

*Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Pino Suárez (3233),  
Estado de Zacatecas*

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación  
20 de abril de 2015*

## Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CDXXI REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "CUENCAS CENTRALES DEL NORTE"		R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CLAVE	ACUÍFERO	CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
<b>ESTADO DE ZACATECAS</b>							
3233	PINO SUÁREZ	23.5	9.4	0.998186	0.5	13.101814	0.000000

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



**Comisión Nacional del Agua**  
**Subdirección General Técnica**  
**Gerencia de Aguas Subterráneas**  
**Subgerencia de Evaluación y**  
**Ordenamiento de Acuíferos**

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

**México, D.F., octubre de 2008**

## CONTENIDO

1.	GENERALIDADES .....	3
	Antecedentes .....	3
1.1.	Localización .....	3
1.2.	Situación administrativa del acuífero .....	5
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....	5
3.	FISIOGRAFÍA .....	7
3.1.	Provincia fisiográfica .....	7
3.2.	Clima .....	7
3.3.	Hidrografía .....	7
3.4.	Geomorfología .....	8
4.	GEOLOGÍA .....	8
4.1.	Estratigrafía .....	9
4.2.	Geología estructural .....	10
4.3.	Geología del subsuelo .....	11
5.	HIDROGEOLOGÍA .....	12
5.1.	Tipo de acuífero .....	12
5.2.	Parámetros hidráulicos .....	13
5.3.	Piezometría .....	13
5.4.	Comportamiento hidráulico .....	13
5.4.1.	Profundidad al nivel estático .....	13
5.4.2.	Elevación del nivel estático .....	15
5.4.3.	Evolución del nivel estático .....	16
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	17
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....	17
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	18
7.1.	Entradas .....	18
7.1.1.	Recarga vertical (Rv) .....	18
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	19
7.2.	Salidas .....	21
7.2.1.	Evapotranspiración (ETR) .....	21
7.2.2.	Bombeo (B) .....	22
7.2.3.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	22
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	23
8.	DISPONIBILIDAD .....	24
8.1.	Recarga total media anual (Rt) .....	24
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM) .....	24
8.3.	Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS) .....	24
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS) .....	25
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	26

## **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 (REPGA).

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 Pino Suárez, definido con la clave 3233 en el Sistema de información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción suroriental del Estado de Zacatecas, entre los paralelos 21° 53' y 22° 19' de latitud norte y 101° 19' y 101° 32' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 568 km<sup>2</sup>.

Colinda al oeste con el acuífero Pinos, al norte con Espíritu Santo, perteneciente al estado de Zacatecas; al noreste con Aqualulco y al este con Villa de Arriaga, en el estado de San Luis Potosí, (Figura 1).

Geopolíticamente abarca parcialmente el Municipio de Pinos.

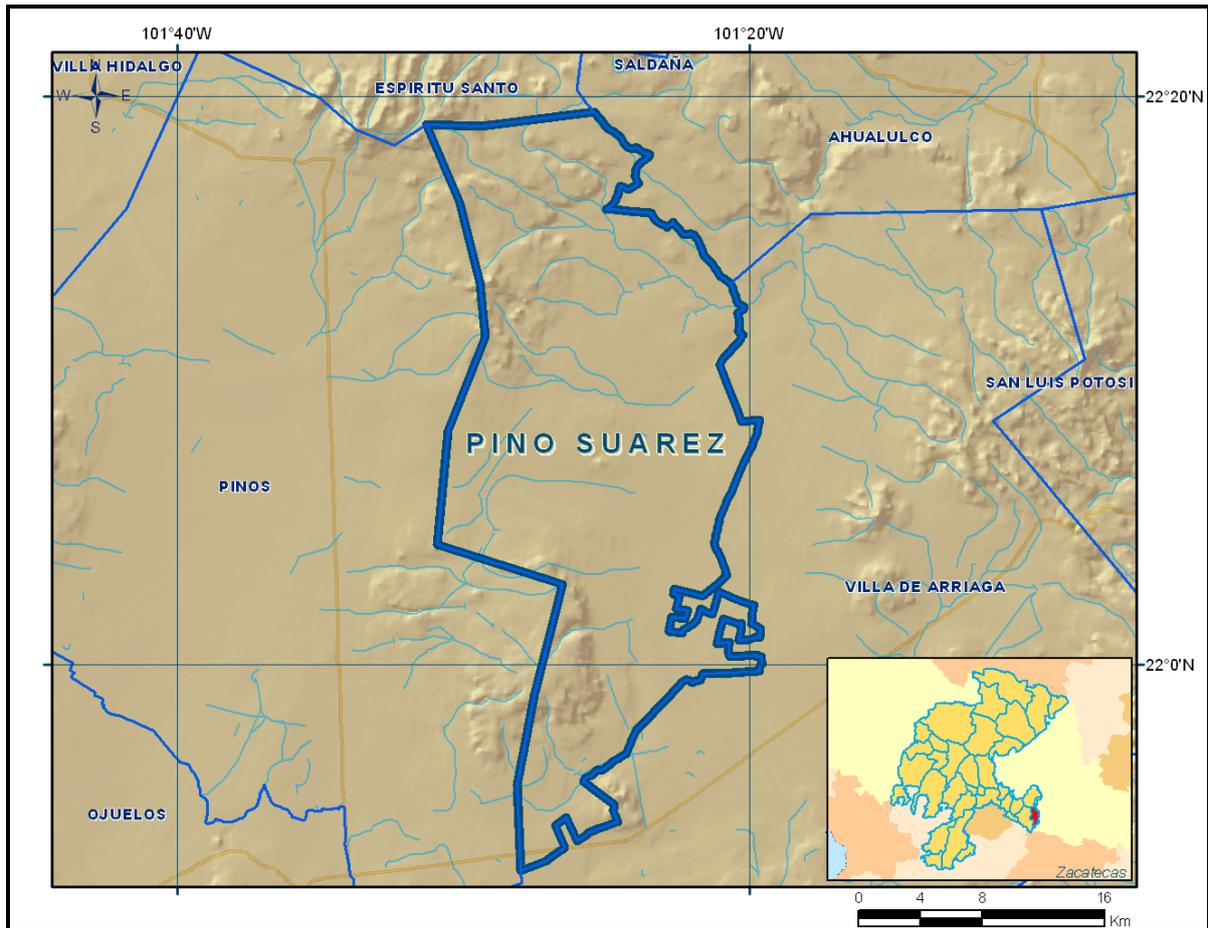


Figura 1. Localización del acuífero

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

VÉRTICE	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 límite estatal
3	101	20	38.7	22	13	25.0	Del 3 al 4 por el límite 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 al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte”, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Zacatecas. Su territorio se encuentra 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, Villa García y otros, ubicados en el Estado de Zacatecas.” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 9 de febrero de 1978. Esta veda es tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2008, el municipio de Pinos se encuentra dentro de la zona de disponibilidad 7.

El uso principal del agua subterránea es el doméstico. En el acuífero no se localiza distrito de riego alguno, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

**SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA REGIÓN DE PINOS EN EL ESTADO DE ZACATECAS, elaborado por la empresa TÉCNICOS ASESORES Y CONSTRUCTORES, S.A., en 1981, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.**

En este estudio se llevó a cabo el censo de aprovechamientos, levantamiento geológico y muestreo de agua para realizar análisis físico- químicos; se definieron las características de las estructuras geológicas y unidades geohidrológicas, el comportamiento del acuífero, la dirección del flujo subterráneo y las condiciones de salinidad del agua subterránea.

Adicionalmente se recabaron muestras de roca para análisis petrográficos y se realizaron sondeos eléctricos verticales. Recomienda la perforación de 8 pozos y efectuar análisis bacteriológicos al agua subterránea que se destina al uso doméstico y público-urbano.

**PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA Y PERFORACIÓN EXPLORATORIA EN LA REGIÓN DE PINOS, VILLA GARCÍA Y GUADALUPE BAÑUELOS DEL ESTADO DE ZACATECAS, elaborado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1988.**

El objetivo de este estudio fue definir las estructuras y las unidades geohidrológicas del subsuelo con posibilidades de almacenar agua subterránea y conocer el comportamiento del acuífero. Se realizó censo de aprovechamientos de agua subterránea y se definieron las estructuras y unidades geohidrológicas presentes en el subsuelo mediante la perforación de 5 pozos exploratorios.

**RESUMEN DE CONDICIONES GEOHIDROLÓGICAS EN LOS ACUÍFEROS DEL ESTADO DE ZACATECAS UBICADOS DENTRO DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA ADMINISTRATIVA CUENCAS CENTRALES DEL NORTE, elaborado por la Comisión Nacional del Agua en 1999.**

Este estudio proporciona información general de las características geohidrológicas del acuífero, datos de precipitación, geología, características físico-químicas del agua y definición del modelo conceptual de funcionamiento del acuífero. Las actividades de campo llevadas a cabo incluyeron el censo de aprovechamientos e hidrometría para el planteamiento del balance de aguas subterráneas, mediante el cual se calculó que la recarga media anual que recibe el acuífero ascendía a 2.0 hm<sup>3</sup>/año.

**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 SUAREZ Y CORRALES, ZAC., realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C. en 2007, para la Comisión Nacional del Agua.**

El objetivo del estudio fue actualizar el conocimiento de las redes de flujo subterráneo, profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea en la redes de medición y calidad del agua del acuífero Pino Suárez, estado de Zacatecas, para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, determinar la recarga media anual del agua subterránea y las componentes de balance hidráulico subterráneo.

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 E. Raisz (1964), la zona se ubica en la provincia fisiográfica “Mesa del Centro”; que se caracteriza por presentar amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas, la mayoría de ellas de naturaleza volcánica.

#### **3.2. Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García, para las condiciones de nuestro país, el tipo de clima que predomina en el área del acuífero es el semiseco templado con lluvias en verano ( $BS_{1kw}$ ) y con porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2. La mayor incidencia de lluvias se presenta en el mes de agosto con un rango de 70 a 80 mm.

Para la determinación de las variables que rigen el clima de la región se obtuvieron los datos de los promedios mensuales de temperatura y precipitación para el periodo 1987-2006, provenientes de 10 estaciones climatológicas ubicadas en la zona: El Peaje, Espíritu Santo, Mexquitic, Pino Suárez, Santiago (El Águila), Villa de Arriaga, El Nigromante, Ojuelos de Jalisco, Pinos y Villa Hidalgo.

Con base en estos registros se estimó una temperatura media anual de  $16.4^{\circ}$  C para la superficie que cubre el acuífero.

El valor de la precipitación media anual obtenido para este periodo es de 418.9 mm/año. La mayor precipitación se registra en la sierra del sur, con valores que fluctúan de 470 a 580 mm/año. Los meses más lluviosos son aquellos que comprenden el periodo de julio a septiembre.

#### **3.3. Hidrografía**

El acuífero se ubica dentro de la Región Hidrológica número 37 “El Salado”. Pertenece a la cuenca “San Pablo y Otras”. Debido a los bajos valores de precipitación que se registran en esta zona, existen pocos arroyos y son de tipo intermitente, perdiéndose sus escurrimientos hacia el centro de la zona, en donde el material aluvial alcanza los máximos espesores.

Dentro del área y sobre las corrientes superficiales, no se cuenta con estaciones hidrométricas, ya que los volúmenes que circulan son de un régimen transitorio. El único cuerpo de agua natural que ocurre dentro de la zona es la Laguna Sartenero, la cual solo almacena agua en época de lluvias.



#### **4.1. Estratigrafía**

Las rocas más antiguas de la zona se encuentran representadas por calizas del Cretácico, las cuales pertenecen a dos formaciones litoestratigráficas principales: La Formación Indidura, constituida por una alternancia de calizas y lutitas de edad Turoniano depositada en aguas tranquilas y poco profunda; y la Formación Caracol, constituida por areniscas y lutitas, cuya edad corresponde al Cenomaniano (Coniaciano-Maestrichtiano).

Al Paleógeno-Neógeno pertenece una secuencia de rocas volcánicas del Oligoceno, constituidas por derrames riolíticos, riolíticos, tobas riolíticas, e ignimbritas. Del Neógeno se presenta un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos subredondeados de areniscas y rocas volcánicas de composición riolítica, areniscas y limos semiconsolidados. Al Cuaternario corresponde los aluviones de diversas granulometrías, producto erosivo de las rocas preexistentes, que cubren parcialmente a todas las formaciones, ya descritas.

A continuación se describen las unidades geológicas que afloran en el área, de la más antigua a la más reciente.

##### **Basamento**

El basamento en la zona está conformado por las calizas del Cretácico Superior (Turoniano) de la Formación Indidura. Consiste de una secuencia marina estratificada, compuesta de lutitas, margas y areniscas, caracterizada por colores que varían de gris a negro, rojo y azul, que constituye las bases acantiladas de las mesetas riolíticas elevadas. Este colorido se debe al contenido de tefras volcánicas dentro de la secuencia de lutitas y margas. Se caracteriza por presentar depósitos epirogénicos de tipo flysch y aflora en la porción noroccidental del acuífero, en la sierra Peñón Blanco y en la zona de Pinos. En estos lugares la Formación Indidura está constituida por calizas arcillosas de color gris oscuro que intemperizan en color gris ocre, dispuestas en capas delgadas. Durante este proceso se resquebrajan en forma de lascas, siendo ésta la característica típica de la formación. El contacto con la Formación Caracol lo marca el cambio brusco de calizas arcillosas a las capas de areniscas y lutitas de color verde amarillento de la Formación Caracol.

##### **Cretácico Superior. Formación Caracol**

Está constituida por lutitas de color gris verdoso que intemperizan a amarillo, rara vez se presenta superficialmente sana y es más común encontrarle en forma de fragmentos de fractura concoide. En algunas localidades contiene arena y micas.

Intercaladas entre las lutitas se presentan capas de areniscas de coloración verde amarillento a café ocre. Los principales afloramientos de esta formación se localizan diseminados en la porción norte del acuífero, parcialmente cubiertos por rocas riolíticas.

### **Paleógeno-Neógeno. Volcánico Continental**

Las tobas riolíticas afloran aproximadamente en el 40% de la superficie del acuífero. En los valles de la porción sur 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 2700 msnm. En la porción nororiental del acuífero esta unidad descansa sobre las rocas del Cretácico Superior. La edad asignada a esta unidad corresponde al Oligoceno.

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

Aflora de manera circundante a la laguna Sartenejo, localizada al oriente de la zona.

### **Conglomerado polimíctico del Pleistoceno**

Conglomerados empacados en matriz areno-arcillosa y ocasionalmente tobácea, dispuestos en capas y de coloración café claro. Ocasionalmente presenta intercalaciones de estratos de arena y arcilla.

Los afloramientos de conglomerados ocupan superficies importantes en la porción noroccidental, entre las sierras Peñón Blanco y Pinos. En el valle localizado en la porción suroccidental del acuífero se alcanza un espesor máximo de 300 m.

### **Aluvión**

Es la unidad de mayor superficie en el área del acuífero, su espesor es reducido y cubre preferentemente a los conglomerados que rellenan los amplios valles.

Está constituida por arcilla, arena y menor proporción de gravas. Presenta coloración gris oscuro y su espesor no sobrepasa los 100 m.

## **4.2. Geología estructural**

La geología estructural comprende dos fases: la primera durante la cual se produjeron los plegamientos del basamento marino y la segunda cuando ocurrieron los movimientos tectónicos que ocasionaron el vulcanismo continental del Paleógeno.

Primera fase: Ocurrió a principios del Paleógeno, cuando los sedimentos marinos del Cretácico sufrieron deslizamientos submarinos dirigidos al NE. Estos movimientos orogénicos crearon extensos anticlinorios y sinclinorios. En la porción norte y este de la zona se observan las rocas sedimentarias afectadas por plegamientos originados por los esfuerzos tectónicos generados por la Orogenia Laramide, durante el Cretácico Tardío. Las estructuras más comunes son los anticlinales y sinclinales de tipo simétrico en los que la presencia de

delgados estratos de lutitas le confieren mayor competencia al ser sometidas a esfuerzos, esto se evidencia por la presencia de clivaje.

Segunda fase: Los esfuerzos antes descritos, estuvieron acompañados por fallas y fracturas, las cuales liberaron parte de la energía generada por los esfuerzos compresionales. Una vez que estos dejaron de actuar, dieron lugar a una tectónica de relajamiento, durante la cual las rocas sufrieron un reacomodo en bloques.

### **4.3. Geología del subsuelo**

Con base en los resultados de la interpretación de los sondeos geofísicos realizados en 1981, la descripción de algunos cortes litológicos de pozos y la interpretación de la información hidrogeológica existente, es posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de lentes de arcillas; conformado por un medio granular, hacia la parte superior, y otro fracturado subyacente (figura 3).

El medio granular está constituido por materiales aluviales de granulometría variada y los conglomerados que constituyen los depósitos de talud. El medio fracturado está conformado por una secuencia de areniscas y lutitas de la Formación Caracol, así como las rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno (riolitas e ignimbritas).

Existe interconexión hidráulica entre ambos medios, de tal manera que el espesor del acuífero puede alcanzar algunas centenas de metros en el centro de los valles, dependiendo de la profundidad del fracturamiento, y disminuir gradualmente hacia los flancos de las sierras que los rodean.

Verticalmente la frontera superior es la posición del nivel freático y las fronteras inferiores y laterales están constituidas por la misma secuencia de areniscas y lutitas, así como las rocas volcánicas, cuando su permeabilidad secundaria por fracturamiento desaparece:

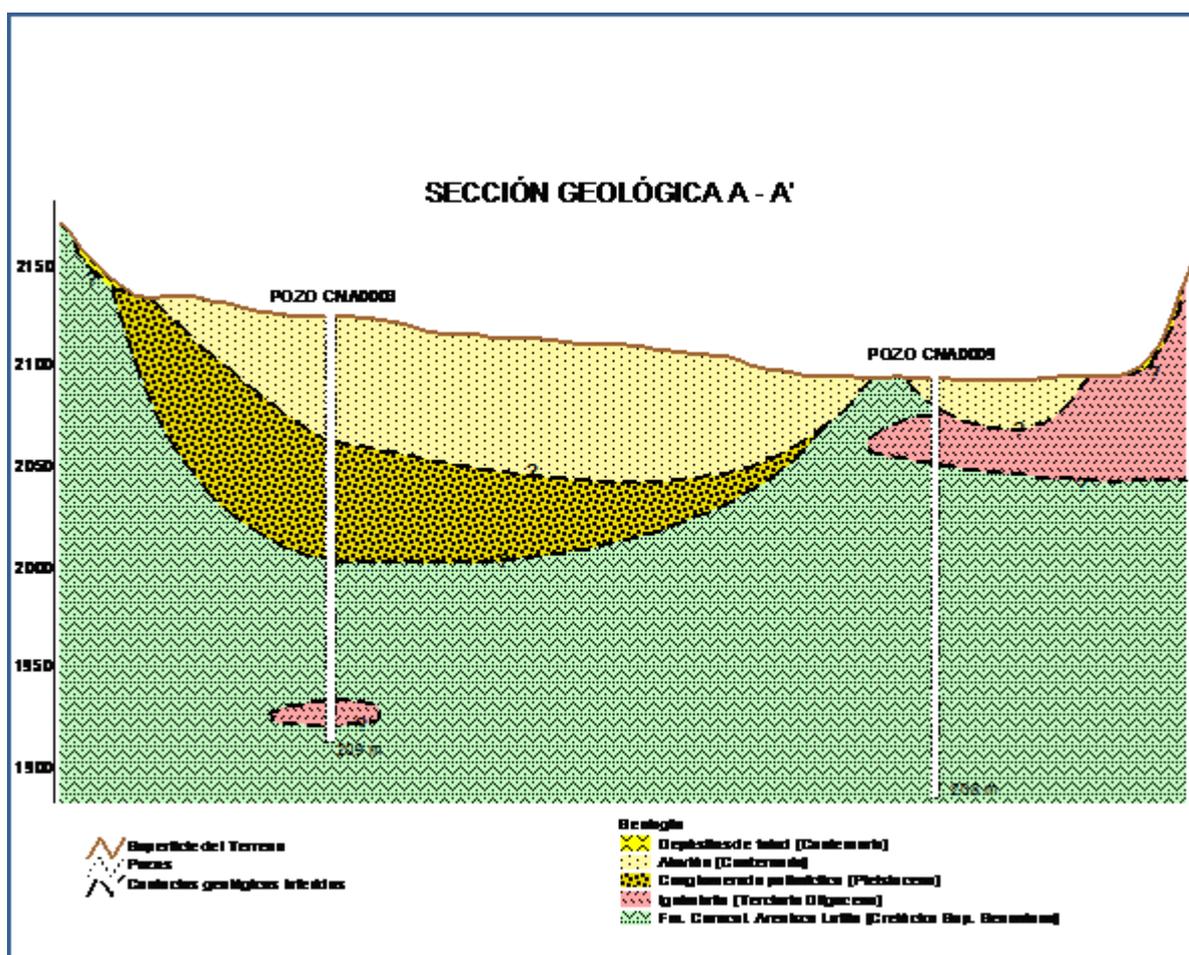


Figura 3. Sección geológica de la zona

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica y piezométrica, es posible reconocer tres unidades hidrogeológicas, que en conjunto definen un sistema acuífero que se comporta como libre, con interconexión hidráulica entre las distintas unidades permeables.

**Unidad en sedimentos clásticos.** Constituida por los sedimentos clásticos (aluvión) y vulcanoclásticos que integran la planicie de la cuenca, cuyo espesor en algunas localidades supera los 400 m. De acuerdo al gasto aportado por aprovechamientos perforados en esta unidad, se le atribuye permeabilidad media a baja.

**Unidad en tobas, ignimbritas y riolitas.** Sus afloramientos conforman las sierras que delimitan al valle en las regiones localizadas al norte, sur y poniente del acuífero, sobre las cuales se depositaron los sedimentos aluviales.

En superficie constituye zonas de recarga tanto hacia el acuífero aluvial como a estas mismas rocas que en el subsuelo funcionan como unidad productora.

**Unidad en areniscas-lutitas y calizas-lutitas del Cretácico.** Estas rocas sedimentarias afloran en forma de anticlinales en la porción oriental y centro del acuífero, hacia la planicie se interdigitan con los sedimentos clásticos. Por su fracturamiento y litología funcionan como zonas de recarga al acuífero granular y a profundidad forma acuíferos de baja productividad debido a su contenido de arcillas.

## **5.2. Parámetros hidráulicos**

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2007 se ejecutó una sola prueba de bombeo, únicamente en la etapa de recuperación, con duración de 12 horas; obteniéndose una conductividad hidráulica de **0.0125 m/día** y una transmisividad de **5.02 m<sup>2</sup>/día**, para un espesor saturado de 400 m.

La prueba de bombeo no contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

## **5.3. Piezometría**

Con respecto a la información piezométrica se dispone de tres lecturas que corresponden a los años 2004, 2006 y 2007; obtenidas en 7, 5 y 38 aprovechamientos, respectivamente.

## **5.4. Comportamiento hidráulico**

### **5.4.1. Profundidad al nivel estático**

Con la información disponible fue posible elaborar las configuraciones de profundidad al nivel estático para 2004, en la porción centro-norte del acuífero y para 2007 en casi toda su superficie. En la figura 4 se presenta la configuración de profundidad al nivel estático en 2004, en la que se puede observar que los valores variaban de 2 a 6 m.

Para el año 2007 (Figura 5) los valores de profundidad al nivel del agua subterránea varían de 2 a 20 m; los abatimientos más importantes se localizan al oeste de la laguna Sartenejo y al suroeste de Cieneguilla.

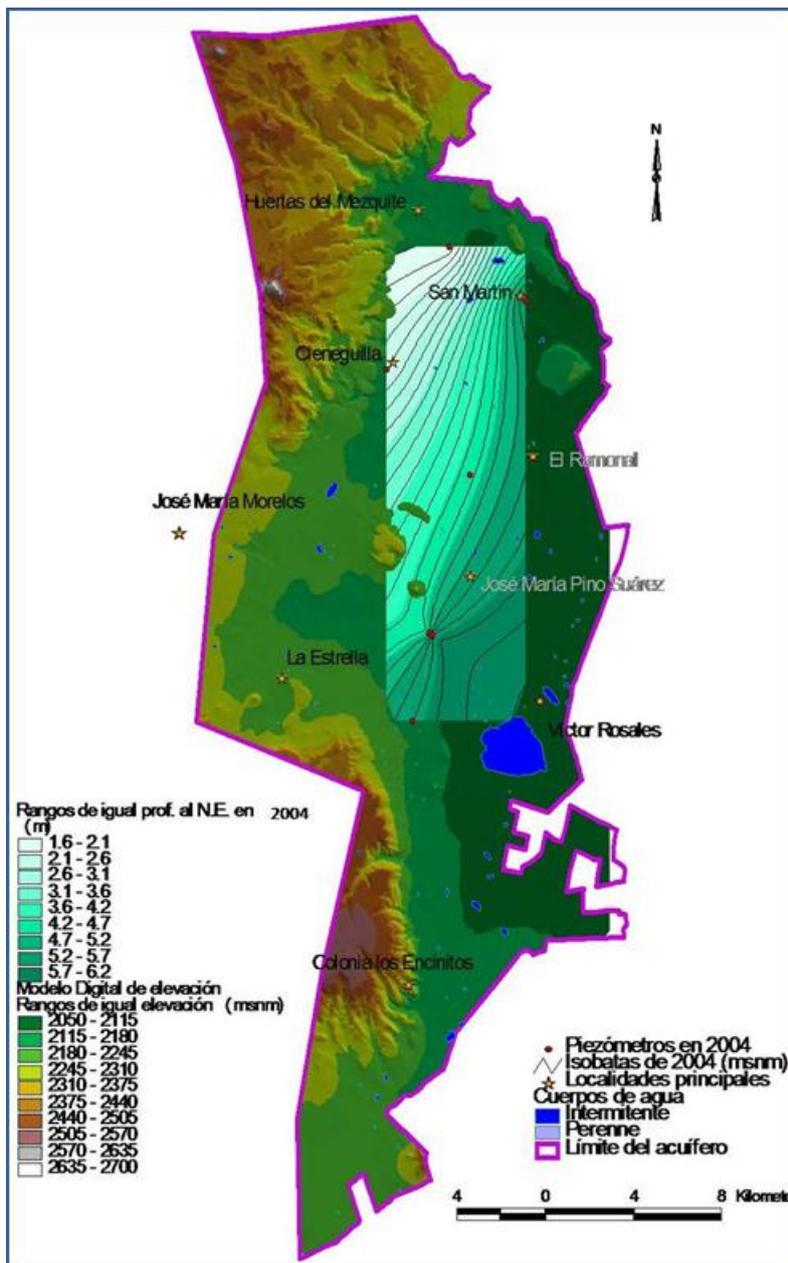


Figura 4. Profundidad al nivel estático (m), 2004

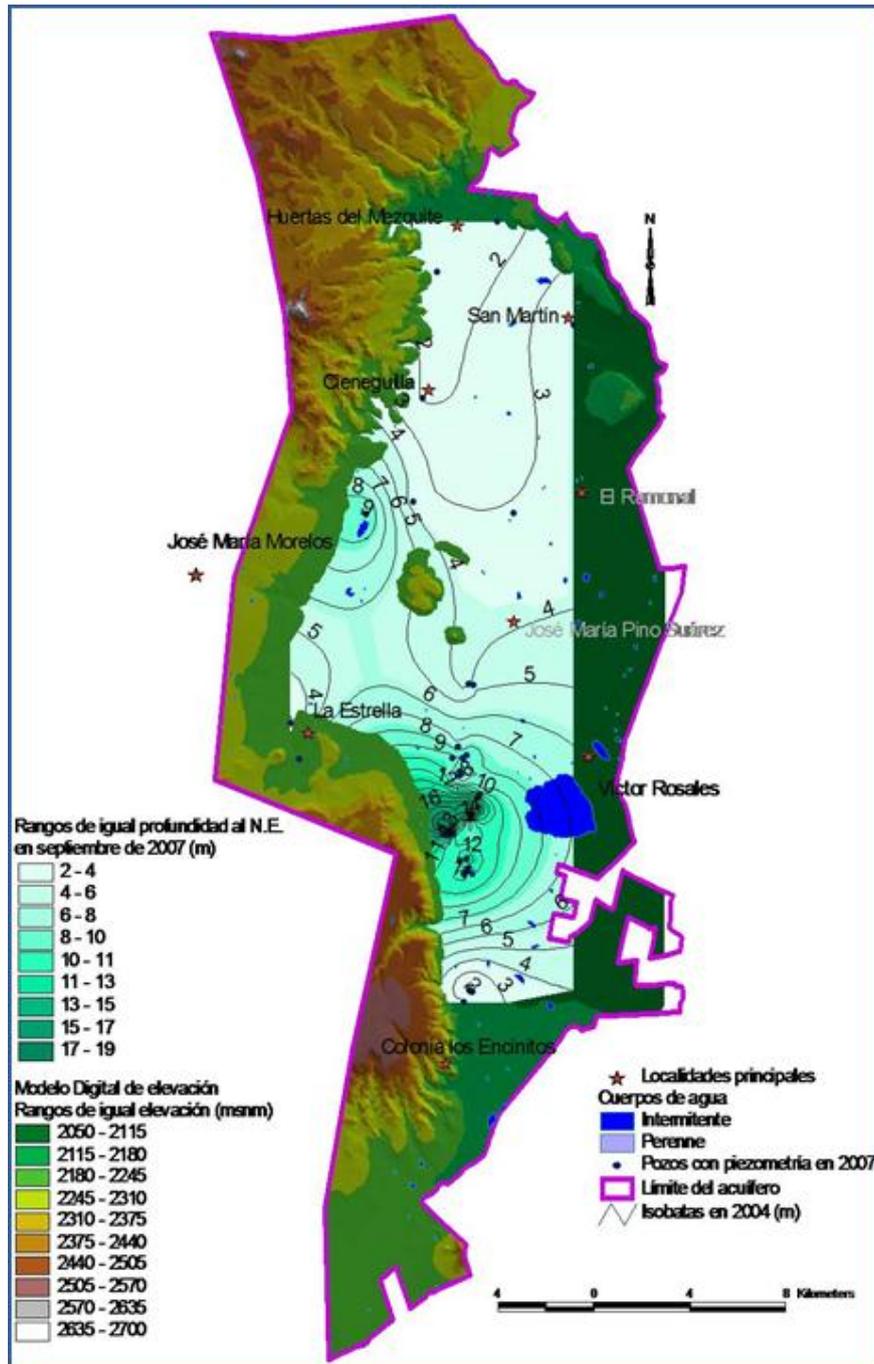


Figura 5. Profundidad al nivel estático (m), 2007

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de la elevación del nivel estático que corresponde al año 2007, muestra valores de 2190 a 2055 msnm, identificando una dirección preferencial del flujo subterráneo de oeste a este, hacia el límite con el estado de San Luis Potosí. No se observan conos de abatimiento.

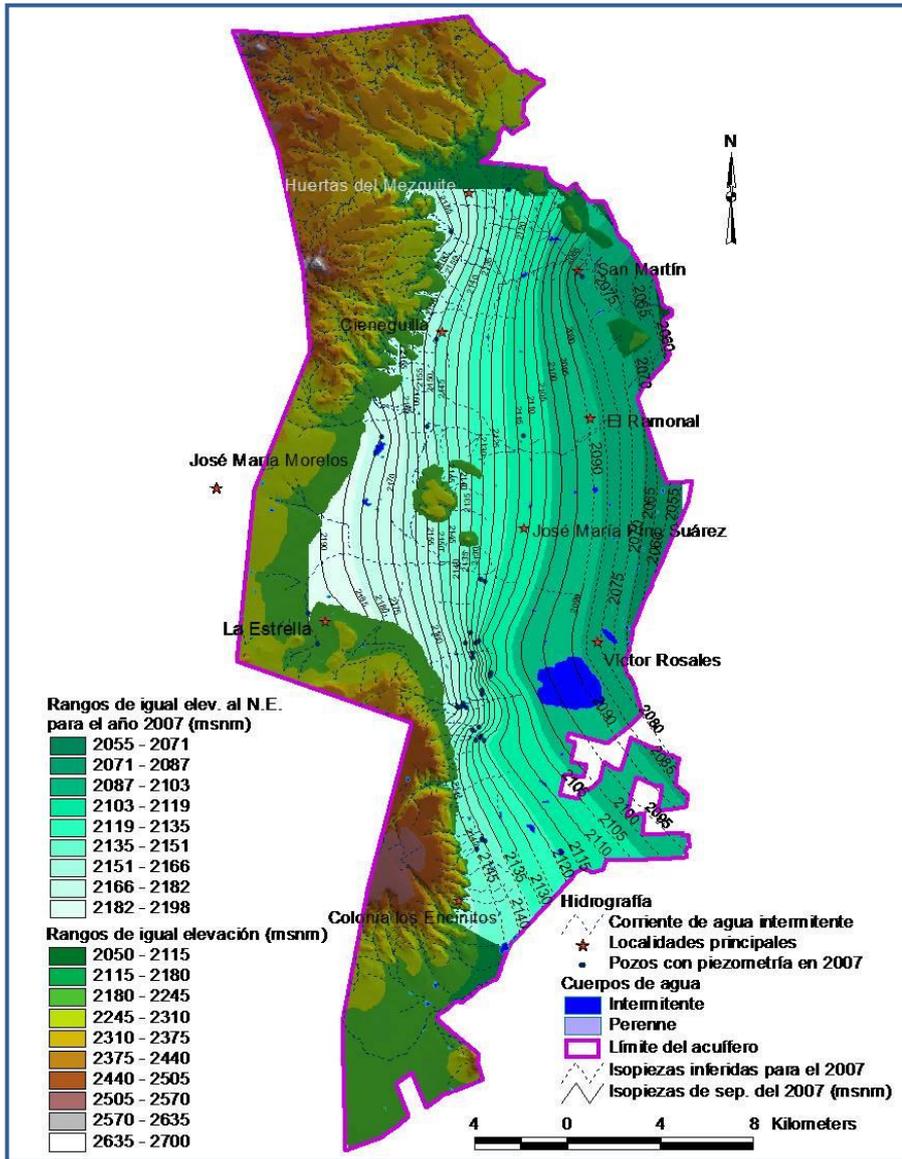


Figura 6. Elevación del nivel estático (msnm), 2007

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita la configuración en todo el acuífero. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en estudios previos se encuentran dispersas en tiempo y espacio y solo cubren la porción centro-norte del acuífero. El análisis de la evolución del nivel estático para el periodo 2004-2007 en esta porción del acuífero arroja un valor de recuperación promedio de 0.17 m anuales. Aunado a esto, la configuración resultante no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración del bombeo o 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.

### **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 iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 60 a 340 mg/l, por debajo del máximo permisible de 1000 mg/l establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo humano.

Por otra parte, 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 baja ( $C_1$ ) a alta ( $C_3$ ) y contenido bajo de sodio ( $S_1$ ). Por las características del agua de este acuífero, se considera que de manera general es apta para el riego de la mayoría de los cultivos. De las 25 muestras analizadas, solo una se clasifica como  $C_3S_1$ , 18 como  $C_2S_1$ , y 6 como  $C_1S_1$ . Esto indica que el agua subterránea es apta para el uso y consumo humano y el riego agrícola.

Con respecto a las familias del agua, predomina la bicarbonatada-sódica y bicarbonatada-cálcica, que indican que el agua es de reciente infiltración y han circulado a través de rocas volcánicas.

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

De acuerdo con los resultados reportados en el último censo realizado en el año 2007, se registraron un total de 46 obras en el acuífero que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 37 son norias, 7 pozos y 2 manantiales. Del total de obras, 43 están activas y las 3 restantes inactivas.

El total de las obras activas se destinan al uso doméstico. El volumen de extracción conjunta asciende a **0.5 hm<sup>3</sup>** anuales.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2004-2007, en una superficie de 323.6 km<sup>2</sup> del valle, en la que están dispersos 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 la siguiente:

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas están 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 en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

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

#### 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 ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

- B: Bombeo
- Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR: Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$ : Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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

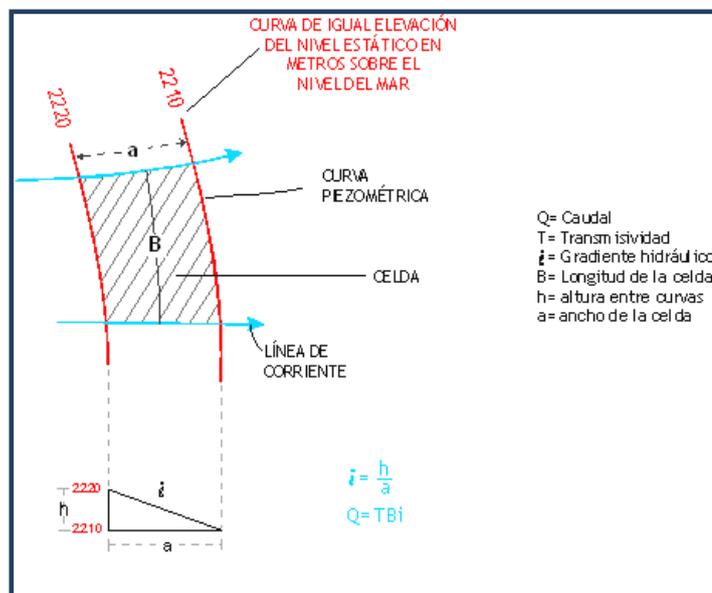
Una fracción del volumen de las lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. Las entradas al acuífero, tienen su origen en las zonas de recarga localizadas en las sierras que rodean al valle.

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 2007 (figura 7), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Dónde:

- Q = gasto que pasa por un determinado canal de flujo;
- T = transmisividad;
- B = ancho de la celda;
- i = gradiente hidráulico



En esta configuración se seleccionaron canales o celdas de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la Tabla 2 se puede observar que para las celdas identificadas se presenta un flujo de entrada de **10 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

No. Celda	Espesor medio de acuífero (m)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	B (m)	i	Q m <sup>3</sup> /s	Eh (hm <sup>3</sup> /año)
1	35	2.38E-05	0.0008	6,500	0.0116	0.060	1.9
2	35	2.38E-05	0.0008	5,300	0.0217	0.092	2.9
3	33	2.38E-05	0.0008	9,800	0.0099	0.076	2.4
4	35	2.38E-05	0.0008	8,700	0.0126	0.088	2.8
<b>SUMA</b>						<b>0.318</b>	<b>10.0</b>

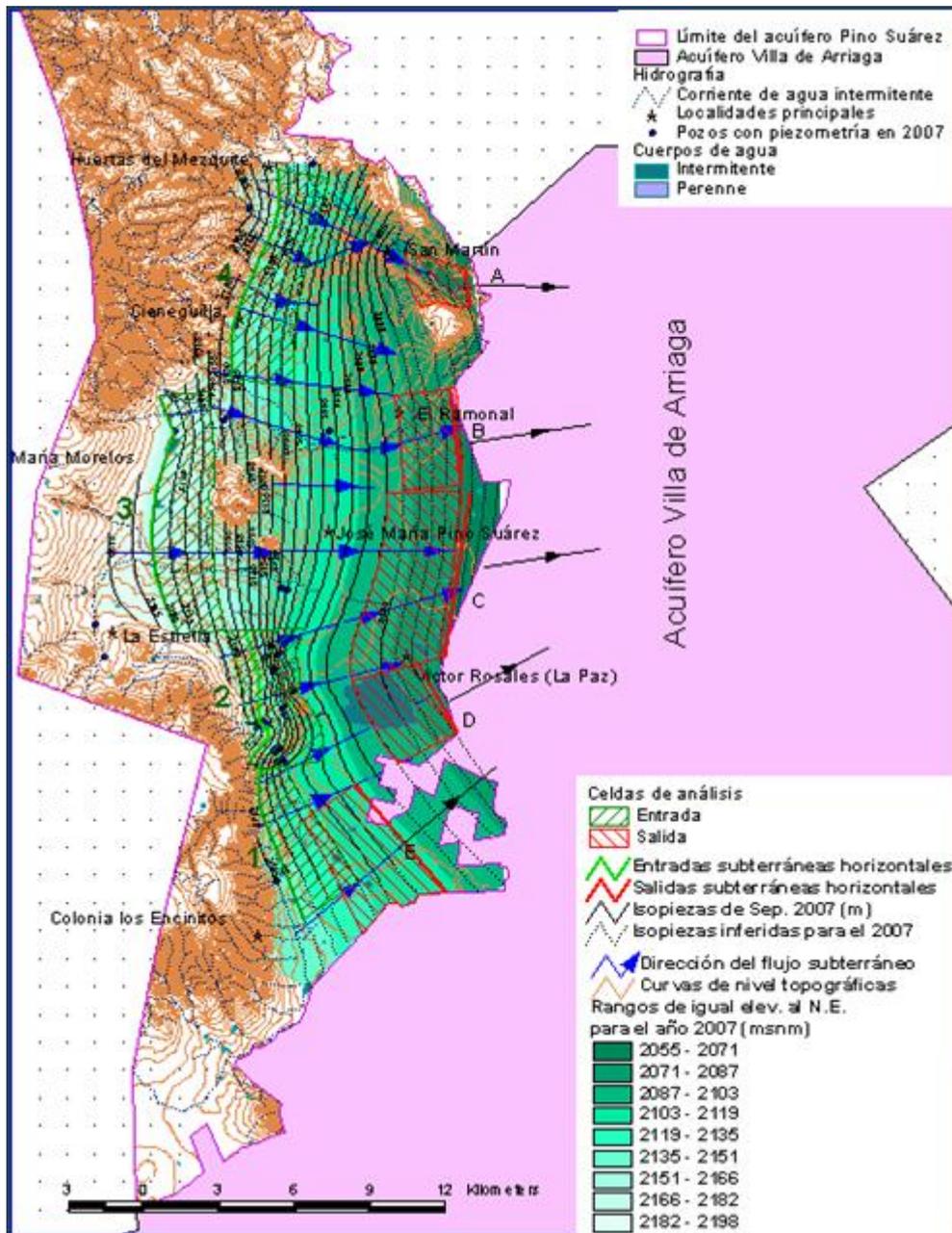


Figura 7. Red y celdas de flujo subterráneo

## 7.2. Salidas

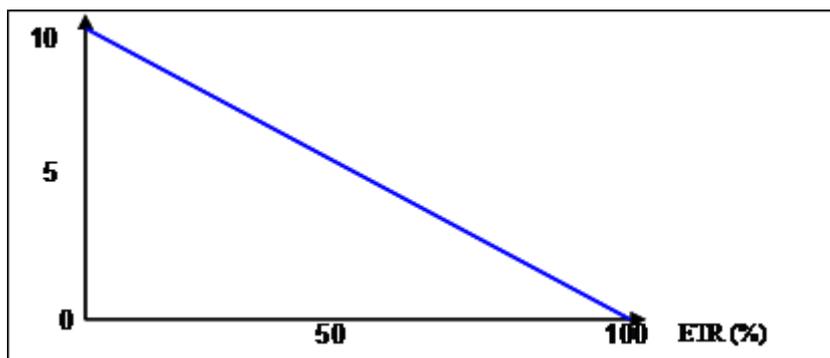
### 7.2.1. Evapotranspiración (ETR)

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 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas. Se aplicó la fórmula de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real es de 398.9 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 16.4° C y precipitación de 418.9 mm.

<p><b>Fórmula de Turc:</b> <math display="block">ETR (mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}</math></p> <p style="text-align: right;"><math>L = 300 + 25T + 0.05T^3</math></p> <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border: none;"> <tr> <td style="padding: 5px;">T (°C) =</td> <td style="padding: 5px; text-align: right;"><b>16.4</b></td> <td style="padding: 5px;">P<sup>2</sup> =</td> <td style="padding: 5px; text-align: right;"><b>175477.21</b></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">P(mm) =</td> <td style="padding: 5px; text-align: right;"><b>418.9</b></td> <td style="padding: 5px;">L<sup>2</sup> =</td> <td style="padding: 5px; text-align: right;"><b>865918.091</b></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">L =</td> <td style="padding: 5px; text-align: right;"><b>930.5472</b></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">ETR (mm)</td> <td style="padding: 5px; text-align: right;"><b>398.9</b></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	T (°C) =	<b>16.4</b>	P <sup>2</sup> =	<b>175477.21</b>	P(mm) =	<b>418.9</b>	L <sup>2</sup> =	<b>865918.091</b>	L =	<b>930.5472</b>			ETR (mm)	<b>398.9</b>		
T (°C) =	<b>16.4</b>	P <sup>2</sup> =	<b>175477.21</b>													
P(mm) =	<b>418.9</b>	L <sup>2</sup> =	<b>865918.091</b>													
L =	<b>930.5472</b>															
ETR (mm)	<b>398.9</b>															

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 10 m, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 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 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el porcentaje de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



Los niveles freáticos someros se presentan dentro de una superficie de 207 km<sup>2</sup>, pero sólo en el 10% de ella (20.7 km<sup>2</sup>) existe cobertura vegetal cuyas raíces son suficientemente largas para llevar a cabo la evapotranspiración. De esta manera, si consideramos la superficie de 20.7 km<sup>2</sup>, donde la profundidad media es del 4.9 m y la lámina de evapotranspiración real es de 398.9 mm, de acuerdo con la gráfica anterior se tiene que:

$$\text{ETR} = 20.7 \text{ km}^2 (0.3989 \text{ m}) (0.51) = 4.2$$

$$\text{ETR} = 4.2 \text{ hm}^3/\text{año.}$$

### 7.2.2. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **0.5 hm<sup>3</sup> anuales**. La extracción para uso doméstico se cuantificó con los datos obtenidos en el censo (tiempos de operación y gastos instantáneos).

### 7.2.3. 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 NE presentado en la figura 7. El Valor estimado es de **18.8 hm<sup>3</sup> anuales**, tal como se muestra en la Tabla 3.

Estas salidas se presentan hacia el acuífero Villa de Arriaga, perteneciente al estado de San Luís Potosí.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

No. Celda	Prof. Media de la formación acuífera (m)	Espesor medio de acuífero (m)	Conductividad Hidráulica (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	B (m)	i	Q m <sup>3</sup> /s	Sh (hm <sup>3</sup> /año)
A	400.00	393.00	1.00E-05	3.93E-03	1,600	0.006	0.038	1.2
B	400.00	393.00	1.00E-05	3.93E-03	4,050	0.008	0.127	4.0
C	400.00	393.00	1.00E-05	3.93E-03	7,000	0.008	0.220	7.0
D	400.00	393.00	1.00E-05	3.93E-03	5,500	0.006	0.130	4.1
E	400.00	393.00	1.00E-05	3.93E-03	2,900	0.007	0.080	2.5
<b>Totales</b>							<b>0.595</b>	<b>18.8</b>

### 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 suficiente para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático que cubra la superficie del acuífero. Los registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y sólo cubren la porción noroccidental del acuífero. Adicionalmente, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Por lo tanto para efecto del balance de aguas subterráneas,  $\Delta V(S) = 0$ .

#### Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical (Rv). De la ecuación correspondiente, se tiene que:

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

Sustituyendo valores:

$$Rv = 0.5 + 18.8 + 4.2 + 0.0 - 10.0$$

$$Rv = 13.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (Rt) es igual a la suma de las entradas

$$Rt = Rv + Eh = 23.5$$

$$Rt = 23.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

$$\text{DAS} = \text{Rt} - \text{DNCOM} - \text{VCAS}$$

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica

Rt = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

### 8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual (Rt) corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este acuífero su valor es de **23.5 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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 se consideró como descarga natural comprometida un volumen de **9.4 hm<sup>3</sup> anuales**, que corresponde al 50% de las salidas subterráneas hacia el acuífero vecino Villa de Arriaga, en el estado de San Luis Potosí; el volumen restante podrá aprovecharse dentro del acuífero Pino Suárez. Esto garantizará los derechos de agua concesionados, promoverá la regularización de usuarios y el desarrollo en ambos lados del límite estatal.

### 8.3. Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS)

De acuerdo a la información existente en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), el volumen concesionado de aguas subterráneas para este acuífero al **30 de septiembre de 2008** es de **268,289 m<sup>3</sup>/año**.

#### 8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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, de acuerdo con la expresión definida, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA.

$$\text{DAS} = R_t - \text{DNCOM} - \text{VCAS}$$

$$\text{DAS} = 23.5 - 9.4 - 0.268289$$

$$\text{DAS} = 13.831711$$

La cifra indica que existe un volumen disponible de **13'831,711 m<sup>3</sup> anuales** para otorgar nuevas concesiones.

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

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 1999. Resumen de Condiciones Geohidrológicas en los Acuíferos del Estado de Zacatecas Ubicados Dentro de la Región Hidrológica Administrativa Cuencas Centrales del Norte. Gerencia Estatal Zacatecas.

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 la empresa INGENIERÍA Y GESTIÓN HÍDRICA, S. C.

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. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas. Realizado por la empresa TÉCNICOS ASESORES Y CONSTRUCTORES, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1988. Prospección Geohidrológica y Perforación Exploratoria en la Región de Pinos, Villa García y Guadalupe Bañuelos del Estado de Zacatecas.