



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

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO PINO SUÁREZ (3233), ESTADO DE  
ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1 Localización del acuífero.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....</b>	<b>4</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>6</b>
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	8
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>8</b>
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural.....	14
4.3 Geología del subsuelo.....	15
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>16</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	16
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
5.3 Piezometría.....	17
5.4 Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	18
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	21
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>22</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>22</b>
7.1 Entradas.....	23
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.2 Salidas.....	25
7.2.1 Bombeo (B).....	25
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	25
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	25
7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ).....	27
<b>8. DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>28</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	29
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	29
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	29
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	30
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>31</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-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 del acuífero**

El acuífero Pino Suárez, definido con la clave 3233 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo suroriental del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de San Luis Potosí, entre los paralelos 21°52'45" y 22°19'27" de latitud norte y entre los meridianos 101°19'39" y 101°31'18" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 568 km<sup>2</sup>.

Limita al oeste con el acuífero Pinos, al norte con Espíritu Santo, ambos pertenecientes al estado de Zacatecas; al noreste con Ahualulco; al este y sur con Villa de Arriaga, del

estado de San Luis Potosí (figura 1). Geopolíticamente, su territorio se ubica totalmente dentro del municipio de Pinos.

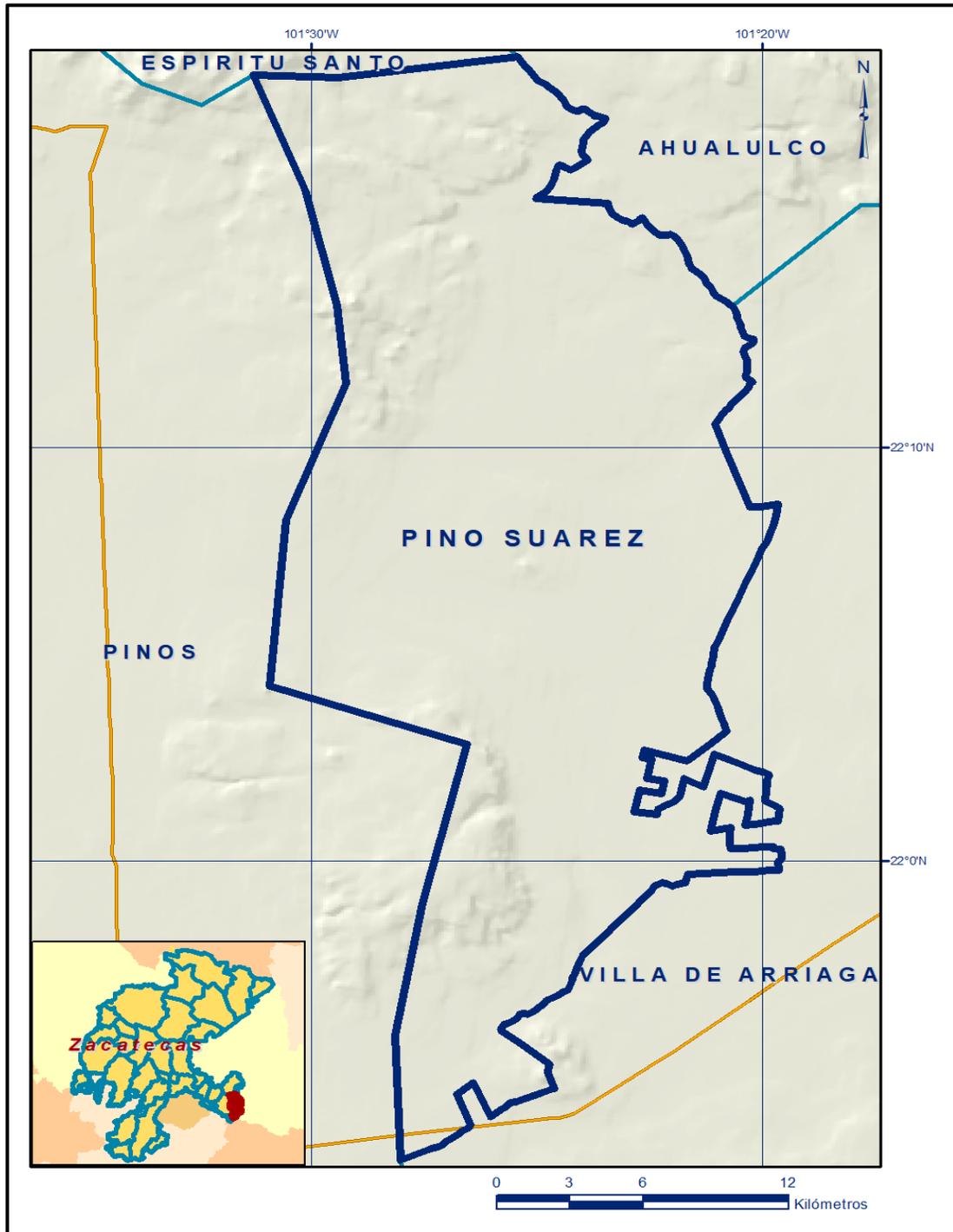


Figura 1. Localización del acuífero

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

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

**ACUIFERO 3233 PINO SUAREZ**

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	29	23.7	22	18	56.6	
2	101	25	25.3	22	19	26.6	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	101	20	38.7	22	13	25.0	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE ESTATAL
4	101	28	0.7	21	52	45.2	
5	101	28	8.4	21	55	46.8	
6	101	27	32.0	21	58	57.5	
7	101	26	32.3	22	2	48.9	
8	101	30	55.7	22	4	13.3	
9	101	30	33.3	22	8	14.2	
10	101	29	13.9	22	11	32.8	
11	101	29	25.5	22	13	26.3	
12	101	30	7.7	22	16	13.6	
13	101	31	17.6	22	19	0.3	
1	101	29	23.7	22	18	56.6	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Pino Suárez pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa u Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte”, al Consejo de Cuenca “Altiplano”, instalado el 23 de noviembre del 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Zacatecas. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en los Municipios de Noria de Ángeles, Pinos, etc., ubicados en el Estado de Zacatecas”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 9 de febrero de 1978. Esta veda es de tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En la superficie del acuífero no se localiza ningún distrito o unidad de riego, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de exploración y evaluación; a continuación, se citan los más importantes:

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PRELIMINAR DE LA CUENCA DE PINOS, MUNICIPIO DE PINOS, ZAC. Realizado por Acuífero S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1978.** El estudio comprendió una superficie total de 1,297 km<sup>2</sup>, fue elaborado con el fin de identificar zonas de interés geohidrológico para la explotación de los recursos hidráulicos del subsuelo, y determinar los parámetros

hidráulicos que rigen el funcionamiento del acuífero. Las actividades consistieron en la verificación geológica de campo (geología, contactos litológicos y estructuras existentes), inventario de obras subterráneas, toma de muestras de agua para su análisis fisicoquímico, realización de pruebas de bombeo, clasificación y calidad de las aguas subterráneas, así como la determinación de unidades hidrológicas. Los resultados del estudio concluyen la existencia de dos acuíferos, uno superior muy superficial y otro profundo. Con respecto a las recomendaciones se citan algunas áreas específicas del acuífero para la perforación de pozos. Los trabajos no contemplaron la realización del balance hidráulico subterráneo, únicamente se presenta un cálculo del volumen infiltrado al acuífero, este fue estimado en 49.7 hm<sup>3</sup>/año.

**SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA REGIÓN DE PINOS, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1981.** Este comprendió una superficie aproximada de 5,000 km<sup>2</sup>, incluyendo a los acuíferos Pinos, Espíritu Santo, Pino Suárez y Saldaña, todos ellos en el estado de Zacatecas. Los objetivos fueron identificar las estructuras y unidades geohidrológicas del subsuelo con posibilidades de almacenar agua subterránea y localizar las áreas favorables para la perforación de pozos exploratorios. Entre sus actividades de campo más importantes destacan el inventario de aprovechamientos de aguas subterráneas, muestreo de agua, interpretación fotogeológica e hidrogeológica, con verificación de campo, así como exploraciones geofísicas. Concluye la existencia de un acuífero principal, ubicado en los materiales clásticos del cuaternario, conformado por conglomerados poco cementados y rellenos aluviales. Recomienda áreas favorables para la perforación de pozos.

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

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DEL ACUÍFERO PINO SUÁREZ, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2019.** Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático y la hidrometría para cuantificar el volumen de extracción.

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

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincia fisiográfica**

De acuerdo con la clasificación de E. Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica totalmente dentro de la provincia fisiográfica Mesa Central. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en la provincia fisiográfica Mesa del Centro, en la subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes.

La Mesa Central es una gran cuenca rodeada por montañas más elevadas, más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras, tiene áreas poco elevadas, disectadas por las rocas volcánicas. Se trata de una planicie elevada que se localiza en la parte central de México, más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2,000 msnm y las elevaciones en su interior son moderadas, con desniveles inferiores a los 600 m. La subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes se caracteriza por sus extensas llanuras con pisos de caliche y una muy somera cubierta aluvial, que se encuentran a altitudes alrededor de los 2,000 m. Su expresión principal es la de llanura desértica de piso rocoso, seguida por los sistemas de topoformas lomerío con cañadas, sierra baja, sierra baja con mesetas y meseta.

En el área, el rasgo fisiográfico que predomina es un llano de piso rocoso, donde se acumularon depósitos aluviales, lacustres y tobas de granulometría variable, este llano se encuentra delimitado en su porción norte y oriental por mesetas extensas; presentándose también sierras altas con mesetas, bordeadas por lomeríos muy suaves y aislados con bajadas, formados por una alternancia de areniscas y lutitas. Las mesetas están constituidas por coladas de riolitas, ignimbritas y tobas arenosas.

#### **3.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en la totalidad de la superficie del

acuífero prevalece el clima semiseco templado BS<sub>1</sub>kw. El clima seco estepario (BS), corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (1), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), es una característica establecida considerando la temperatura media anual del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido. El régimen de lluvia (w), define el comportamiento de la lluvia durante el año, indica la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, en este caso es en verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término (w) indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que precipita en este periodo con respecto a la total anual), varía entre 5 y 10.2. Se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C, la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 4 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Pino Suárez, Ojuelos de Jalisco, Villa de Arriaga y Santiago. Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1947-2018 y el más corto 1984-2018, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **487.9 mm, 15.9 °C y 1,833.6 mm**, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia: uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que se registran de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. La temporada de total estiaje ocurre de marzo a mayo, la región presenta heladas en un rango de 20 a 40 días por año y granizadas de 0 a 4 días anuales, con presencia de condiciones de canícula.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero se localiza en la Región Hidrológica No. 37 El Salado, en la cuenca San Pablo y Otras, ocupa también una pequeña fracción de la cuenca Presa El Cuarenta. En el área no existen corrientes superficiales importantes, los arroyos son de régimen torrencial y solo llevan agua durante la época de lluvias, la mayoría de los arroyos que descienden de los lomeríos y sierras por lo general desaparecen en la llanura; en esta, se observan arroyos aislados de cauce divagante, destacando los arroyos La Chiquilla y El Salitre. Los escurrimientos superficiales son conducidos hacia las partes

topográficamente más bajas, por lo que el drenaje es hacia el centro de la cuenca. En época de lluvias se forman, en el llano, un gran número de lagunas, las de mayor importancia son: Larga, La Biznaga y Sartenejo, localizadas en la porción sureste del acuífero.

Existe poca infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua superficial, está representada por presas de reducida capacidad, pero de gran importancia para la zona, destacando las presas San Martín y Pino Suárez, que tienen una capacidad de almacenamiento de 1.1 y 1.2 hm<sup>3</sup>, respectivamente. Otras presas de menor capacidad son: La Palma, Santa Teresa, San Cristóbal y El Tule; que suman una capacidad de almacenamiento de 1.1 hm<sup>3</sup>.

### **3.4 Geomorfología**

El desarrollo del ciclo geomorfológico de la región, es el resultado de una serie de eventos tectónicos que modelaron el área, levantando primero el relieve al manifestarse los efectos de los diferentes eventos orogénicos; y posteriormente degradada bajo los efectos de los agentes erosivos, hasta llegar a conformar su aspecto actual, mismo que se caracteriza por un paisaje de cuencas cerradas, producto de la fragmentación en bloques del terreno después de la Orogenia Laramide, que posteriormente fueron rellenadas por material clástico en los diferentes intervalos comprendidos desde el Cenozoico al Reciente.

Estas cuencas fueron delimitadas por bloques positivos de elevación media a baja constituidos por derrames de lava y tobas de composición riolítica. Como ya se mencionó anteriormente, los lomeríos que se observan, están constituidos por areniscas y lutitas plegadas. Las mesetas de cimas planas y alargadas están constituidas por riolitas, tobas arenosas e ignimbritas. La unidad geomorfológica más sobresaliente es la Sierra de Pinos, la cual está alargada en dirección norte – sur, presenta una longitud aproximada de 50 km y un ancho medio de 15 km; esta sierra alcanza elevaciones máximas de 2,970 msnm, delimita al acuífero en su porción occidental. El llano presenta elevaciones medias del orden de 2,100 msnm. De acuerdo a lo anterior, se considera que zona corresponde a un llano circundado por lomeríos y mesetas de poca elevación, característico de un ciclo geomorfológico de madurez.

## **4. GEOLOGÍA**

A nivel regional, el marco geológico de la zona en la que se ubica el acuífero está representado por los eventos relacionados con el establecimiento de la Sierra Madre Occidental y la evolución del Terreno Guerrero, definido por Campa et al. (1983), que

presentan características litoestratigráficas diferentes. De esta manera, del Terreno Guerrero se presentan unidades metamorfizadas de edad Cretácico y unidades de origen volcánico del Cenozoico pertenecientes a la Sierra Madre Occidental. Completan la columna unidades de edad cuaternaria que consisten en basaltos y materiales aluviales. La estratigrafía de la Cuenca Mesozoica del Centro de México es la siguiente: la base de la columna presenta una secuencia de esquistos y filitas conocida como Formación Zacatecas; de edad Cárnico inferior de acuerdo a la fauna reportada.

Del Jurásico aflora una secuencia calcárea marina depositada en un ambiente nerítico de aguas tranquilas, perteneciente a la Formación Zuloaga, sobreyacida concordantemente por una secuencia calcárea depositada en un ambiente de escasa energía correspondiente a la Formación La Caja. Del Cretácico existen pequeños afloramientos de la Formación Taraises, constituida por una alternancia de caliza y lutita que descansan, de manera concordante y transicional, sobre La Formación Cupido constituida por una alternancia de calizas y lutitas. Descansando transicionalmente la Formación La Peña, de edad aptiana, consiste de calizas arcillosas y lutitas. Distribuida en la porción central de la región se observa la Formación Cuesta del Cura constituida por una secuencia de calizas y lutitas de edad Albiano-Cenomaniano, que subyace por relación concordante y transicional a la Formación Indidura la cual está constituida por una alternancia de caliza y lutita de edad Turoniano depositada en agua tranquila poco profunda; encima transicionalmente se tiene a lutitas y areniscas de la formación Caracol de edad del Coniaciano al Maestrichtiano (Carta Geológico-Minera San Luis Potosí F14-4. Escala 1:250,000. SGM, 1998).

Durante el Cenozoico en el occidente de México se presentó la influencia de un arco magmático generado por la tectónica convergente, dando lugar a la emisión de rocas volcánicas que conforman la Sierra Madre Occidental. Mc Dowell et al. (1979) establece que la sierra está constituida por dos secuencias ígneas: Una inferior que consta principalmente de rocas ígneas intermedias con edades que varían de 45 a 95 Ma (Paleoceno) y que corresponden con derrames, flujos piroclásticos y algunas intercalaciones de flujos ignimbríticos. La secuencia superior y más reciente está integrada por una potente cubierta de ignimbritas que de acuerdo con Demant et al. (1975) puede alcanzar 1,000 m de espesor, cuya edad se considera entre 27 y 34 Ma (Oligoceno). En el Cenozoico también se deposita discordantemente un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos de calizas y rocas volcánicas, con espesor de 130 m.

Sobreyaciendo a los conglomerados, se depositaron derrames de composición andesítica del Eoceno, sobreyacidos por una secuencia de rocas volcánicas del Oligoceno, constituida por brecha volcánica andesítica, derrames riolíticos, riolodacíticos, andesíticos, dacíticos, latíticos, tobas riolíticas, e ignimbritas que han sido fechadas por el método radiométrico K/Ar entre  $30.6 \pm 5$  y  $29.0 \pm 1.5$  m.a. Del Neógeno se tiene un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos subredondeados de areniscas y rocas volcánicas de composición riolítica, areniscas y limos semiconsolidados. Al Cuaternario corresponden gravas y boleos no consolidados, basaltos con xenolitos de granulita y tobas basálticas. Cubriendo a todas las formaciones, en zonas muy extensas se depositaron aluviones con diversas granulometrías, producto erosivo de las rocas preexistentes (figura 2).

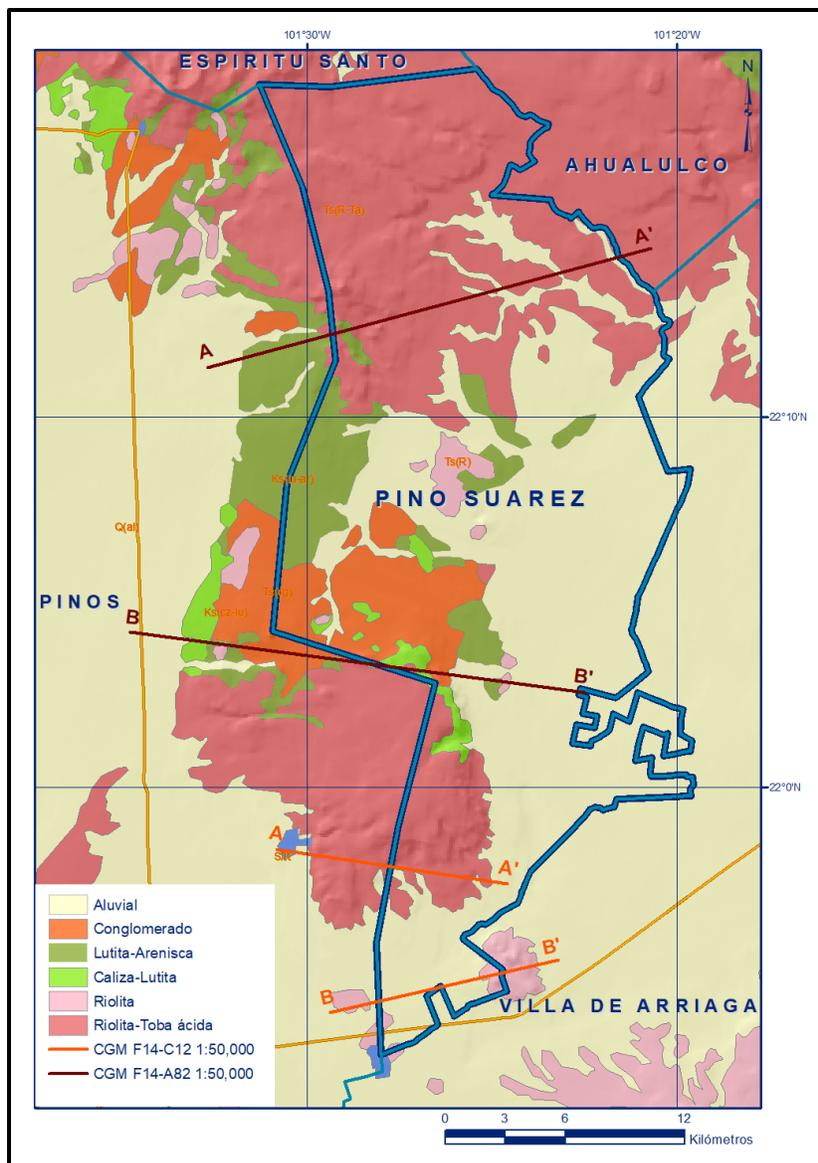


Figura 2. Geología general del acuífero

#### **4.1 Estratigrafía**

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias marinas y continentales, rocas volcánicas, así como depósitos aluviales, cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico Inferior al Reciente. A continuación, se presenta la descripción de cada una de ellas.

### **CUENCA MESOZOICA DEL CENTRO DE MÉXICO**

#### **CRETÁCICO**

##### **Formación Cuesta del Cura**

Secuencia de calizas compactas, de estratificación delgada y ondulada, con nódulos y bandas de pedernal e intercalaciones delgadas de arcilla. La unidad consiste de calizas tipo "mudstone", dispuestas en capas que varían de 10 a 25 cm de potencia. La relación con la Formación La Peña es por medio de contacto nítido, mientras que el contacto superior con los sedimentos calcáreos-arcillosos de la Formación Indidura es concordante. El depósito de esta unidad se llevó a cabo en una zona de mar abierto, en un ambiente de cuenca poco profunda. Sus afloramientos no están bien expuestos, se considera que esta formación constituye las barreras laterales y basamento del acuífero. No se pudo medir su sección estratigráfica, pero se estima que puede alcanzar en la zona más de 200 m de espesor. Su edad fue establecida por correlación y por su relación con las rocas que le sobreyacen ya que no se encontraron horizontes fosilíferos para su datación. Se le asigna una edad que abarca desde el Albiano Medio hasta el Cenomaniano Temprano. Se determinó que el depósito de estos sedimentos se llevó a cabo en aguas de profundidad media en la zona infranerítica.

##### **Formación Indidura**

Se encuentra constituida en general por una secuencia calcárea arcillosa, conformada por calizas arcillosas, en capas que van de 5 a 40 cm de potencia, con intercalaciones de calizas y lutitas calcáreas laminares. La parte superior está formada de una lutita gris muy homogénea, fácilmente erosionable, que, en la parte más alta, casi en contacto con la Formación Caracol, presenta un cambio de facies a una lutita arenosa. No se pudo determinar su espesor, pero se estima que puede superar los 200 m. No se encontraron fósiles que sirvieran para datarla, por lo que su edad se establece por su relación con las rocas que la limitan. De esta manera se le asigna un alcance del Cenomaniano al Turoniano. Aflora ampliamente en las cercanías de la localidad La Estrella. Sobreyace de manera concordante a la Formación Cuesta del Cura y subyace de igual manera la Formación Caracol. El depósito de esta unidad ocurrió en un medio ambiente de mar abierto, con una aportación intermitente de clásticos pelíticos, bajo condiciones tectónicas inestables de relleno de cuenca.

## **Formación Caracol**

Esta unidad está compuesta de areniscas de grano medio, con cementante calcáreo y matriz arcillosa, en capas de 20 cm de espesor, que muestran estratificación cruzada y turboglifos; intercaladas con limolitas y lutitas y ocasionalmente con margas. Las lutitas son moderadamente calcáreas y suaves, de color oscuro, localmente con ligero contenido de arena, mientras que la arenisca está bien consolidada y es resistente; está dispuesta en capas delgadas y gruesas que tienen colores gris pardo y verdoso. Se estima que su espesor puede alcanzar los 1,000 m de potencia; en el área, el contacto inferior con la Formación Indidura es transicional y concordante; mientras que el superior está cubierto de manera discordante por materiales más recientes. Los afloramientos de esta formación se encuentran ampliamente distribuidos en la porción norte y al occidente de la localidad Pino Suárez. En el llano se encuentra parcialmente cubierta y en las sierras se presenta en las partes bajas, su topografía es redondeada y de poca altitud. La edad de esta unidad se ha establecido por su relación con las rocas adyacentes, ya que no contiene fósiles para su datación. Así se le asigna un alcance Coniaciano-Santoniano, perteneciente al Cretácico Superior.

## **TERRENO SIERRA MADRE**

### **CENOZOICO**

#### **Volcánico Continental**

El paquete de rocas volcánicas que fueron eyectadas durante el Cenozoico está conformado por una gran diversidad de composiciones, predominando las rocas riolíticas asociadas al Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental, y únicamente hacia la base de la secuencia se presentan delgados horizontes andesíticos. Las tobas riolíticas afloran aproximadamente en el 40% de la superficie del acuífero. En la porción sur de la llanura se encuentran a poca profundidad, cubiertas por conglomerados y aluviones e intercaladas con ignimbritas. Las rocas tobáceas se presentan en gruesas capas, formando mesetas escalonadas que alcanzan elevaciones hasta de 2,700 msnm. En la porción nororiental del acuífero esta unidad descansa sobre las rocas del Cretácico Superior.

El Oligoceno está representado por una intensa actividad volcánica relacionada a los campos volcánicos de Pinos y San Luis Potosí, la base corresponde a una toba de grano fino que varía de color de blanquecino a gris crema, con tonalidades amarillentas o rojizas e inclusive verdosas, a la que Aguillón R. A. (1983), nombró informalmente como Toba Pinos; afloramientos bien expuestos se pueden apreciar en la parte norte del acuífero. Sobreyaciendo, discordantemente, a la Toba Pinos, se presentan potentes espesores de riolita, emitida en forma de domos exógenos, presenta estructura fluidal

bien definida y frecuente desarrollo de pliegues de flujo. Su espesor máximo es de 450 m y es correlacionable con la Riolita San Miguelito del Campo Volcánico San Luis Potosí, que ha sido datada por el método K/Ar, en una edad de  $30 \pm 1.5$  Ma (Labarthe H. G. et al., 1982).

Un cuerpo porfídico de composición riolítica afecta a los derrames riolíticos y aflora al noroeste del poblado San Martín. Otro evento oligocénico está representado por depósitos de ignimbrita-toba riolítica, que en su base presentan una brecha volcánica explosiva. Esta secuencia exhibe diferentes grados de soldamiento y frecuentemente está pseudo estratificada, su espesor máximo es de 300 m. En la porción norte aflora un conjunto de flujos de ceniza sin soldar, de color gris claro que varía a crema y blanquecino, que subyacen a depósitos de ignimbrita, con abundantes estructuras de "fiamme", alto grado de piroconsolidación y comúnmente con estructura eutaxítica. En su porción superior presenta numerosas esferulitas. Aflora en el cerro Los Corredores, ubicado en la porción noroeste y sobreyace a un pequeño depósito de toba dacítica, que se extiende a la loma Las Pedreras.

El último evento volcánico registrado en la zona está representado por depósitos de ceniza de caída libre, de color gris claro a blanquecino, intercalados con niveles de arenisca débilmente consolidada, distribuidos informalmente en varias porciones del área.

### **Arenisca – Limolita del Plioceno**

Durante el Cenozoico se desarrollaron también depósitos lacustres compuestos por arenas y limos que afloran en la porción sureste de la zona, en la depresión conocida como Laguna Sartenejo.

## **CUATERNARIO**

### **Conglomerado Polimíctico**

Conglomerado formado por fragmentos angulosos a subredondeados de calizas y areniscas, comúnmente sin estratificación, ocasionalmente deleznable y mal clasificado, empacados en matriz areno-arcillosa y en algunas veces tobácea, dispuestos en capas y de coloración café claro. Ocasionalmente presenta intercalaciones de estratos de arena y arcilla. Aflora en las cercanías de la comunidad La Chiquilla y norte de San Martín, su espesor no sobrepasa los 20 m. Descansa discordantemente sobre rocas sedimentarias marinas y rocas volcánicas. De acuerdo a su posición estratigráfica, se le asigna la edad del Pleistoceno. A esta misma edad corresponden los depósitos lacustres que afloran en la Laguna Sartenejo.

## **Aluvión**

Unidad detrítica no consolidada de origen aluvial y fluvial, constituida por depósitos recientes formados por sedimentos de formas subredondeadas a redondeadas que son producto de erosión de las rocas existentes y que rellenan el llano y márgenes de arroyos; así como como por los depósitos residuales y de piedemonte. Litológicamente, los depósitos incluyen arenas de granulometría fina a gruesa, limos, arcillas, gravas y conglomerados mal cementados, bien a mal clasificados. Afloran ampliamente en toda la porción central del llano. Su espesor es reducido, varía de 5 a 10 m, y su edad corresponde al Holoceno.

## **4.2 Geología estructural**

Estructuralmente la región se caracteriza por presentar tres estilos de deformación bien definidos, el primero asociado a una zona de cizalla dúctil que se encuentra en el contacto entre el Terreno Guerrero y la Cuenca Mesozoica del Centro de México (Terreno Sierra Madre), el segundo presente en la parte central de la carta corresponde a plegamientos y cabalgaduras de escala decamétrica con convergencia al oriente, cuyos ejes presentan una orientación general noroeste-sureste y noreste-suroeste, el tercero se asocia a la Plataforma Valles-San Luis Potosí el cual es un sistema de pliegues y cabalgaduras con mecanismos de plegamiento tipo "bending", producto de la Orogenia Laramide. Durante el Cenozoico principalmente en el Oligoceno-Eoceno se llevó a cabo el emplazamiento de cuerpos ígneos (stocks), originados por una fase distensiva con componente lateral izquierda que ocasionó fallas y grabens con orientación NW-SE. Al occidental del área, grandes yacimientos como son el de Real de Ángeles y El Salvador se asocian a la superposición de las estructuras de la zona de cizalla del límite del Terreno de Guerrero y las estructuras de la fase transtensiva de posible edad oligocena. Por último se superpone una fase distensiva de posible edad pliocuaternaria a la que se asocian derrames de basaltos alcalinos (Carta Geológico-Minera San Luis Potosí F14-4, escala 1:250,000. SGM 1998).

La zona de estudio se encuentra afectada por dos fenómenos estructurales que la controlan y limitan: los plegamientos que perturbaron a las rocas sedimentarias de la región y las fallas y fracturas que se encuentran afectando a las rocas cenozoicas y mesozoicas. En la sierra de Pinos, ubicada al norponiente del acuífero, se observa a las rocas sedimentarias afectadas por plegamientos originados por los esfuerzos generados por la Orogenia Laramide. Los ejes de estas estructuras siguen un rumbo general N 25° E y buzan hacia el SW, se observan anticlinales y sinclinales de tipo simétrico, cuyos flancos presentan un ángulo menor de 45°. La formación más perturbada es la Caracol debido a su estratificación delgada y a la presencia de lutitas,

adquiriendo una gran competencia al ser sometida a esfuerzos, evidenciado por la presencia de clivaje. Los esfuerzos que dieron origen a estos plegamientos fueron compresivos y debieron actuar con una dirección NW-SE. Estos eventos estuvieron acompañados por fallas y fracturas que liberaron parte de la energía generada por los esfuerzos compresivos. Una vez que estos dejaron de actuar, tuvo lugar una tectónica distensiva en la cual las rocas sufren un reacomodo en bloques. Un sistema de fallas E-W que limitan la presencia de los derrames riolíticos, se observa a la altura de las comunidades La Jaulilla, San José de Bernalejo y La Estrella. Se considera que la cuenca en la que se depositó el material cuaternario que constituye los acuíferos Pino Suarez del estado de Zacatecas y Villa de Arriaga de San Luis Potosí, se encuentra limitada al oriente y poniente por fallamiento de tipo normal.

Las estructuras más notables que se manifiestan, se atribuyen a un régimen extensivo de esfuerzos que generó fallamiento tipo normal y en menor proporción de tipo lateral. En general se interpretaron tres fases de deformación, asociadas a las siguientes evidencias: La primera representada por un sistema de fallas orientadas en dirección N 10° E, al que pertenecen las fallas Castellanos y El Mezquite, las cuales conforman un par de estructuras con buzamiento divergente que definen un bloque levantado. La segunda, ubicada en la porción central, consiste de un sistema de fallas laterales con orientación general E-W entre las que destacan las fallas Los Ratones, La noria y San José. La última, está representada por fallamientos y lineamientos en dirección general N 42° W, a la que corresponden las fallas La Encina y Gavilanes, ubicadas en la porción central. La deformación dúctil-frágil se atribuye a esfuerzos compresivos generados durante la orogenia Laramide, y se manifiesta en las secuencias sedimentarias cretácicas por la presencia de plegamientos y cabalgaduras convergencias al E-NE, entre los primeros se pueden mencionar los sinclinales Clavellina, Los Ángeles y Cerrito Blanco (Carta Geológico-Minera El Obraje F14-A82, escala 1:50,000. SGM, 2007).

### **4.3 Geología del subsuelo**

De acuerdo con la información geofísica obtenida en estudios previos, los cortes litológicos de pozos, las evidencias de campo y la correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares de origen aluvial y fluvial de granulometría variada y los conglomerados polimícticos que rellenan el llano o valle tectónico. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica, entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, y rocas sedimentarias (calizas, lutitas y areniscas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A



que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas con lutitas y limolitas.

En el llano se pueden distinguir tres medios diferentes en los que circula el agua subterránea: El medio poroso con permeabilidad primaria y secundaria e intergranular y de fracturas, el medio fracturado con permeabilidad secundaria y el medio de doble porosidad con permeabilidad combinada, intergranular y de fracturas.

## **5.2 Parámetros hidráulicos**

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas que constituyen el acuífero, se analizó la información de 1 prueba de bombeo de corta duración, en su etapa de recuperación, realizada en el estudio del año 2007 y por correlación hidrogeológica se adoptaron los valores de 4 pruebas de corta duración, en etapas de abatimiento y recuperación, realizadas en estudios previos en el acuífero vecino Pinos, que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad obtenidos varían de  **$0.11 \times 10^{-3}$  a  $3.17 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ; si consideramos un espesor saturado promedio de 100 m, los valores de conductividad hidráulica varían de  **$1.1 \times 10^{-6}$  a  $3.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  (0.10 a 2.74 m/d).**

Adicionalmente, se cuenta con información de 22 afloros realizados también en el acuífero Pinos, mediante los cuales se obtuvo el caudal específico ( $Q_e$ ), como una estimación aproximada de la transmisividad (T), según la relación siguiente:  $Q_e$  (lps/m)  $\approx T$  ( $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Los valores obtenidos varían de **0.01 a 2.5 lps/m**. Para el caso del rendimiento específico, de acuerdo al tipo y características de los materiales que constituyen el subsuelo de la región, se adoptó un valor de **0.05**.

## **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada por la Dirección Local Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2011-2018, que es el que tiene mayor y mejor cobertura espacial.

## 5.4 Comportamiento hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2018 muestra que los valores varían, de manera general, de 2 a 60 m, los cuales se incrementan, de manera general, por efecto de la topografía desde la parte baja de los arroyos conforme se asciende topográficamente a lo largo de ellos. Las profundidades más someras se registran en los aprovechamientos localizados en las zonas cercanas a los subálveos de los arroyos, localizadas hacia las poblaciones La Estrella, Encinitos, Cieneguilla y San Martín (figura 4). La mayor profundidad se observó en el pozo para agua potable de la comunidad La Chiquilla, localizado al sur de San Martín.

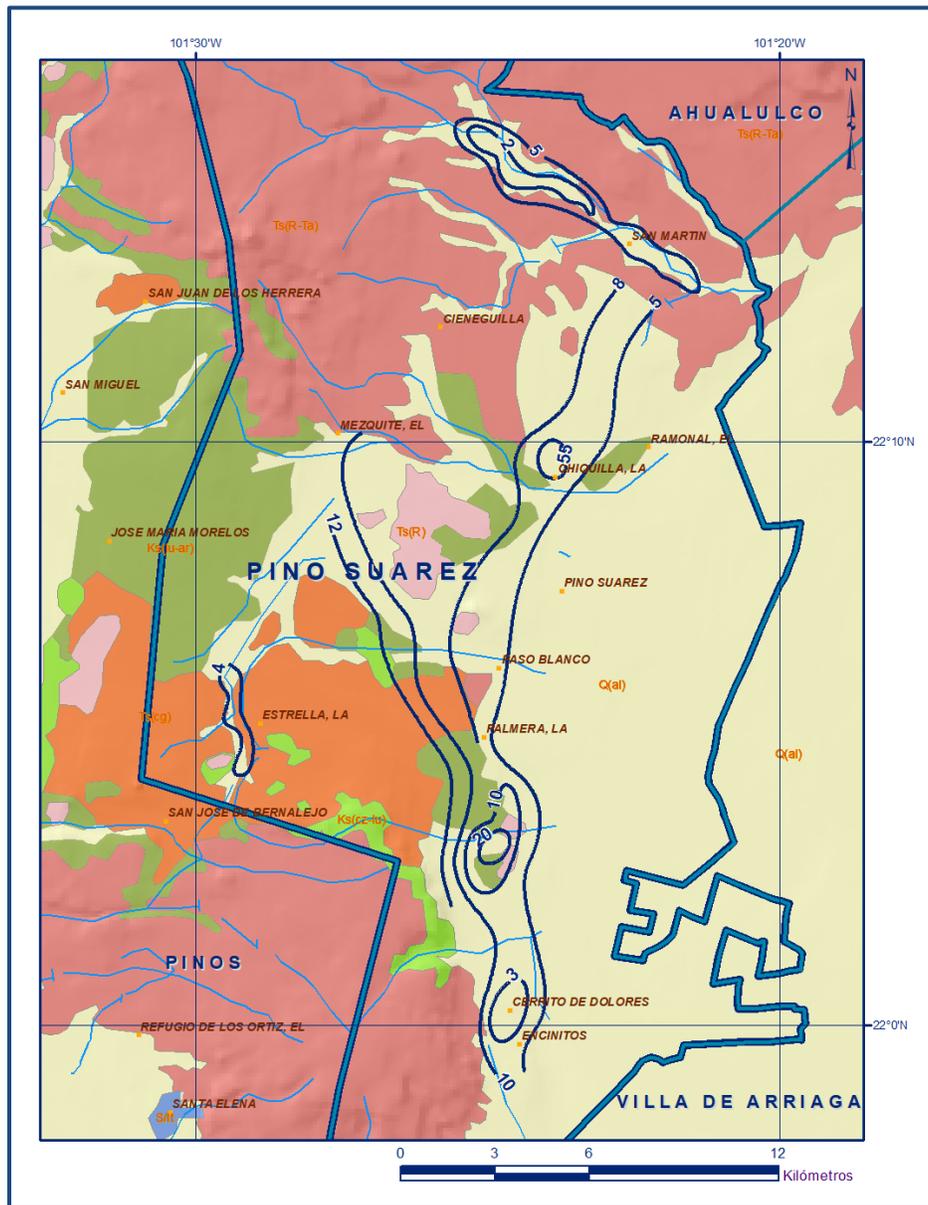


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2018)



### 5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2011-2018 registra valores de abatimiento poco significativos, con valores puntuales 0.5 m, que representan 0.07 m anuales, en la zona sur del acuífero, localizada al norte de Encinitos. En la zona localizada al norte de Cieneguilla y al sur de Pino Suárez se presentaron recuperaciones del nivel estático de 0.5 m, con valores locales de 2.0 m, que representa 0.07 a 0.3 m anuales para el periodo analizado. En la mayor parte de la zona de explotación, no se registraron cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

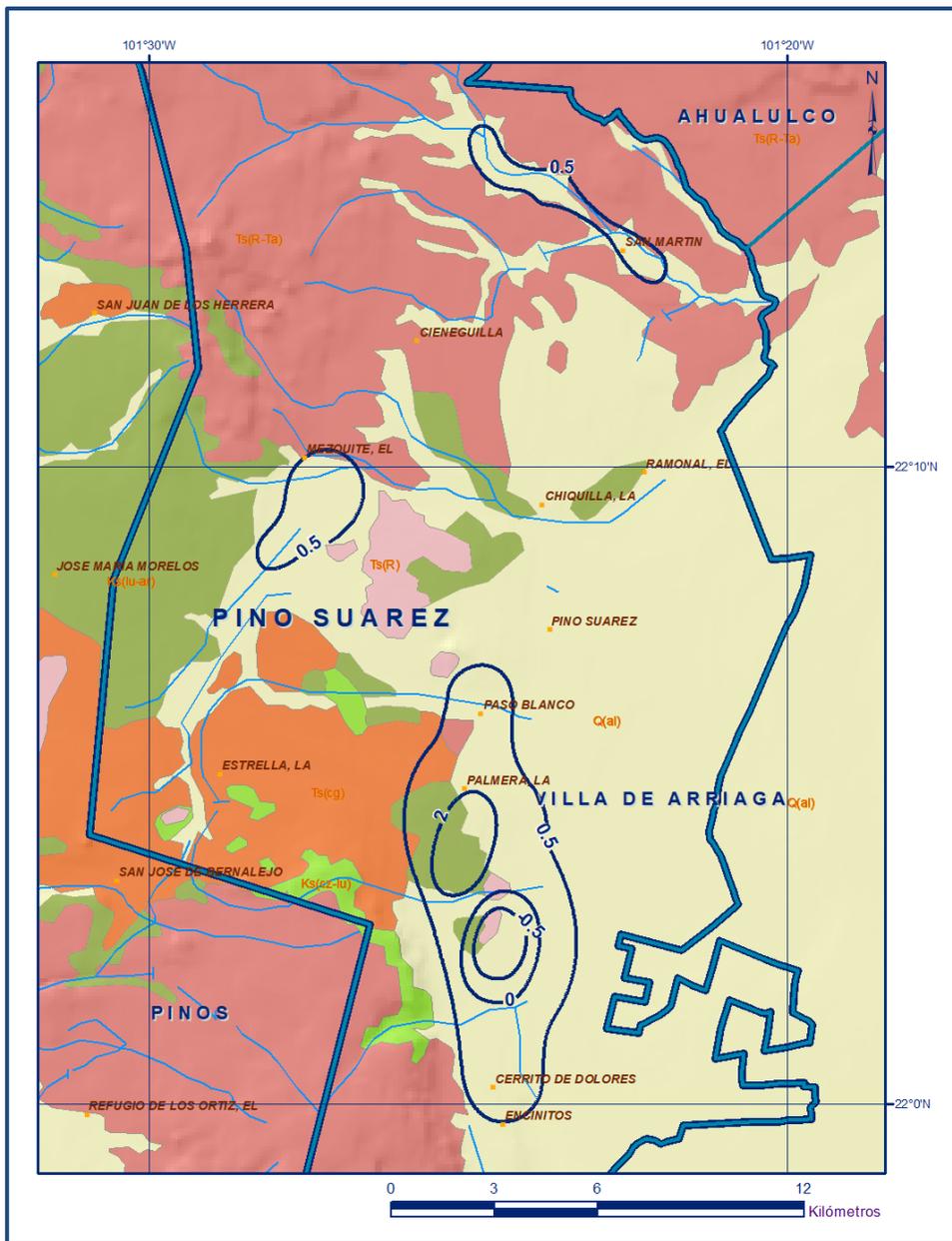


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2011-2018)

## **5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se tomaron muestras de agua en 25 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, así como iones principales.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos disueltos totales (SDT) varían de 163 a 727 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la “Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica son inferiores a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y presentan valores extremos de 118 a 771  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores más altos de SDT y conductividad eléctrica se registran en la porción central del acuífero.

Las temperaturas registradas varían de 18.0 a 31.9 °C en tanto que el pH medido fluctúa entre 5.9 a 7.5; respecto a estos valores de pH dos pozos ubicados en la porción sur del acuífero están por debajo del límite mínimo permisible de la norma. Estos valores bajos de pH indican que el agua es de reciente infiltración, mostrando zonas de recarga por donde circula el agua pluvial. De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que el tipo o familia de agua que predomina es la bicarbonatada-sódica, y en menor proporción la familia bicarbonatada cálcica; ambas representan agua de reciente infiltración, la primera asociada a rocas volcánicas y la segunda a rocas calizas, que constituyen las zonas de recarga ubicadas en las sierras que delimitan el acuífero.

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 de agua se clasifican como  $\text{C}_2\text{S}_1$  (18 muestras) que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, 6 muestras se clasificaron como como  $\text{C}_1\text{S}_1$ , es decir, agua de baja salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable. Ambas se consideran aptas para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos. Solo una muestra presentó salinidad alta y bajo contenido de sodio intercambiable  $\text{C}_3\text{S}_1$ .

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

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2007 y complementada con datos actuales del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA, 2018), se tienen registradas un total de 50 obras que aprovechan el agua subterránea, 17 son pozos y 33 norias; existen además 4 manantiales; la totalidad de las obras están activas. De las obras, 25 se destinan al uso agrícola, 13 son para uso público-urbano, 9 tienen un uso múltiple, 2 son pecuario y 1 para uso doméstico. De los 4 manantiales identificados, 3 son para uso público-urbano y 1 para uso agrícola,

El volumen de extracción calcula es de **1.6 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 0.9 hm<sup>3</sup> (56.25%) se destinan al uso agrícola, 0.5 hm<sup>3</sup> (31.25 %) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y el restante 0.2 hm<sup>3</sup> (12.5 %) se dedica al suministro de los usos múltiple, pecuario y doméstico.

A través de los **4 manantiales** se descarga un caudal conjunto estimado de 0.6 lps, que equivalen a un volumen de 0.02 hm<sup>3</sup> anuales, destinados al uso público urbano principalmente, que para fines del balance de aguas subterráneas se considera despreciable.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2011-2018, en una superficie de **232 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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

## 7.1 Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que los volúmenes utilizados para uso público-urbano y agrícola son incipientes, se considera para fines del balance de agua subterránea que no existe recarga incidental

### 7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V(S)$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

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

Donde:

**Rv=** Recarga vertical

**Eh=** Entradas por flujo subterráneo horizontal

**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:

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

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre la llanura y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2018 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

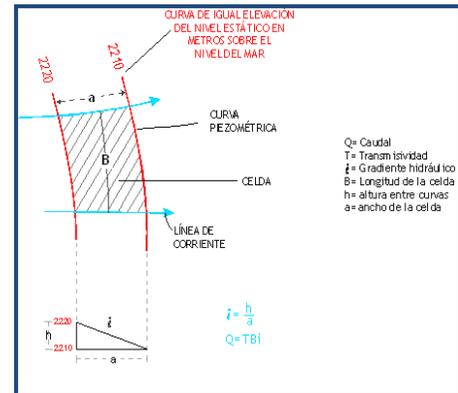
Donde:

**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, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **7.0 hm<sup>3</sup> anuales**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2018)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	1350	1000	10	0.0100	0.0015	0.0203	0.6
E2	2600	1450	40	0.0276	0.0005	0.0359	1.1
E3	4900	900	20	0.0222	0.0008	0.0871	2.7
E4	3550	900	10	0.0111	0.0008	0.0316	1.0
E5	5000	800	10	0.0125	0.0005	0.0313	1.0
E6	4000	670	10	0.0149	0.0008	0.0478	1.5
E7	2900	1050	10	0.0095	0.0008	0.0221	0.7
E8	650	1700	5	0.0029	0.002	0.0038	0.1
<b>TOTAL</b>						<b>7.0</b>	

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas, fueron obtenidos de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, es este acuífero y otros vecinos a él, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, adaptados al espesor saturado de las distintas zonas.

## 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B); en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh) y por evapotranspiración (ETR) en la zona de niveles freáticos someros.

### 7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **1.6 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2018, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **5.4 hm<sup>3</sup> anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2018)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	800	1400	10	0.0071	0.002	0.0114	0.4
S2	2100	2300	10	0.0043	0.0015	0.0137	0.4
S3	1700	1650	10	0.0061	0.001	0.0103	0.3
S4	3350	1150	10	0.0087	0.001	0.0291	0.9
S5	4100	1100	10	0.0091	0.001	0.0373	1.2
S6	3300	1500	10	0.0067	0.001	0.0220	0.7
S7	3600	2000	10	0.0050	0.001	0.0180	0.6
S8	5000	850	10	0.0118	0.0005	0.0294	0.9
<b>TOTAL</b>							<b>5.4</b>

### 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).

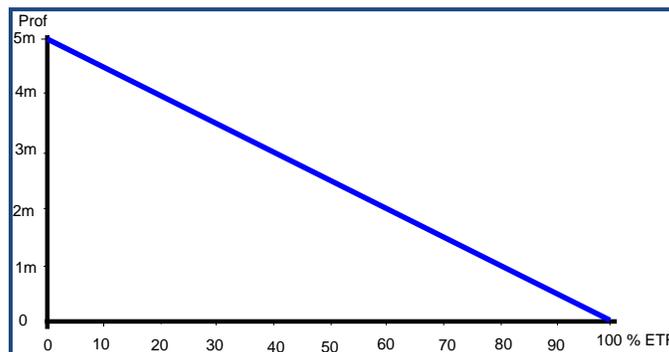
Existe una zona del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 5 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 15.9 °C y precipitación = 487.9 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de **446.3 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) =	15.9		
P(mm) =	487.9	P <sup>2</sup> =	238046.41
L =	898.48395	L <sup>2</sup> =	807273.408
ETR (mm)=	446.3		

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.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó 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, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 1.8 hm<sup>3</sup> anuales**.

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración real

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm <sup>3</sup> /año)
2	2.0	2.2	0.4463	0.6	0.6
3	3.0	1.6	0.4463	0.4	0.3
4	4.0	1.5	0.4463	0.2	0.1
2 a 5	3.5	6.2	0.4463	0.3	0.8
	<b>TOTAL</b>	<b>11.5</b>		<b>TOTAL</b>	<b>1.8</b>

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2011-2018 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y$  de 0.05, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- $\Delta V(S)$** = Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S**= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A**= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>)
- h**= Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El cambio en el volumen de agua almacenado para el intervalo 2011–2018 fue de 1.0 hm<sup>3</sup>, es decir **0.1 hm<sup>3</sup> anuales** (tabla 5).

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2011-2018)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Sy	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
-0.5	-0.5	2.2	0.05	-0.1
0 a -0.5	-0.25	3.1	0.05	0.0
0.5	0.5	10.6	0.05	0.3
0 a 0.5	0.25	28.7	0.05	0.4
2	2.0	3.9	0.05	0.4
	<b>TOTAL</b>	<b>48.5</b>	<b>TOTAL</b>	<b>1.0</b>
	<b>Promedio anual</b>			<b>0.1</b>

### Solución de la ecuación de balance

De esta manera el único parámetro, de los que intervienen en la ecuación de balance que queda por determinar es la infiltración por lluvia ( $R_v$ ), por lo que, despejando este término en la ecuación de balance, se tiene:

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

$$R_v = 1.6 + 5.4 + 1.8 + 0.1 - 7.0$$

$$R_v = 1.9$$

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

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 1.9 + 7.0$$

$$R = 8.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

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 retorno de riego. Para este caso su valor es **8.9 hm<sup>3</sup> anuales**, de recarga natural.

### 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso de este acuífero la descarga natural comprometida es 2.7 hm<sup>3</sup> anuales, que corresponden al 50% de las salidas subterráneas hacia el acuífero Villa de Arriaga del estado de San Luis Potosí. El 50% restante se podrá aprovechar en el acuífero Pino Suárez; de esta manera se podrán desarrollar ambas zonas limítrofes de esta región árida y pobre, en la que la recarga se genera en el acuífero del estado de Zacatecas y se dirige hacia el estado de San Luis Potosí. Por lo tanto, **DNC = 2.7 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

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

volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **1'869,420 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

#### **8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)**

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea que 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 8.9 - 2.7 - 1.869420 \\ \text{DMA} &= 4.330580 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **4'330,580 m<sup>3</sup>** para otorgar nuevas concesiones.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 2007. Reactivación de redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua en los acuíferos Villa García, El Salvador, Guadalupe Garzarón, Camacho y El Cardito, estado de Zacatecas y evaluación geohidrológica de los acuíferos García de la Cadena, Pino Suárez y Corrales, Zac. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C., para la Comisión Nacional del Agua, en 2007

Comisión Nacional del Agua. 2008. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Pino Suárez (3233), estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Información piezométrica e hidrométrica del acuífero Pino Suarez, Zacatecas.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1978. Estudio hidrogeológico preliminar de la cuenca de Pinos, municipio de Pinos, Zac. Realizado por Acuífero S. A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la región de Pinos, en el estado de Zacatecas. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores S. A.

Servicio Geológico Mexicano, 1998. Carta Geológico-Minera F14-4 "San Luis Potosí". Escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Carta Geológico-Minera F14-A82 "El Obraje". Escala 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Carta Geológico-Minera F14-C12 "Ojuelos". Escala 1:50,000.