



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO LA ZARCA-REVOLUCIÓN (1028),  
ESTADO DE DURANGO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1</b>	<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2</b>	<b>ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>5</b>
3.1	Provincia fisiográfica.....	5
3.2	Clima.....	6
3.3	Hidrografía .....	6
3.4	Geomorfología.....	7
<b>4</b>	<b>GEOLOGÍA.....</b>	<b>7</b>
4.1	Estratigrafía.....	8
4.2	Geología Estructural.....	12
4.3	Geología del subsuelo .....	13
<b>5</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>14</b>
5.1	Tipo de acuífero .....	14
5.2	Parámetros hidráulicos.....	14
5.3	Piezometría .....	14
5.4	Comportamiento hidráulico.....	15
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	15
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3	Evolución del nivel estático .....	18
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	18
<b>6</b>	<b>CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>19</b>
7.1	Entradas .....	20
7.1.1	Recarga Vertical (Rv).....	20
7.1.2	Entradas subterráneas horizontales (Eh).....	21
7.2	Salidas.....	22
7.2.1	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	22
7.2.2	Evapotranspiración (ETR).....	23
7.2.3	Bombeo (B).....	24
7.3	Cambio de Almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	24
<b>8</b>	<b>DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>25</b>
8.1	Recarga total media anual (R).....	25
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	26
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	26
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) .....	26
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>28</b>

## **1 GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 "Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

### **1.1 Localización**

El acuífero La Zarca-Revolución, definido con la clave 1028 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de Durango, entre las coordenadas 25° 34' y 26° 08' de latitud norte y 104° 26' y 105° 00' de longitud oeste, abarcando una superficie de 1987 km<sup>2</sup> (Figura 1). Limita al norte con el acuífero San Fermín, al noroeste con Revolución, al este con Ceballos, al sur con Victoria y Nazas y al suroeste con el acuífero Buenos Aires, todos ellos pertenecientes al estado de Durango.

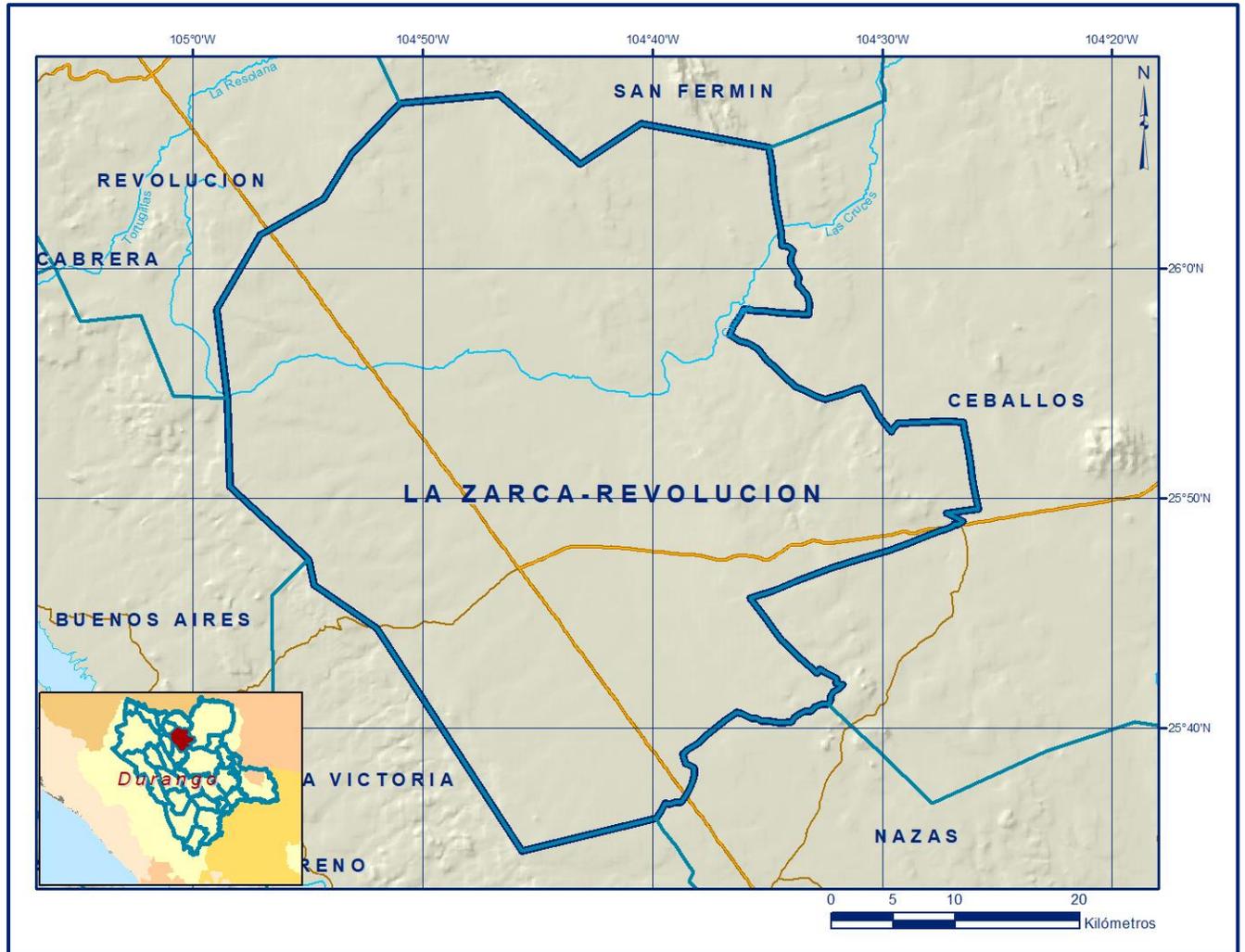


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero se localiza casi en su totalidad dentro del municipio de Hidalgo y una pequeña porción de su extremo suroccidental en el municipio de Indé.

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 1 028 LA ZARCA-REVOLUCION							
VERTICE	LONGITUDOESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	26	17.2	25	52	19.8	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE MUNICIPAL
2	104	32	21.8	25	41	1.2	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE MUNICIPAL
3	104	39	50.2	25	36	3.4	
4	104	45	39.8	25	34	38.1	
5	104	51	58.7	25	44	19.6	
6	104	54	43.3	25	46	12.9	
7	104	54	56.5	25	47	21.7	
8	104	58	23.5	25	50	29.7	
9	104	58	30.1	25	54	21.0	
10	104	58	57.6	25	58	13.1	
11	104	57	3.6	26	1	28.1	
12	104	54	18.0	26	3	3.7	
13	104	53	6.7	26	4	59.3	
14	104	50	59.7	26	7	11.5	
15	104	46	40.1	26	7	35.8	
16	104	43	7.4	26	4	33.7	
17	104	40	28.2	26	6	18.5	
18	104	34	56.5	26	5	17.2	DEL 18 AL 1 POR EL LIMITE MUNICIPAL
1	104	26	17.2	25	52	19.8	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece a la región Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Durango.

Su territorio completo no se encuentra sujeto a ninguna veda para la extracción de agua subterránea.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. El uso principal del agua subterránea es el agrícola.

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

## 2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero no se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, sólo algunos con fines de prospección minera. En algunos acuíferos vecinos se han realizado estudios hidrogeológicos para determinar su recarga media anual. El único estudio que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación:

**ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS CABRERA-OCAMPO, MATALOTES-EL ORO, SAN JOSÉ DE NAZARENO, GALEANA-EL QUEMADO, LA VICTORIA, BUENOS AIRES, TORREÓN DE CAÑAS, SAN FERMÍN, SAN JUAN DEL RÍO, CABRERA, LA ZARCA-REVOLUCIÓN Y REVOLUCIÓN, EN EL ESTADO DE DURANGO. Realizado en Convenio por la Universidad de Sonora (UNISON) para la Comisión Nacional del Agua en 2010.**

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

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

### **3 FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincia fisiográfica**

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas del INEGI (1997), el área que comprende el Acuífero se ubica dentro de la provincia Fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte, Subprovincia del Bolsón de Mapimí. La provincia está constituida por sierras bajas y abruptas con elevaciones entre 1590 a 1950 m.s.n.m. con orientación nornoroeste-sursureste separadas por grandes bajadas y llanuras rellenas de material aluvial, presentando un drenaje interno.

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

La subprovincia 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**

Con base en la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el acuífero La Zarca-Revolución se presentan climas secos esteparios (BS), principalmente de dos tipos: BS<sub>1</sub>kw(w) y BS<sub>0</sub>kw(w), que son los menos secos. El primero de ellos es el que predomina.

El tipo BS<sub>1</sub>kw(w) es de subtipo semiseco (i), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Por otro lado, en el clima BS<sub>0</sub>kw(w), el subtipo (o) indica que es seco, pues su grado de humedad es menor de 22.9. La condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando las temperaturas medias anual del mes más frío y del más cálido, corresponde con templado con verano cálido.

Presentan una temperatura media anual entre 12 y 18 °C, la media mes más frío entre -3 y 18 °C y la del más cálido > 18 °C. El régimen de lluvia (w), que define el comportamiento de la lluvia durante el año indicando la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, es de verano. Esto significa que 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) es < 5.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de cinco estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: El Palmito, Cinco de Mayo, Villa Hidalgo, Agua Puerca y El Mirador, cuyo registro comprende los periodos 1938-2007, 1964-2006, 1961-2006, 1979-2006 y 1979-2006, respectivamente. Con estos datos y utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **396.9 mm y 16.5 °C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2,428.8 mm anuales**.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica RH 35 denominada Mapimí, Cuenca del Arroyo Cerro Gordo y Otros. Esta Región se encuentra situada al norte del país, en la altiplanicie septentrional; ocupa porciones de los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango. Está comprendida entre los meridianos 102°00' y 105°06' de longitud oeste, y los paralelos 25°37' y 28°43' de latitud norte.

El área de esta región es de 56,883 km<sup>2</sup>; limita al norte y oriente con la región hidrológica 24b, al occidente la región hidrológica 24a, al sureste con la región hidrológica 24c, y al sur con la región hidrológica 36. El río Las Cruces y el arroyo Jaral Grande son las corrientes principales y desembocan a la laguna de Las Palomas. La hidrografía está compuesta por arroyos secos prácticamente todo el año, los cuales en algunas áreas se pierden debido a las fallas y fracturas de la sierra.

Entre estos arroyos destacan El Rey, El Coyote, El Zorrillo y La Leche, los cuales forman las pequeñas lagunas efímeras del mismo nombre. Sólo la laguna Las Palomas es perenne.

### **3.4 Geomorfología**

El relieve se caracteriza por fosas originadas por la erosión en la zona de los valles fluviales, presentes tanto en la planicie como en la sierra. También por pilares causados por esfuerzos de tensión en la sierra de Atotonilco.

Existe en el paisaje sierras plegadas que se encuentran enclavadas en una extensa planicie. Estas sierras son bajas y estrechas, con valles intermontanos orientados en sentido NW-SE, ligeramente arqueadas y con altitudes de hasta 2150 msnm. La zona de la planicie, donde es común la acumulación de aluviones, presenta taludes que forman pie del monte. El área presenta rasgos de madurez morfológica en su última etapa. Los tipos de drenaje varían de subparalelo a angular principalmente, en la región oeste de anular-paralela que vierten a los valles y la región noreste presenta un drenaje radial.

## **4 GEOLOGÍA**

Las rocas y secuencias que afloran en el área cubierta por el acuífero presentan una complejidad litológico-estructural muy importante, cuyo origen está asociado a diversos procesos geológicos que se han sucedido en esta porción de la República Mexicana. Es importante establecer que el estado de Durango se ubica morfo tectónicamente justo en la transición entre el dominio geográfico de la Sierra Madre Occidental y el dominio geográfico de la Plataforma Coahuila (López-Ramos, 1981; Eguiluz de Antuñano y Campa-Uranga, 1982) (Figura 2).

En este contexto, las litologías presentan una mezcla de evidencias geológico-estructurales que obedecen principalmente a la sobreposición de diversos ambientes tectónicos.

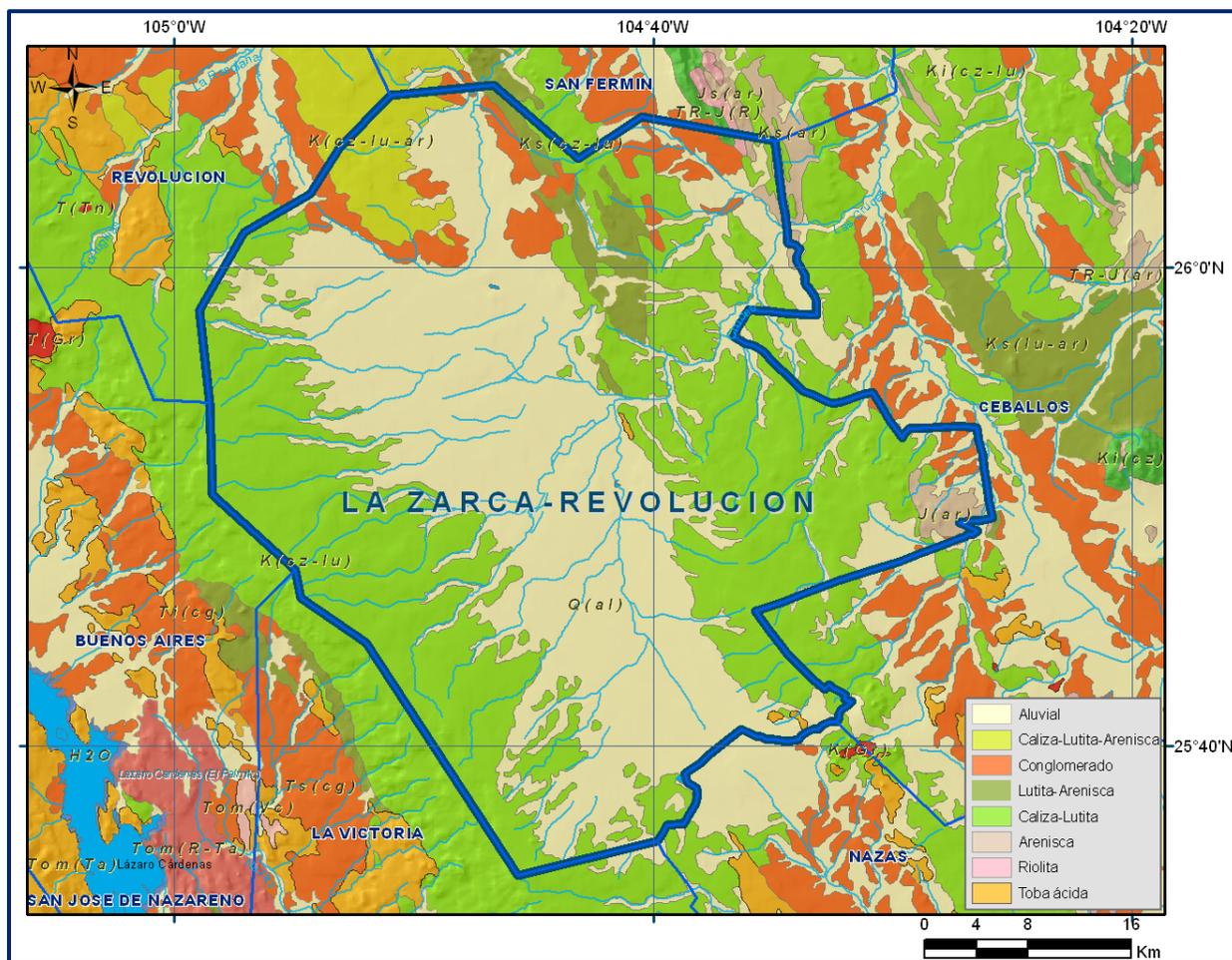


Figura 2. Geología general de acuífero

En el extremo norte del acuífero afloran rocas sedimentarias de tipo areno-calcareas, depositadas durante el Triásico. El Cretácico está representado por estructuras que forman las sierras que delimitan los extremos oriental y occidental, con orientación NW-SE, controladas por anticlinales buzantes.

#### 4.1 Estratigrafía

Por las características litológicas y estructurales observadas en campo, es posible hacer la separación de las Cuencas Mezcalera, ubicada en la porción occidental, y Mesozoica ubicada en la porción oriental, las cuales se caracterizan por presentar litologías y estilos de deformación particulares (Carta Geológica-Minera G13-B82 "Atotonilco", SGM, 2002). A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en el área de la más antigua a la más reciente.

## **Triásico Superior**

### **Formación Nazas**

El basamento de la región está constituido por la Formación Nazas (Clemons R.F. y McLeroy D.F., 1965), conformada por derrames andesíticos con intercalaciones de limolita, riolita e ignimbrita que afloran en la suroriental del acuífero.

De acuerdo con las dataciones radiométricas por los métodos K/ar y Rb/Sr, realizados por Grajales N.M. y colaboradores (1992), su edad corresponde al Triásico Superior-Jurásico Inferior.

## **Jurásico Superior**

### **Formación La Gloria**

Sobreyaciendo discordantemente a la unidad anterior, se presenta un paquete de rocas jurásicas que corresponde a la Formación La Gloria, la cual en la región está dividida en tres miembros: el inferior corresponde a una secuencia arenosa, el medio a una secuencia areno-calcárea y el superior está conformado únicamente calcárea. Tomando en cuenta los estudios paleontológicos realizados por Contreras M.B. y Colaboradores (1988), se le asigna una edad correspondiente al Jurásico Superior (Oxfordiano-Kimmeridgiano).

### **Formación La Casita**

Consiste de una secuencia de areniscas y lutitas que afloran en la porción suroriental del acuífero, al suroeste del Rancho La Parrita

## **Cretácico Superior**

**Formación Mezcalera.** Es la unidad más antigua y está representada por una alternancia rítmica tipo flysch de areniscas y lutitas, cuyos afloramientos principales se localizan en las porciones nororiental y oriental del acuífero.

Litológicamente está constituida por una secuencia rítmica de areniscas de grano fino y lutitas intercaladas con horizontes gruesos de calizas y limolita. Como cambio de facies de esta secuencia, se presentan rocas calcáreas de la Formación Aurora (KaCZ-Lu), constituida por calizas, dolomías, pedernal y horizontes arcillosos, que afloran ampliamente en las sierras que conforman los límites oriental y occidental del acuífero, en forma de anticlinales.

## **Formación Aurora**

El nombre Formación Aurora fue propuesto por Burrows (1910) para aquellas rocas que afloran en la porción noreste del estado de Chihuahua, donde están constituidas por capas gruesas de calizas fosilíferas, que presentan abundantes nódulos de pedernal. Está constituida por calizas de estratificación media a gruesa con diversos desarrollos arrecifales y algunos horizontes de calcarenitas. Presenta una coloración de tonalidad gris a oscura, escasos nódulos de pedernal y hematita hacia la cima.

Presenta fracturamiento general que varía de moderado a intenso, estructuralmente forma pliegues anticlinales cuyo eje se orienta al noroeste-sureste y echados suaves más o menos uniformes.

Sobreyaciendo discordantemente a la Formación Mezcalera se presenta una secuencia calcárea de edad Albiano.

En Cuenca Mesozoica se lleva a cabo un cambio de facies con la Formación Taraises, la cual consiste de una secuencia de calizas y lutitas. Sobreyaciendo discordantemente a esta formación, se presenta la Formación Caracol, la cual consiste de una secuencia de areniscas y lutitas.

Durante el Cretácico Superior, se presenta una intrusión de un cuerpo de composición diorítica a granodiorítica, que afecta a las unidades descritas.

## **Paleógeno-Neógeno**

### **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, está constituida por depósitos clásticos de origen continental (conglomerados y brechas) conformados por fragmentos de caliza, calcarenitas, calculadita y de rocas volcánicas, con matriz calcárea y limo lítica, que se presentan en bancos gruesos y masivos; de colores que varían de gris al rojizo.

Debido a su posición estratigráfica y su origen, el cual se relaciona con los primeros depósitos de características continentales, formados como consecuencia de la emersión del continente generada por la Orogenia Laramie, su edad se considera del Eoceno-Oligoceno.

Durante el Oligoceno Superior, se presenta un cuerpo volcánico correspondiente a un pórfido que se encuentra afectando directamente al miembro medio de la Formación La Gloria.

### **Formación Las Palmas. Conglomerado polimíctico**

Aflora al sur de la localidad Las Palmas y está constituida por fragmentos riolíticos y andesíticos subredondeados con diámetros menores de 2 cm y máximos a 1 m; presenta un espesor aproximado de 30 a 60 m. Sobreyace en marcada discordancia angular a la andesita e infrayace en forma discordante a las brechas, tobas, areniscas y limolitas de las capas rojas.

### **Formación Gamón**

Aflora en la Sierra Gamón y está conformada de la base a la cima por brechas riolíticas constituidas por fragmentos angulosos de andesita, riolita; tobas riolíticas cubiertas por ignimbritas; riolíticas masivas con zonas de ignimbritas brechoides y fases fluidales con intercalaciones de tobas líticas aglomeráticas con vitrófidos, las cuales son afectadas por domos de pórfidos riolíticos traquíticos y riodacíticos (Lyons,1975).

### **Conglomerado polimíctico Formación Santa Inés**

Fue propuesto por E. 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 de subredondeado a subanguloso, mal clasificados, con diámetros variables de 1 a 40 cm, semicompactos a cementados en una matriz arenosa, constituyendo en ocasiones 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.

## Depósitos fluviales

Constituyen grandes acumulaciones de material de origen fluvial, producto de la intensa erosión de las formaciones volcánicas terciarias y cuaternarias con su posterior transporte y depósito, lo cual ha originado la formación de extensas planicies aluviales y lacustres.

Están formados por clásticos subredondeados a redondeados con un rango granulométrico muy amplio, desde gravas a arcillas. Se le ha asignado a esta unidad una edad del Cuaternario Holoceno.

## 4.2 Geología Estructural

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

Se presentan estructuras producto de deformación dúctil, representadas por las foliaciones de rumbo NW-SE con inclinación al suroeste y noreste, que se presentan en las rocas sedimentarias de la Formación Mezcalera, en las que el plegamiento de las foliaciones genera una serie de micropliegues muy cerrados.

Los eventos tectónicos de los que se tiene registro para este rango de edades en la región corresponden principalmente a aquellos relacionados con: a) el desarrollo de una cuenca mesozoica asociada a la apertura del Golfo de México (Rueda-Gaxiola, 2004), b) un proceso de subducción a lo largo de la margen pacífica de Norteamérica desde el Mesozoico y hasta el Cenozoico Tardío (Ferrari et al., 2005), c) la presencia de un evento compresivo en el marco de un ambiente de retro-arco a finales del Cretácico e inicios del Terciario (Eguiluz de Antuñano et al., 2000), y d) la distensión cortical asociada a la provincia extensional del *Basin and Range* (Henry y Aranda-Gómez, 1992).

Las deformaciones generadas como consecuencia de la subducción de la Placa del Pacífico Oriental, que se manifestó en el margen occidental de México hacia el oriente, generó esfuerzos compresivos de W-SW a E-NE, iniciando la denominada Orogenia Laramide desde el Cretácico Tardío hasta el Eoceno Tardío en varios episodios, (Araujo y Arenas, 1983); las rocas fueron comprimidas casi perpendicularmente contra la paleopenínsula de Coahuila, resultando una serie de pliegues angostos y alargados con dirección NW-SE en la región.

Con la culminación de esta orogenia finaliza la deformación compresiva, y se desarrolla el vulcanismo riolítico de la Sierra Madre Occidental (Demant y Robin, 1975). Posteriormente se genera un periodo distensivo que originó una serie de fosas y pilares, acompañada con la erosión consecuente de las rocas deformadas que dieron origen a los depósitos continentales.

La geología estructural está influenciada por la presencia de pliegues simétricos y asimétricos, principalmente, así como fallas inversas de bajo ángulo (cabalgadura con orientación NW). Los pliegues se observan en las rocas sedimentarias en la sierra de Atotonilco.

Las fallas normales, se presentan principalmente en las rocas volcánicas, dando lugar a discontinuidades, como la que se presentan al norte del acuífero, en la que los pliegues están rotos por la cabalgadura.

### **4.3 Geología del subsuelo**

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales que constituyen el lecho de los arroyos, así como en los depósitos de conglomerados. Este es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias terrígenas (areniscas y lutitas), que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad las rocas calizas representan un acuífero potencial que aún no ha sido explorado.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas areniscas y lutitas, al desaparecer el fracturamiento, y a mayor profundidad las lutitas que forman parte de la secuencia que constituye la Formación Mezcalera.

Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución Laramídica.

## **5 HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1 Tipo de acuífero**

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un **acuífero de tipo libre** en los sedimentos aluviales y conglomerados, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos de metros en el centro de los valles, principalmente los de origen tectónico.

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

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

### **5.2 Parámetros hidráulicos**

Como parte del estudio realizado en el año 2010 se ejecutó una sola prueba de bombeo de corta duración en una noria, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que el valor de la transmisividad en la etapa de abatimiento es de  $6.2 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s y en la etapa de recuperación es de  $1.11 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, por lo que el valor promedio es de  **$0.9 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s**, consistente con los obtenidos en acuíferos vecinos Buenos Aires y Revolución.

En cuanto a la conductividad hidráulica, su valor promedio es de  **$2.2 \times 10^{-4}$  m/s**.

La prueba de bombeo no contó con pozo de observación, por lo que no se pudo obtener el valor del coeficiente de almacenamiento.

### **5.3 Piezometría**

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

## 5.4 Comportamiento hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2010, mostrada en la figura 3, los valores varían desde algunos metros, a lo largo de cauce de los arroyos que descienden de las sierras que constituyen los límites orientales occidental del acuífero, hasta los 60 m, aumentando gradualmente hacia las estribaciones de las sierras, conforme se asciende topográficamente.

Las mayores profundidades se presentan en el extremo noroccidental del acuífero.

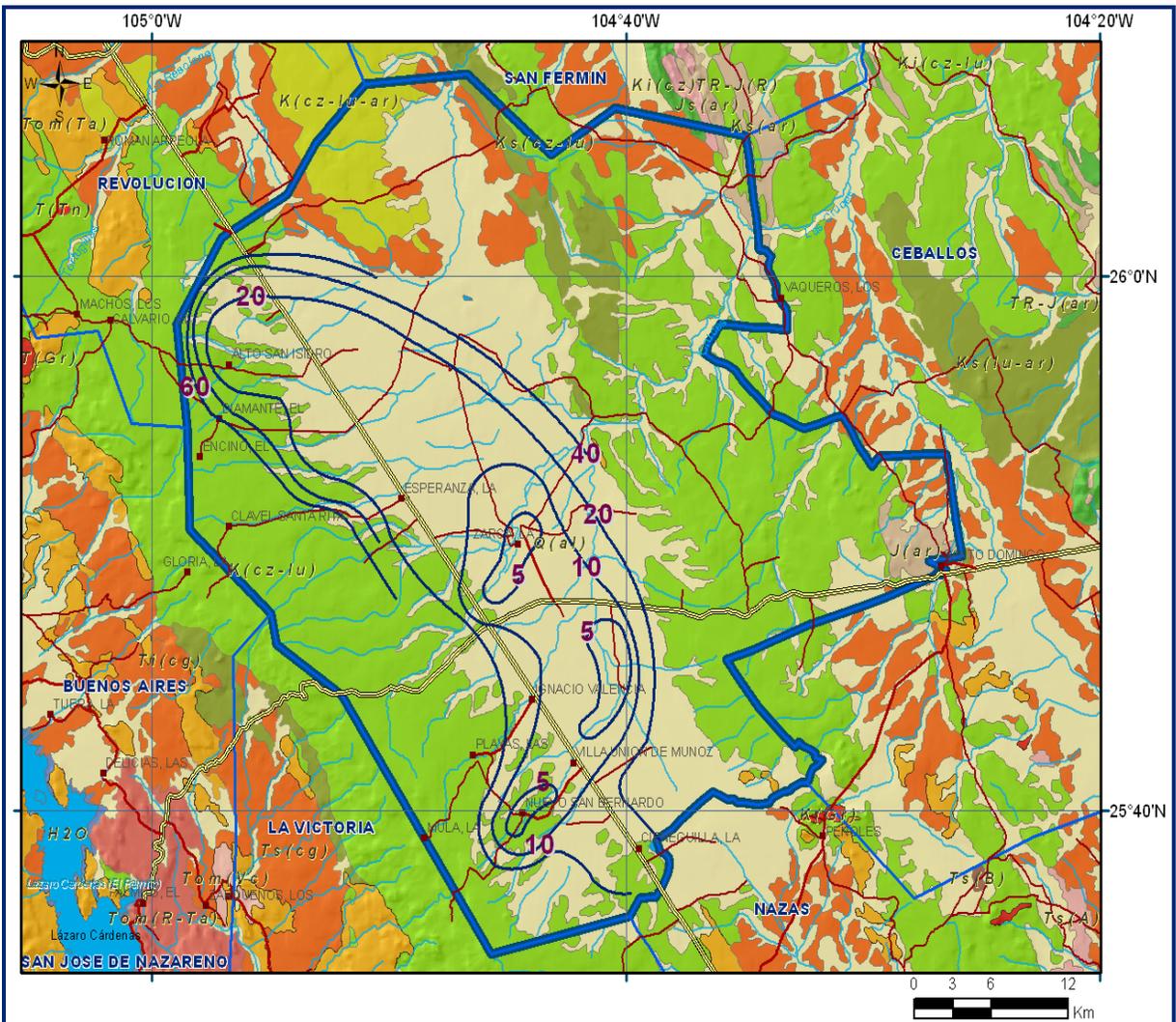


Figura 3. Profundidad al nivel estático en metros (2010)

#### **5.4.2 Elevación del nivel estático**

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 4, se observa que los valores varían de 2010 a 1800 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

Los valores más bajos se localizan al centro del valle, desde donde se incrementan por efecto de la topografía hacia los extremos oriental, occidental, norte y sur.

De esta manera, es posible identificar direcciones preferenciales del flujo subterráneo noroeste-sureste y sureste-noroeste, con alimentaciones procedentes de los extremos occidental y oriental del acuífero, para finalmente confluir en la porción central del acuífero.

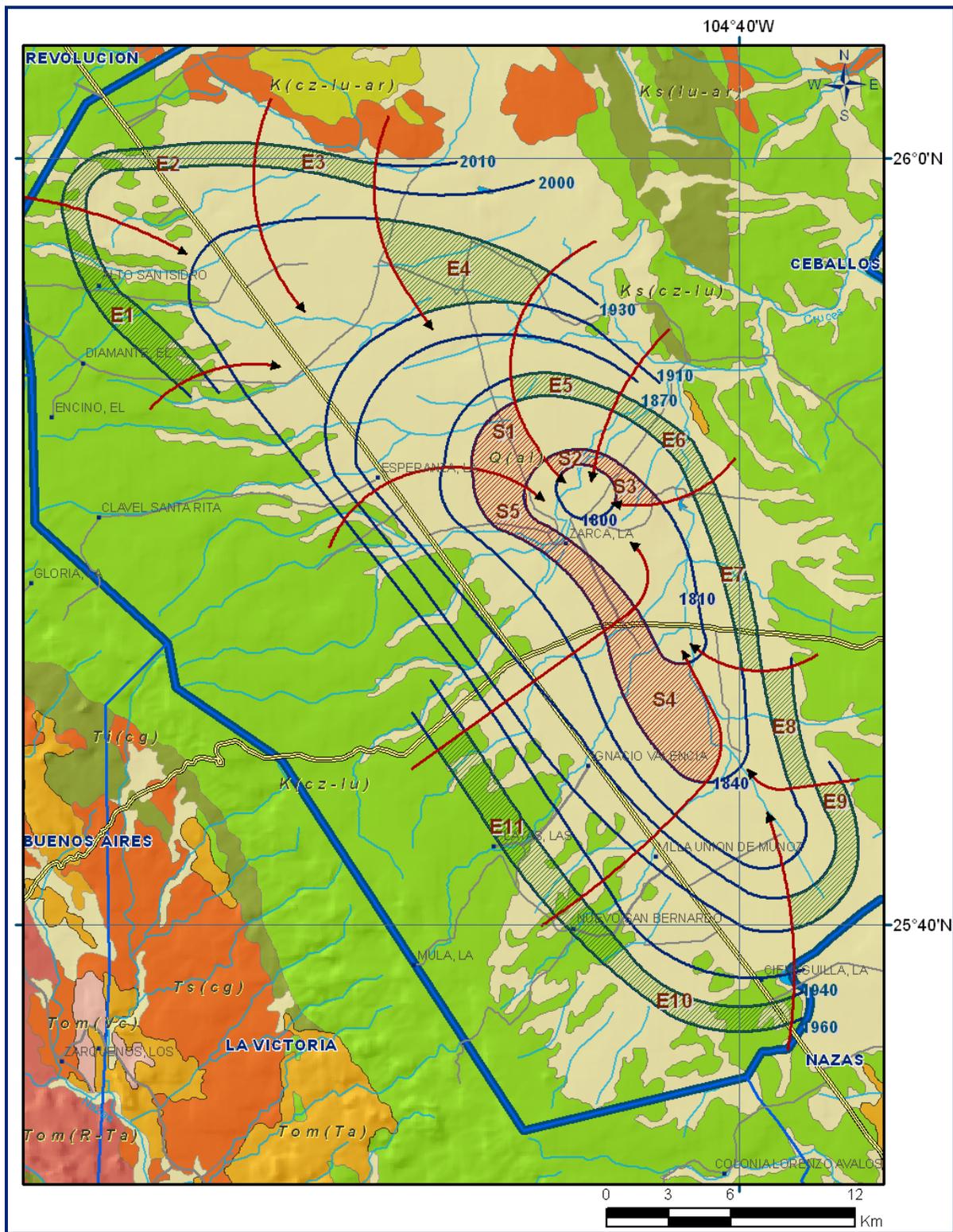


Figura 4. Elevación de nivel estático en msnm (2010)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

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

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 6 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (2 pozos y 4 norias), para su análisis fisicoquímico correspondiente (tabla 2).

Tabla 2. Aprovechamientos muestreados en el acuífero La Zarca-Revolución

APROVECHAMIENTO	X	Y	Lat.	Long.	CE ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	STD (ppm)	pH	T °C	ALK (ml de HCl)
CNA-1028-06	524662	2855070	25.813304	104.753513	640	320	7.3	19	5.8
CNA-1028-09	526636	2859917	25.857039	104.733722	710	350	7.2	20	6.3
CNA-1028-45	506277	2867813	25.928573	104.936866	660	330	7.1	21	6.8
CNA-1028-47	505423	2869256	25.941607	104.945388	680	340	6.7	21	6
CNA-1028-51	513445	2861750	25.873773	104.865349	540	270	7.4	20	5.8
CNA-1028-54	517293	2860389	25.861442	104.826958	1120	560	7.4	24	4.7

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

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de **320 a 560** ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1,000 ppm establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022.

Los valores más bajos se ubican en los aprovechamientos ubicados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en el extremo noroccidental del acuífero, mientras que los mayores se registran en la porción central, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media ( $C_2$ ) y contenido bajo de sodio intercambiable ( $S_1$ ), lo que indica que es apropiada para su uso en riego sin restricciones.

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

## **6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio lleva do a cabo en el 2010, se registró a existencia de 54 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 33 son pozos y los 21 restantes norias; todos ellos activos.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **0.9 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 0.5 hm<sup>3</sup> (55.6%) se destinan al uso agrícola, 0.3 más (33.3 %) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y los 0.1 hm<sup>3</sup> restantes (11.1 %) se utilizan para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

## **7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010 en una superficie de 780 km<sup>2</sup> que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos.

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

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

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

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

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

## **7.1 Entradas**

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida ( $R_i$ ). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida.

### **7.1.1 Recarga Vertical ( $R_v$ )**

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña. Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento ( $\Delta V_S$ ) tiende a ser nulo, y se cuenta con información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

- R<sub>v</sub>**: Recarga vertical
- E<sub>h</sub>**: Entradas subterráneas por flujo horizontal
- B**: Bombeo
- S<sub>h</sub>**: Salidas subterráneas por flujo horizontal
- ETR**: Evapotranspiración real
- ΔV(S)**: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + S_h + ETR \pm \Delta V(S) - E_h \quad (2)$$

### 7.1.2 Entradas subterráneas horizontales (E<sub>h</sub>)

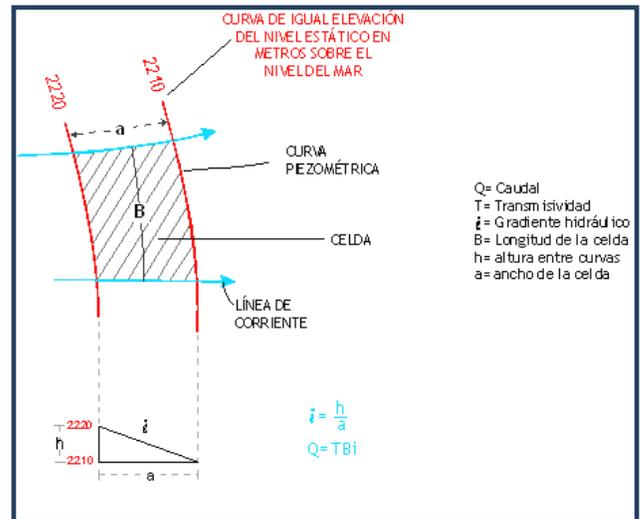
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemontes, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 4. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

Donde :

- B**: Largo del canal de flujo.
- i**: Gradiente hidráulico ( $i = h_2 - h_1 / a$ ); h y a son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.
- T**: Transmisividad en el canal de flujo (m<sup>2</sup>/día).



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de **29.4 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 3. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
			(m)		(m <sup>2</sup> /s)		
E1	11860	1355	10	0.0074	0.0003	0.0263	0.8
E2	9150	1020	10	0.0098	0.0005	0.0449	1.4
E3	7120	1020	10	0.0098	0.0015	0.1047	3.3
E4	8135	2030	20	0.0099	0.0008	0.0641	2.0
E5	5420	1355	10	0.0074	0.0005	0.0200	0.6
E6	5085	850	10	0.0118	0.0010	0.0598	1.9
E7	8815	1020	10	0.0098	0.0010	0.0864	2.7
E8	6780	1355	20	0.0148	0.0010	0.1001	3.2
E9	8475	1190	40	0.0336	0.0010	0.2849	9.0
E10	11860	1695	20	0.0118	0.0008	0.1120	3.5
E11	9490	2035	20	0.0098	0.0003	0.0280	0.9
<b>Total entradas</b>							<b>29.4</b>

Los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son valores promedio obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, obtenidas tanto en el acuífero La Zarca-Revolución como en los acuíferos vecinos Buenos Aires y Revolución, adaptadas al espesor saturado en cada zona y correlacionadas hidrogeológicamente debido a que tanto el origen como la evolución geológica son comunes en esta región del país.

## 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por salidas horizontales (Sh), a través de evaporación directa en las zonas de niveles freáticos someros (Ev) y por Bombeo (B). No existen manantiales, ni flujo base en ríos, ya que ambos son de régimen intermitente.

### 7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de la elevación del NE del año 2010, mostrada en la figura 4. Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación.

El valor total estimado de **22.2 hm<sup>3</sup> anuales** se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de Salidas subterráneas por flujo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
			(m)		(m <sup>2</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(hm <sup>3</sup> /año)
S1	3050	2200	10	0.0045	0.0015	0.0208	0.7
S2	2370	1360	10	0.0074	0.0015	0.0261	0.8
S3	3390	1190	10	0.0084	0.0020	0.0570	1.8
S4	6100	3390	30	0.0088	0.0030	0.1619	5.1
S5	11525	2370	30	0.0127	0.0030	0.4377	13.8
<b>Total entradas</b>							<b>22.2</b>

### 7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

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

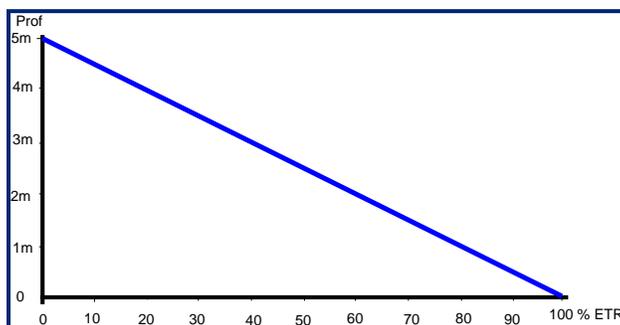
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	16.5		
P(mm) =	396.9	P <sup>2</sup> =	157529.61
L =	937.10625	L <sup>2</sup> =	878168.124
ETR (mm)	382.0		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



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

Tomando en cuenta una superficie de 50 km<sup>2</sup> en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 2.5 m y la lámina de evapotranspiración obtenida de 382.0 mm (con valores de 396.9 mm anuales para la precipitación y 16.5 °C de temperatura).

$$\text{ETR} = 50 \text{ km}^2 (0.382 \text{ m}) (0.5) = 9.6$$

Por lo tanto; **ETR = 9.6 hm<sup>3</sup>/año.**

### **7.2.3 Bombeo (B)**

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es del orden de los **0.9 hm<sup>3</sup> anuales.**

### **7.3 Cambio de Almacenamiento $\Delta V(S)$**

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir,  $\Delta V(S) = 0$ .

### **Solución a la ecuación de balance**

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

$$\begin{aligned} R_v &= Sh + B + ETR - \Delta V(S) - E_h \\ R_v &= 22.2 + 0.9 + 9.6 - 0.0 - 29.4 \\ R_v &= 3.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h \\ R &= 3.3 + 29.4 \\ R &= 32.7 \text{ hm}^3 \end{aligned}$$

## **8 DISPONIBILIDAD**

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

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

Donde:

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

### **8.1 Recarga total media anual (R)**

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto de manera natural como inducida. Para este caso particular, su valor es de **32.7 hm<sup>3</sup>/año**.

## **8.2 Descarga natural comprometida (DNC)**

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso del acuífero La Zarca-Revolución la descarga por flujo subterráneo ocurre dentro del acuífero, por lo que no se considera descarga natural comprometida. **Por lo tanto, DNC = 0.0.**

## **8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)**

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **6,364,303 m<sup>3</sup> 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:

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 32.7 - 0.0 - 6.364303 \\ \text{DMA} &= 26.335697 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **26,335,697 m<sup>3</sup> anuales.**

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación.

No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor, sin embargo, no es posible en

este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior.

## **9 BIBLIOGRAFÍA**

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