclusivamente para nominar a las facies de plataforma, para diferenciarla de las facies de mar abierto de la Formación Tamaulipas Inferior. En el área está constituida principalmente por una secuencia de calizas de facies de plataforma lagunar, con intercalaciones en algunas localidades de cuerpos de dolomías de ambientes de plataforma semi-restringida y ocasionales parches arrecifales.

Son de color gris que intemperiza en color gris claro, presenta estilolitas, fracturas rellenas de calcita y algunos nódulos de pedernal.

Aflora ampliamente y se encuentra constituyendo las partes más elevadas de las sierras formando grandes escarpes; se encuentra aflorando en la porción media meridional de la Sierra El Rosario, en las sierras de Mapimí, Las Noas, El Refugio, España, San Carlos, El Chocolate y Las Iglesias. Su espesor promedio varía de 350 a 500 m.

En el área de Villa Juárez y en el flanco occidental de la Sierra de Mapimí, a la Formación Cupido le subyace la Formación Carbonera de manera concordante y franca y le sobreyace de igual manera la Formación La Peña. Por la datación que proporcionan sus microfósiles (miliólidos) y por su posición estratigráfica que ocupa entre las formaciones Taraises y La Peña, se le asigna una edad correspondiente al Hauteriviano Superior-Aptiano Inferior que permite correlacionarla cronológicamente con la Formación Tamaulipas Inferior, su equivalente de facies de cuenca.

Formación La Peña

El nombre fue introducido por Imlay (1936) para distinguir a un cuerpo compuesto por dos miembros: El inferior constituido por calizas y el superior por lutitas y calizas, que estratigráficamente se ubica entre la Caliza Cupido y la Caliza Aurora. Su localidad tipo se ubica en el flanco norte de la Sierra de Taraises, a 4.8 km al E-SE de la Hacienda La Peña, localizada en el extremo sur del estado de Coahuila. Humphrey (1949), propuso que restringiera al miembro superior y el inferior a la Formación Cupido.

Es una unidad de amplia distribución en el NE y E de México y un horizonte índice de referencia estratigráfica, debido a su contraste litológico marcado con las formaciones que la limitan. La unidad así definida contiene amonitas del Aptiano Superior, en particular de las especies *Dufrenoya justinse* y *Parahoplites sp.* Aflora la zona Torreón–Monterey, en la porción oriental de las Sierras de Garambullo, San Jerónimo, Arteaga y Jimulco. En la región aflora en sureste de San José de Zaragoza, donde está constituida por calizas arcillosas dispuestas en capas delgadas a laminares, que alternan con lutitas calcáreas, con presencia de nódulos y lentes de pedernal. Sus contactos inferior y superior con la Formación Cupido y Aurora, respectivamente, son bruscos y concordantes, aunque ligeramente transicional con ésta última. Rogers et al., (1961), le asignan edad Aptiano-Albiano. Su contenido fósil y litología sugieren un depósito de aguas de mediana profundidad.

Formación Aurora

Humphrey (1956) propuso que el término Formación Aurora fuera modificado para incluir todas las rocas carbonatadas del NE de México ubicadas estratigráficamente entre la Formación La Peña o sus equivalentes, abajo, y la Formación Cuesta del Cura y otros equivalentes del Grupo Washita o la Formación Kiamichi arriba. Aflora en el área de Parras, en los cañones Grande, Cuesta del Cura, Arroyo Ojo de Agua, del Potrero, de Plataneros, de Juan Pérez, de Santiago y la Sierra Prieta; así como también en gran parte de la zona Torreón-Monterrey.

Está representada por facies de aguas profundas (mudstone y wackstone), de estratificación mediana a gruesa, en ocasiones masiva con nódulos y capas delgadas de pedernal.

El color de la caliza es gris crema a gris oscuro que intemperiza a gris amarillento. El espesor varía en la región de 50 a 120 m. Sus contactos inferior y superior con las formaciones La Peña y Cuesta del Cura, respectivamente, son nítidos y concordantes.

En el área del acuífero, aflora al oriente de la ciudad de Lerdo, donde está constituida por calizas de estratificación mediana a gruesa, ocasionalmente masiva, con nódulos de pedernal.

Por su posición estratigráfica parece corresponder al principio del Albiano al Albiano Medio. Se correlaciona con la porción inferior de la Caliza El Abra y la porción inferior de la Formación Tamaulipas Superior, en la Cuenca Tampico-Misantla; con las formaciones Acatita y Paila del área de Delicias, Coahuila, y con la barrera arrecifal denominada Formación Viesca. Su litología y contenido fósil indican que su depósito ocurrió en facies de cuenca y se desarrolló alrededor de la Plataforma de Delicias (Albiano-Cenomaniano).

Algunos geólogos de PEMEX difieren de esto y afirman que se depositó en un ambiente de plataforma, tal como se ve en el resto de la provincia de Coahuila.

Formación Cuesta del Cura

Originalmente descrita por Imlay (1936) al referirse a los afloramientos de calizas delgadas ondulantes con bandas de pedernal negro que afloran a 6.4 km al W de Parras, Coahuila, área en donde se encuentra entre las formaciones Aurora e Indidura.

Consiste principalmente de capas medianas a delgadas y onduladas de caliza de color gris a negra, compacta y un poco arcillosa; contiene nódulos, lentes y bandas de pedernal negro. Aflora en forma de una banda de lomeríos alineados en los anticlinales de Parras, Taraises, Prieta y Santiago, al SE de Torreón, pero también ampliamente en casi toda la zona Torreón-Monterrey, aunque con espesores menores de 300 m.

En el área del acuífero aflora en el flanco occidental de la Sierra El Rosario, donde está constituida por calizas dispuestas en capas medianas a delgadas, ocasionalmente onduladas y con horizontes arcillosos; presenta nódulos, lentes y bandas de pedernal.

Sus contactos inferior y superior con las formaciones Aurora e Indidura, respectivamente, son concordantes y bruscos.

Por su contenido faunístico fósil, su edad abarca desde el Albiano Medio hasta el Cenomaniano Inferior.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Indidura

Fue estudiada por primera vez por Emil Bosé en 1906 en la Sierra de Parras y posteriormente definida por Kelly en 1936 en su localidad tipo de Delicias Coahuila, específicamente en el afloramiento localizado en el flanco oriental del Cerro La Indidura, localizado aproximadamente a 8 km al norte de Tanque Toribio, en donde consiste de 30 m de lutitas y calizas resquebrajadas y calizas lajeadas. Aflora ampliamente en las estructuras anticlinales y se identifica fácilmente en campo debido a la erosión diferencial con respecto a las formaciones más resistentes que la encajonan, formando puertos y valles sobre los sinclinales.

Consiste, en términos generales, de una secuencia de wackestone arenoso arcilloso que varía gradual y transicionalmente a intercalaciones de lutitas calcáreas; estratificada en capas delgadas y medianas con espesores de 5 a 20 cm y 30 a 60 cm, respectivamente; de coloración gris oscuro a negro en muestra fresca, cambiando comúnmente a pardo amarillento y ocasionalmente en tonalidades rosáceas y rojizas, con presencia de estructura laminar, fracturas y vetillas rellenas por calcita, así como disseminaciones de óxidos. En ocasiones presenta impresiones y moldes de bivalvos (*Inoceramus labiatus*). Su espesor varía de 350 a 800 m. Sobreyace por medio de un contacto concordante y abrupto a la Formación Cuesta del Cura, solo identificado por el incremento de sedimentos pelíticos y la ausencia de pedernal.

El cambio de color al intemperismo y la disminución en el espesor de los estratos, son características que definen también el límite entre esas unidades.

Su edad corresponde al Cenomaniano Inferior-Santoniano. Aflora en la Sierra Las Noas, donde presenta un conglomerado basal, que indica una emersión de la plataforma de Coahuila; en las sierras de Solís y de Texas, localizadas al noreste de Torreón. Su espesor promedio es de 300 m.

CENOZOICO

Formación Ahuichila

Definida formalmente por Rogers (1981), en los afloramientos expuestos en el “Frontón de Ahuichila”, ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas, ubicado a unos 25 km al suroeste de Viesca, Coahuila.

Es un depósito de tipo molasa continental que se acumuló después del plegamiento de la Sierra Madre Oriental: está constituida por depósitos clásticos de origen continental (conglomerados y brechas) conformados por fragmentos de caliza, calcarenita, calcilutita y de rocas volcánicas, en una matriz calcárea y limolítica; así como calizas, arcosas, calizas de agua dulce, tobas y otros materiales piroclásticos, que se presentan en bancos gruesos y masivos; de colores que varían de gris a rojizo. Sus afloramientos son restringidos y se localizan dispersos principalmente en las zonas de pie de monte.

Está constituida por conglomerados polimícticos masivos de fragmentos de calizas y pedernal, hasta de 10 cm de diámetro, bien redondeados, mal clasificados, en una matriz arcillo-limosa fuertemente cementada por carbonato de calcio. Rogers (op.cit.) en su localidad tipo reporta un espesor de 305 m.

Aflora al noroeste de Villa Juárez, en donde alcanza un notable espesor; en las sierras Las Iglesias y Mapimí, así como en los flancos occidentales de las Sierras España y El Rosario.

Debido a su posición estratigráfica y su origen, se relaciona con los primeros depósitos de características continentales, formados como consecuencia de la emersión del continente, generada por la Orogenia Laramide. Restos de fósiles de vertebrados encontrados por Fries et al, en 1955, en otras formaciones semejantes, como el Conglomerado de Guanajuato, le asignan una edad Eoceno-Oligoceno Inferior.

Rocas intrusivas

Están representadas por rocas de composición granítica que afloran en el extremo norte de la Sierra El Sarnoso, en la zona minera de Dinamita, cuya edad es Oligoceno Temprano, determinada por el método K-Ar en 32 ± 1 Ma. A esta unidad corresponde también las rocas de composición riolítica que en forma de un cuello volcánico, compacto e impermeable se observa exclusivamente en un afloramiento aislado ubicado en el Cerro Colorado.

Rocas volcánicas

Compuestas por andesitas, basaltos y tobas, que desde el punto de vista hidrogeológico se consideran impermeables, cuyos afloramientos se localizan de manera aislada en forma de pequeños cerros que sobresalen del nivel general del relleno del valle, sobre la margen izquierda del Río Nazas, en la zona donde cambia de dirección de su cauce de una orientación sur-norte a oeste-este.

Formación Santa Inés

Nombre propuesto por Enciso de la Vega (1968) para designar a depósitos clásticos continentales que afloran al sur poniente y suroriente de Cuencamé, Durango, con un espesor de 5 a 30 m.

Consiste de clastos de roca volcánica ácida subredondeados a subangulosos, del tamaño de guijas finas a cantos rodados medianos que varían de no consolidados a bien cementados, en una matriz de grava y arena.

La litología consta de fragmentos líticos de rocas volcánicas ácidas como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e ignimbritas con un grado de esfericidad, mal clasificados, con diámetros variables de 1 a 40 cm, que en ocasiones constituyen estratificación mientras que en otros sitios se encuentran en forma caótica. Por la similitud litológica y relación estratigráfica que se aprecian, estos depósitos se correlacionaron con la Formación Los Llanos asignándole una edad correspondiente al Plioceno Tardío.

CUATERNARIO

Está representado por depósitos aluviales no consolidados constituidos por gravas, arenas y arcillas que conforman el acuífero principal de la región. Son de extensión regional y forman abanicos aluviales asociados a la estribación de sierras (pie de monte), rellenos de los valles y el cauce del Río Nazas.

4.2 Geología estructural

De la interpretación de la imagen de satélite y el modelo digital de elevación del terreno, se definieron cuatro bloques de orientación general NW-SE, limitados por una serie de falla de tipo normal, con la misma orientación.

Dichas estructuras corresponden al pilar de la Sierra El Rosario, ubicado en la porción occidental, el pilar de la Sierras Mapimí-Las Iglesias, en la porción oriental, el cual se encuentra cortado por el curvilineamiento El Sarnoso; la fosa Santa Inés, en el límite poniente, y la fosa Vicente Suárez, en la porción central.

La evolución tectónica del área inicia durante Triásico Tardío-Jurásico Medio cuando los esfuerzos tensionales se intensificaron y provocaron el rompimiento del basamento, dando lugar a la formación de fosas y pilares que se rellenaron con los depósitos continentales intercalados con rocas volcánicas, secuencia que corresponde a la Formación Nazas. Durante el Jurásico Superior, cuando el mar tethisiano inundó áreas bajas, extensas y planas, se depositaron primero terrígenos y carbonatos que formaron amplias plataformas separadas por elementos insulares; posteriormente estas plataformas evolucionaron y fueron cubiertas por terrígenos con variaciones de ambientes de depósito, originando el conglomerado de la Formación La Joya y la secuencia terrígeno-calcárea de la Formación La Gloria.

De esta forma se desarrolló la paleo-isla de Coahuila, la cual separó, entre otras, a la cuenca del Centro de México. Esta constituye una cuenca de depósito cuya subsidencia se asocia inicialmente a un control estructural. El control sedimentario y estructural de los bloques paleo-tectónicos continuó durante el Cretácico Inferior, las áreas continentales fueron cubiertas por el mar y se desarrollaron bancos y plataformas carbonatadas como la de Coahuila. Durante el Albiano Medio y Superior tiene lugar la transgresión del Golfo de México, con la cual el mar cubrió totalmente la isla de Coahuila y, hacia la Cuenca del Centro de México, ocurrió el depósito de carbonatos en ambiente de plataforma somera y de mar abierto, con la presencia de pequeños arrecifes; y un cambio de facies de plataforma a cuenca con el depósito de las formaciones Aurora y Cuesta del Cura. En el Cretácico Tardío se inicia la Orogenia Laramide con la acreción de los arcos submarinos contra las márgenes continentales; durante la deformación laramídica se produjo el desplazamiento hacia el oriente-nororiente del arco magmático, el cual se inició cerca de la costa del Pacífico y terminó casi en la costa del Golfo de México.

En este periodo las secuencias sedimentarias de ambiente de cuenca, por ser más plásticas que las de plataforma, fueron mayormente deformadas y falladas, al ser comprimidas contra la península de Coahuila, originando estructuras anticlinales y sinclinales, afectadas por cabalgaduras y originando un transporte hacia el NE de las secuencias sedimentarias mesozoicas, en donde rocas calcáreas, más resistentes y compactas, se deslizaron sobre rocas evaporítico-arcillosas.

Con la culminación de la Orogenia Laramide, en el Eoceno Tardío, originada por un cambio en el movimiento de la placa del Pacífico con relación a las placas Farallón y norteamericana, termina la deformación de las rocas depositadas en la Cuenca del Centro de México y en las plataformas carbonatadas. Continúa un periodo distensivo con el desarrollo de una serie de fosas y pilares, como consecuencia del reacomodo del basamento y la posterior erosión de las rocas deformadas que da origen a una serie de depósitos continentales, de tipo molasa (Formación Ahuichila). Estos depósitos rellenaron las cuencas tectónicas hacia las márgenes de los bloques fallados. El emplazamiento de cuerpos intrusivos y subvolcánicos en esta región coincide con una etapa de regresión del arco magmático hacia el occidente y tienen una edad situada entre 32 y 25 Ma (granito El Sarnoso). Durante el Mioceno Tardío y hasta el Pleistoceno, se produjo una serie de esfuerzos distensivos, asociados al desarrollo de la apertura del Golfo de California, que originaron fallamientos, de tipo normal y de carácter regional, de orientación general NW-SE, los cuales dieron lugar a fosas y pilares tectónicos que forman parte de la provincia de Cuencas y Sierras. Posteriormente estas cuencas tectónicas fueron rellenadas por potentes espesores de depósitos de clastos provenientes de la erosión de las rocas preexistentes (Formación Santa Inés) (Carta Geológico-Minera Vicente Suárez G13-D24. Escala 1:50,000, SGM, 2008).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero, así como con la información obtenida a partir de cortes litológicos de pozos, las evidencias de la geología superficial y estructural, se puede establecer que existe un relieve sepultado conformado por rocas sedimentarias intensamente plegadas a lo largo de ejes orientados en sentido general NW-SE, sobre el que se depositaron gruesos espesores de materiales aluviales, por lo menos de dos edades diferentes. Una serie corresponde a la Formación Santa Inés, que es un conglomerado empacado en materiales limo-arcillosos o caliche; sobre el que se acumularon depósitos aluviales más recientes y no consolidados.

El acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales, fluviales y de pie de monte de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas que rodean los valles, y los conglomerados polimícticos que los rellenan, cuyo espesor promedio en esta zona es de 250 m. Estos depósitos granulares son el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se originaron durante la fase distensiva que ocurrió después de la Orogenia Laramide. Este es el acuífero que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua subterránea de la región.

La porción inferior está alojada en un medio fracturado, posiblemente con desarrollo de carsticidad, constituido por las rocas calcáreas de las formaciones Cuesta del Cura y Aurora. A mayor profundidad las calizas de la Formación Cupido y Zuloaga pueden funcionar como acuífero confinado o semiconfinados debido a que están sub y sobreyacidas por rocas arcillosas (figura 3). Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento del acuífero, están constituidas por las rocas arcillosas de las formaciones La Peña y Taraises, las secuencias arcillo-calcáreas compactas de las formaciones La Casita y La Gloria y las rocas ígneas intrusivas. El basamento regional está constituido por la secuencia de rocas volcánicas, sedimentarias y lechos rojos de la Formación Nazas.

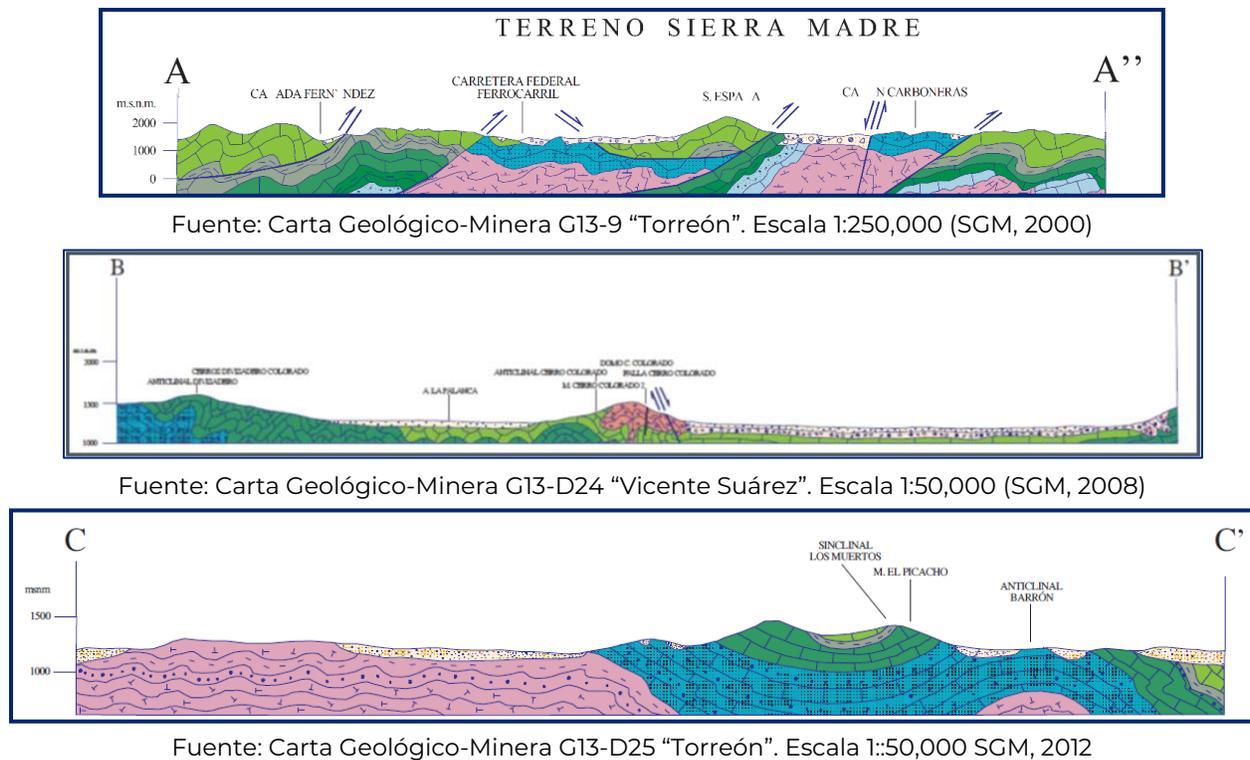


Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, depositados en los valles y en los cauces de ríos y arroyos, así como conglomerados polimícticos y depósitos de pie de monte acumulados en las estribaciones de las sierras, cuyo espesor promedio es de 250 m en el centro de los valles.

Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua en la región. La porción inferior se aloja en calizas de las formaciones Cuesta del Cura y Aurora, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución. La secuencia de rocas carbonatadas del Cretácico Inferior y Jurásico Superior, constituye un acuífero de alta permeabilidad que ha demostrado su potencial en otros acuíferos aledaños, y que, al estar encajonadas por rocas arcillosas, puede presentar condiciones de semiconfinamiento y confinamiento.

5.2 Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos de las unidades que conforman el acuífero en explotación, se analizó la información de pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, que fueron realizadas en estudios previos. De su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que la conductividad hidráulica de los materiales que conforman el acuífero varía de 6.9 a 632.5 m/d (8.0×10^{-5} a 7.32×10^{-3} a m/s) y que los valores de transmisividad varían entre 1.7 y 46.2×10^{-3} m²/s, con caudales específicos varían entre 0.5 y 42 lps/m.

Los valores más altos de estos parámetros se localizan en los aprovechamientos ubicados en las zonas cercanas al cauce del Río Nazas, especialmente hacia el estrechamiento San Fernando que comunica con el acuífero vecino Principal-Región Lagunera, en donde los depósitos aluviales y fluviales son de granulometría más gruesa. Ninguna de la prueba de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no existe información del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, de balances realizados en estudios previos, para diferentes áreas y periodos, se han obtenido de la ecuación valores de rendimiento específico que varían de 0.1 a 0.2, dependiendo de la granulometría de los depósitos detríticos.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información piezométrica recabada por el Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte de la Comisión Nacional del Agua, para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2010-2016, por ser el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial.

Con respecto a la piezometría de 2016, se tomaron en cuenta las mediciones realizadas durante el estiaje, no las obtenidas después del tránsito del agua por el río Nazas procedente del desfogue de la Presa Francisco Zarco, el cual ocurre eventualmente cada 8 ó 10 años, para evaluar la condición más crítica, que es la que predomina la mayor parte del tiempo.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2016 muestra valores que varían, de manera general, de menos de 5 m a 80 m, los cuales se incrementan, por efecto de la topografía, desde el cauce del río Nazas, hacia las estribaciones de las sierras que delimitan los valles.

Las profundidades más someras, menores de 5 m, se presentan a lo largo del cauce del Río Nazas, desde la salida del Cañón de Fernández, hasta el límite con el acuífero Principal-Región Lagunera; en tanto que los más profundos, de 60 a 80 m, se registran en la zona agrícola ubicada al noreste de El Colorado, donde se concentra la extracción para uso agrícola y la recarga es menor porque no tiene la influencia del río Nazas (figura 4).

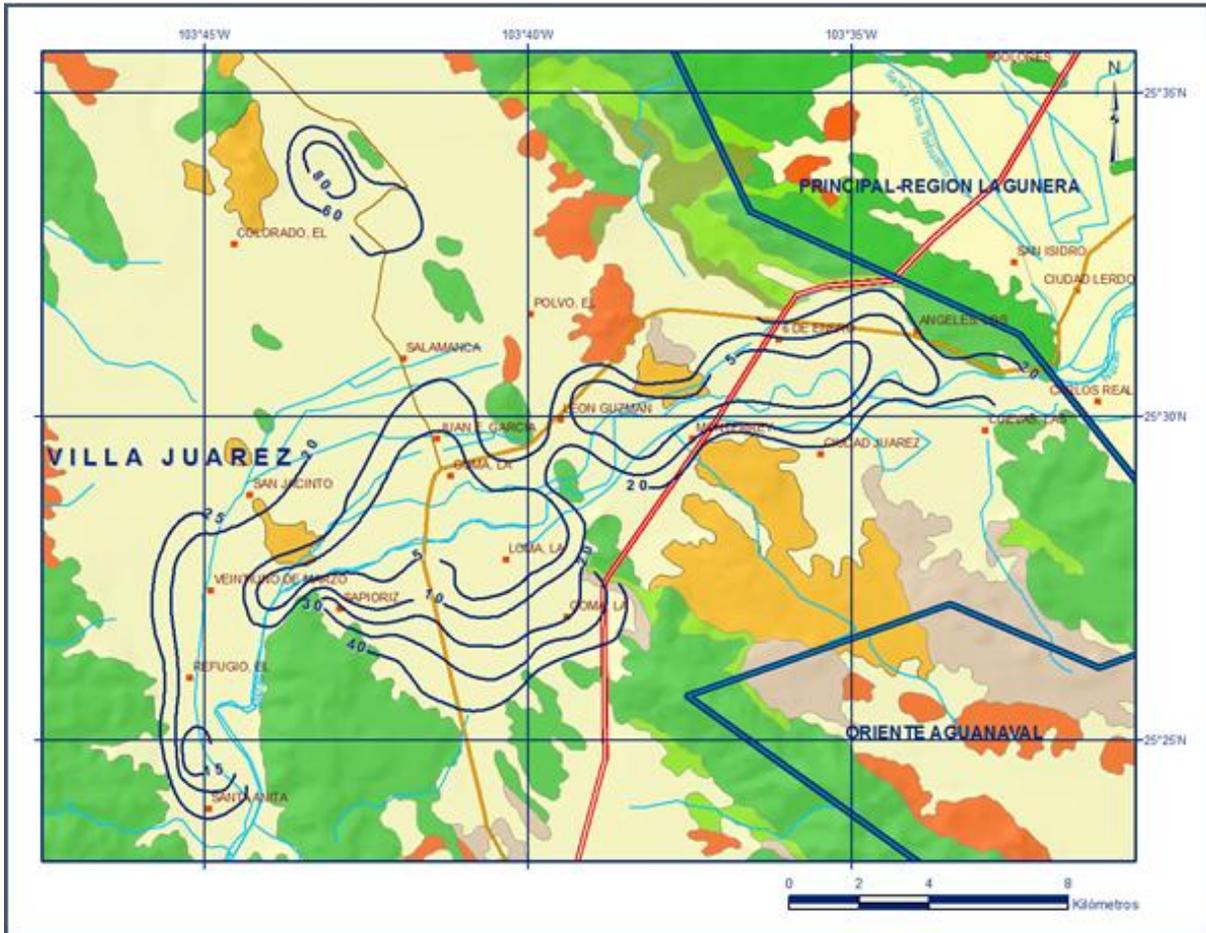


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2016)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2016 registró valores que varían de 1,190 a 1,130 msnm. Las menores elevaciones, de 1,130 a 1,140 msnm, se registran en la región oriental del acuífero a lo largo del cauce del Río Nazas, en el límite con el acuífero Principal-Región Lagunera, entre Ciudad Juárez y el estrechamiento de San Fernando; en tanto que las elevaciones mayores, de 1,170 a 1,190 msnm, se presentan en la porción occidental del acuífero, hacia San Jacinto, y en la entrada al Cañón de Fernández.

La dirección preferencial del flujo subterráneo presenta una orientación oeste-este, con alimentaciones provenientes de los flancos norte y sur, hacia el acuífero vecino Principal-Región Lagunera, de manera paralela al escurrimiento superficial del Río Nazas (figura 5).

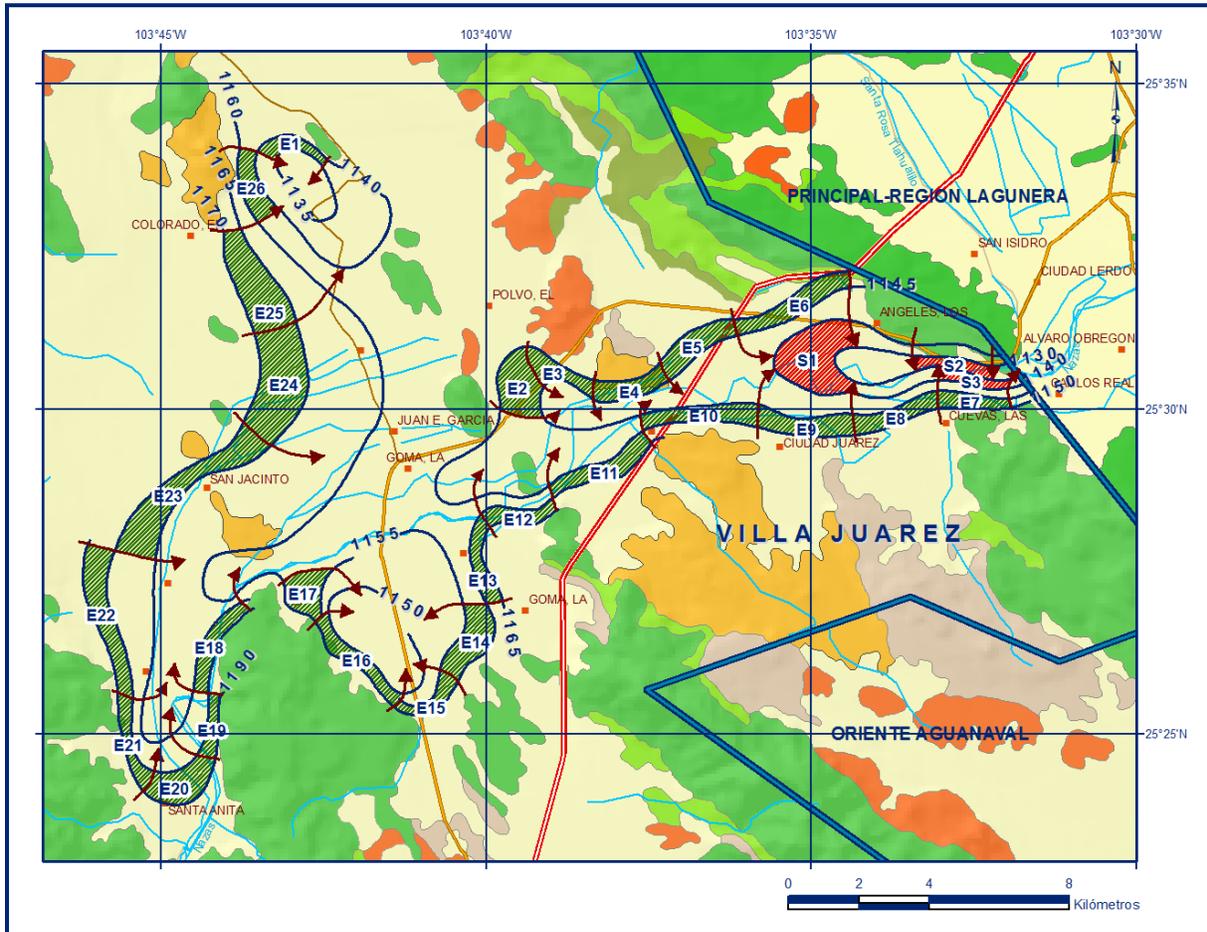


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2016)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2016 registró abatimientos que varían de 1 a 14 m, que presentan un ritmo anual de 0.2 a 2.3 m. Los mayores abatimientos, de 10 a 14 m, que representan en promedio 2 m anuales, se observan de manera local al norte del acuífero, en la zona agrícola que se ubica al noreste de El Colorado.

Abatimientos menores, de 1 a 2 m, es decir 0.2 m anuales se registraron a lo largo de curso del Río Nazas, desde San Anita y El Refugio, que se localizan en la entrada al Cañón de Fernández, hasta el límite con el acuífero Principal-Región Lagunera. En la superficie restante del acuífero no se registran cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6). Cuando existen escurrimientos naturales en el Río Nazas o por el desfogue del agua de la Presa Francisco Zarco, se registran recuperaciones del nivel del agua subterránea en los aprovechamientos localizados cerca de su cauce.

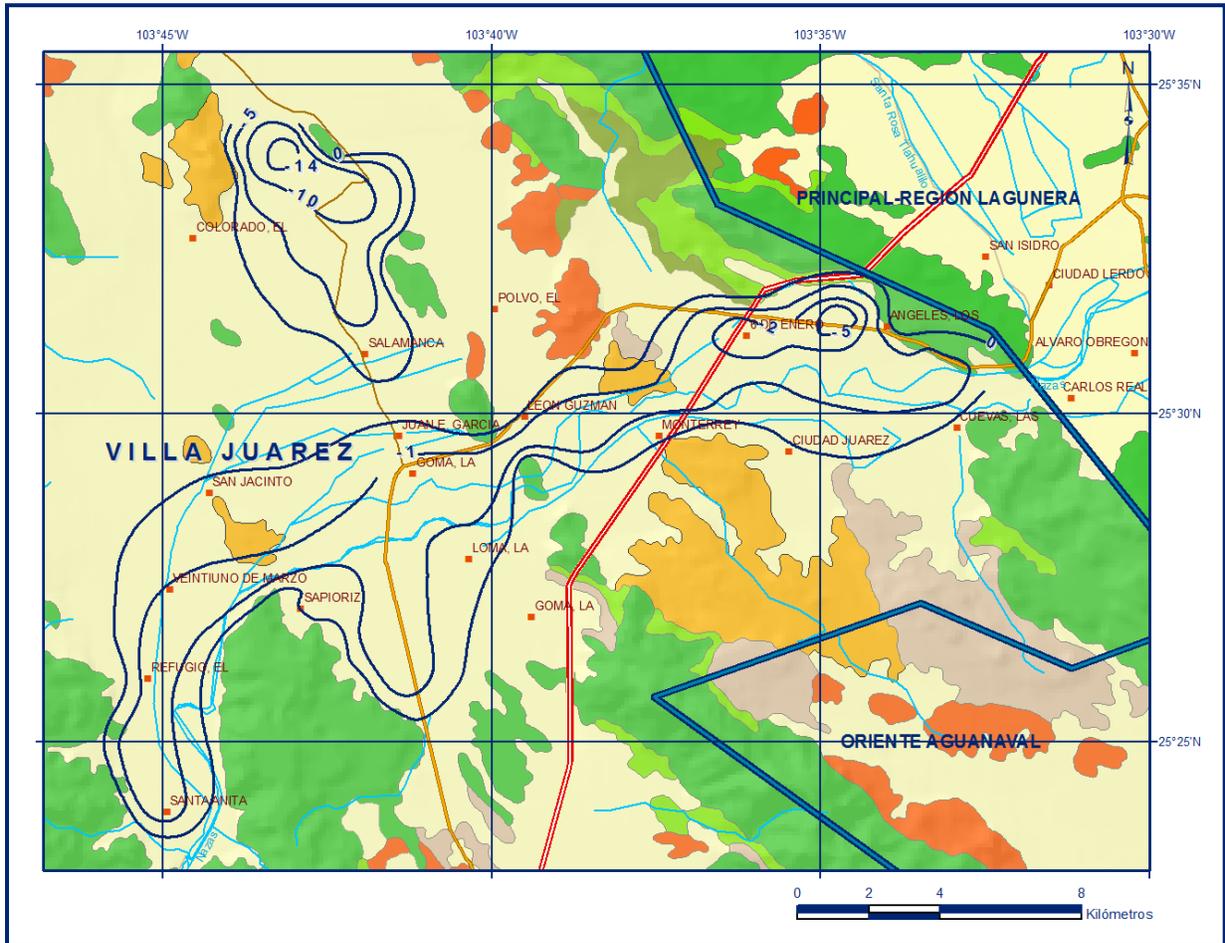


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2010-2016)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de la Evaluación de Fuentes de Agua Potable de la Región Lagunera, operada por el OCCCN y de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, en 2017 se obtuvieron 26 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 y bacteriológicos como temperatura, conductividad eléctrica, coliformes fecales y totales, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox, (Eh), conductividad eléctrica, dureza total, alcalinidad total, oxígeno disuelto, nitratos, nitrógeno amoniacal, iones principales, compuestos orgánicos e inorgánicos, hidrocarburos, arsénico, cromo, cadmio, fierro, mercurio, manganeso, plomo, fósforo, zinc y magnesio.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) variaron, de manera general, de 276 a 1896 mg/l, de las muestras superaron el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022.

De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a salobre, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 610 a 3035 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registraron en la porción occidental el acuífero y se incrementan en dirección general oeste-este, confirmando la dirección preferencial del flujo subterráneo. Las temperaturas registradas variaron de 21 a 30 °C, en tanto que el pH varía de 6.8 a 7.8.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que la familia del agua que predomina es la bicarbonatada-cálcica, que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia que han circulado a través de rocas calcáreas.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la mayoría de las muestras se clasifican como C_1-S_1 y C_2-S_1 que presenta contenido bajo a medio de sales y baja concentración de sodio; que se considera apta para el uso agrícola sin restricción alguna en los cultivos ni en el tipo de suelo, sin generar problemas por el sodio intercambiable. De las determinaciones realizadas, se establece que el agua presenta concentraciones por arriba del LMP que establece la norma mexicana en STD, bicarbonatos, dureza total, sulfatos, nitratos y arsénico, así como en microorganismos indicados como coliformes totales y fecales.

Además de las fuentes naturales de contaminación del agua, están presentes las relacionadas con las actividades agrícolas, pecuarias y las aguas residuales de uso público-urbano.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

No existe un censo reciente y confiable que cubra la superficie completa del acuífero. Por esta razón se tomó en cuenta la información procedente del Registro Público de Derechos del Agua, a la fecha de corte del 31 de diciembre de 2015, según la cual existen en el acuífero 539 aprovechamientos del agua subterránea, todos ellos activos. De ellos, 179 son para uso agrícola, 180 para abastecimiento de agua potable, 58 para uso doméstico-pecuario, 8 para uso industrial y 114 para usos múltiples. El volumen total de extracción es de **42.9 hm³ anuales**, de los cuales 24.1 hm³ (56.2%) se destinan al uso agrícola, 3.0 hm³ (7.0%) es para el abastecimiento de agua potable, 8.8 hm³ (20.5%) para uso industrial, 0.4 hm³ (0.9%) para usos doméstico-pecuario y 6.6 hm³ (15.4%) para usos múltiples.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2010-2016, que es el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial, en una superficie de **128 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 masa es la siguiente:

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

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 de un 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 y a lo largo de los canales de distribución; 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, sólo se considera la recarga debida a los excedentes del riego agrícola debido a que el volumen que se utiliza para uso público-urbano es pequeño.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri:** Recarga Incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración real
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2 Entradas subterráneas horizontales (Eh)

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

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2016 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

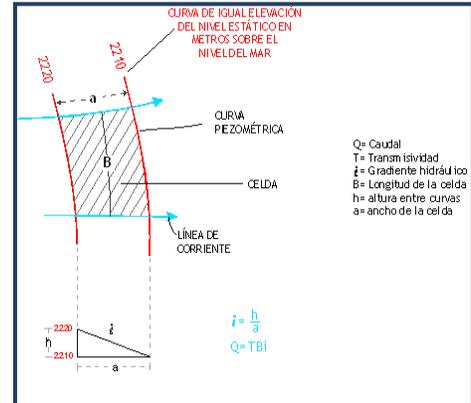
Donde:

Q = Gasto;

T = Transmisividad;

B = Longitud de la celda;

i = Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **34.9 hm³/año**, como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal (2016)

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	1775	445	5	0.0112	0.0004	0.0080	0.3
E2	1445	1335	5	0.0037	0.0010	0.0054	0.2
E3	1890	665	5	0.0075	0.0010	0.0142	0.4
E4	2220	555	5	0.0090	0.0012	0.0240	0.8
E5	2335	720	5	0.0069	0.0030	0.0486	1.5
E6	3555	555	5	0.0090	0.0025	0.0801	2.5
E7	2000	445	5	0.0112	0.0025	0.0562	1.8
E8	2445	500	5	0.0100	0.0025	0.0611	1.9
E9	2775	665	5	0.0075	0.0015	0.0313	1.0
E10	3335	500	5	0.0100	0.0030	0.1001	3.2
E11	3110	555	10	0.0180	0.0015	0.0841	2.7
E12	2000	445	5	0.0112	0.0035	0.0787	2.5
E13	2555	500	5	0.0100	0.0012	0.0307	1.0
E14	2220	835	5	0.0060	0.0015	0.0199	0.6
E15	2110	390	5	0.0128	0.0006	0.0162	0.5
E16	3220	390	10	0.0256	0.0006	0.0495	1.6
E17	1335	890	5	0.0056	0.0010	0.0075	0.2
E18	2780	390	5	0.0128	0.0010	0.0356	1.1
E19	1890	445	20	0.0449	0.0006	0.0510	1.6
E20	2110	835	20	0.0240	0.0012	0.0606	1.9
E21	2780	335	20	0.0597	0.0006	0.0996	3.1
E22	4220	665	20	0.0301	0.0006	0.0762	2.4
E23	5000	890	5	0.0056	0.0006	0.0169	0.5
E24	3110	1335	5	0.0037	0.0010	0.0116	0.4
E25	3000	1110	5	0.0045	0.0006	0.0081	0.3
E26	2000	610	20	0.0328	0.0005	0.0328	1.0
Total entradas							34.9

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, adaptados al espesor saturado de cada zona.

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

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

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 15% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea es menor a 20 m en la mayor parte de las áreas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media en el subsuelo de estas zonas.

De esta manera, considerando que para el uso agrícola se utilizan 86.1 hm³ anuales, de los cuales 24.1 hm³ son de agua subterránea y 62.0 hm³ de agua superficial procedente de la Presa Francisco Zarco que se utiliza en el Módulo III "San Jacinto" del DR 017, y que un 15% de éste recarga de manera efectiva al acuífero, se obtiene una recarga incidental por excedentes del riego agrícola de 12.9 hm³ anuales. **Rr = 12.9 hm³ anuales.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), de manera natural por flujo subterráneo (Sh) hacia el acuífero Principal-Región Lagunera y por evapotranspiración (ETR) en la zona de niveles freáticos someros localizada a lo largo del Río Nazas.

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 elevación del nivel estático para el año 2016 (figura 5); su valor estimado es de **7.0 hm³/año**, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal (2016)

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	3000	1000	10	0.0100	0.0015	0.0450	1.4
S2	2220	390	10	0.0256	0.0020	0.1138	3.6
S3	2055	335	10	0.0299	0.0010	0.0613	1.9
Tota salidas							6.9

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es del orden de **42.9 hm³ anuales**.

7.2.3 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. El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 19 °C y precipitación = 365 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 363.8 mm.

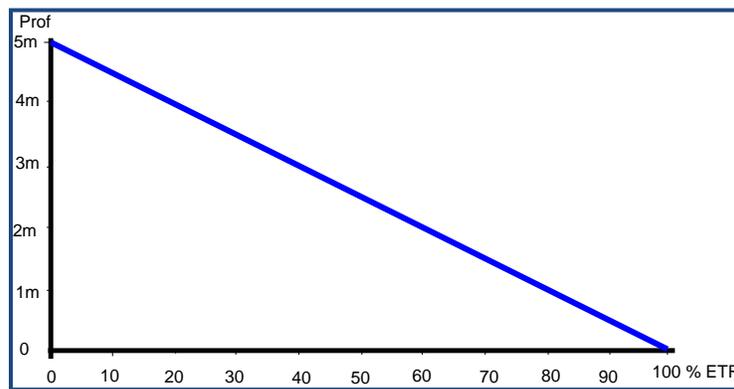
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	19		
P (mm) =	365	P ² =	133225
L =	1117.95	L ² =	1249812.2
ETR (mm)	363.8		

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 metros, 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 metros, 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 porcentaje de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el porcentaje 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.



Por lo tanto, la estimación del valor de la evaporación se calcula multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, a las diferentes profundidades consideradas.

De esta manera, si consideramos una superficie de 28.7 km² de niveles freáticos someros, en la que la profundidad promedio al nivel estático es de 3 m, de acuerdo con la gráfica anterior le corresponde el 40% de la lámina de ETR obtenida de 0.3638 m anuales; esto da como resultado un volumen de 4.2 hm³ anuales. **ETR = 4.2 hm³/año.**

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 2010-2016 (figura 6).

Con base en ella y valores de rendimiento específico promedio de 0.1, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 128 km², mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- ΔV(S)=** Cambio de almacenamiento en el período analizado
S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
A= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático
h= Valor de la variación piezométrica en el período

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2010-2016 se pueden observar en la tabla 4.

El volumen anual del cambio de almacenamiento es de **- 4.3 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2010-2016)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
0 a -1	-0.5	54.6	0.1	-2.7
0 a -5	-2.5	10.1	0.1	-2.5
-1 a -2	-1.5	45.6	0.1	-6.8
-2 a -5	-3.5	4.0	0.1	-1.4
-5	-5	0.6	0.1	-0.3
-5 a -10	-7.5	8.3	0.1	-6.2
-10 a -14	-12.0	4.3	0.1	-5.2
-14.0	-14	0.5	0.1	-0.7
Área de balance		128.0	TOTAL	-25.9
Promedio anual				-4.3

Solución a 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:

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

$$R_v = 42.9 + 6.9 + 4.2 - 4.3 - 34.9 - 12.9$$

$$R_v = 1.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 1.9 + 34.9 + 12.9 \\ R &= 49.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **49.7 hm³/año**, de los cuales 36.8 hm³ son recarga natural y 12.9 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 del acuífero Villa Juárez, el volumen de las descargas naturales comprometidas es de 6.9 hm³ anuales, que corresponden a las salidas subterráneas hacia el acuífero vecino Principal-Región Lagunera.

Por lo tanto, **DNC = 6.9 hm³ anuales.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua extraídos 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 **44,254,492 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 49.7 - 6.9 - 44.254492 \\ \text{DMA} &= -1.454492 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **1,454,492 m³ anuales**.