

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Cedros (3218), 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.**

CDVI		REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "CUENCAS CENTRALES DEL NORTE"					
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE ZACATECAS							
3218	CEDROS	54.5	7.6	36.689475	7.2	10.210525	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 3218 CEDROS, ESTADO
DE ZACATECAS***

México, D.F., Julio de 2008

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización	2
1.2	Situación administrativa del acuífero	4
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3.	FISIOGRAFÍA	7
3.1.	Provincia fisiográfica	7
3.2.	Clima.....	8
3.3.	Hidrografía	8
3.4.	Geomorfología	9
4.	GEOLOGÍA	10
4.1.	Estratigrafía.....	10
4.2.	Geología estructural.....	13
4.3.	Geología del subsuelo.....	14
5.	HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1.	Tipo de acuífero	14
5.2.	Parámetros hidráulicos.....	15
5.3.	Piezometría	16
5.4.	Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2	Elevación del nivel estático	17
5.4.3	Evolución del nivel estático	17
5.5	Hidroggeoquímica y calidad del agua subterránea.....	18
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	21
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	21
7.1.	Entradas.....	22
7.1.1.	Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	25
7.2.	Salidas	26
7.2.1.	Bombeo (B).....	26
7.2.2.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	26
7.2.3.	Descarga natural profunda (Dnp)	26
7.3.	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	27
8.	DISPONIBILIDAD.....	27
8.1.	Recarga total media anual (Rt).....	28
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM)	28
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	28
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	28
9.	BIBLIOGRAFÍA	29

1. GENERALIDADES

Antecedentes

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

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

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

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

1.1 Localización

El Acuífero Cedros, definido con la clave 3218 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se encuentra ubicado en la porción norte del Estado de Zacatecas, entre los paralelos 24°15' y 25°15' de latitud Norte y entre los meridianos 101°15' y 102°45' de longitud Oeste, y comprende una superficie aproximada de 5108 km². Limita al norte con la línea que define la frontera con el estado de Coahuila (figura 1).

Colinda al norte con el acuífero Saltillo Sur, al este con el acuífero Guadalupe Garzaron, al sur con el acuífero El Cardito, y al oeste con los acuíferos Camacho, Oriente Aguanaval y Principal Región Lagunera.

Geopolíticamente se localiza dentro de los municipios de Mazapil y Melchor Ocampo. Las poblaciones más importantes que se localizan dentro del acuífero son: Mazapil, Melchor Ocampo, y Cedros.

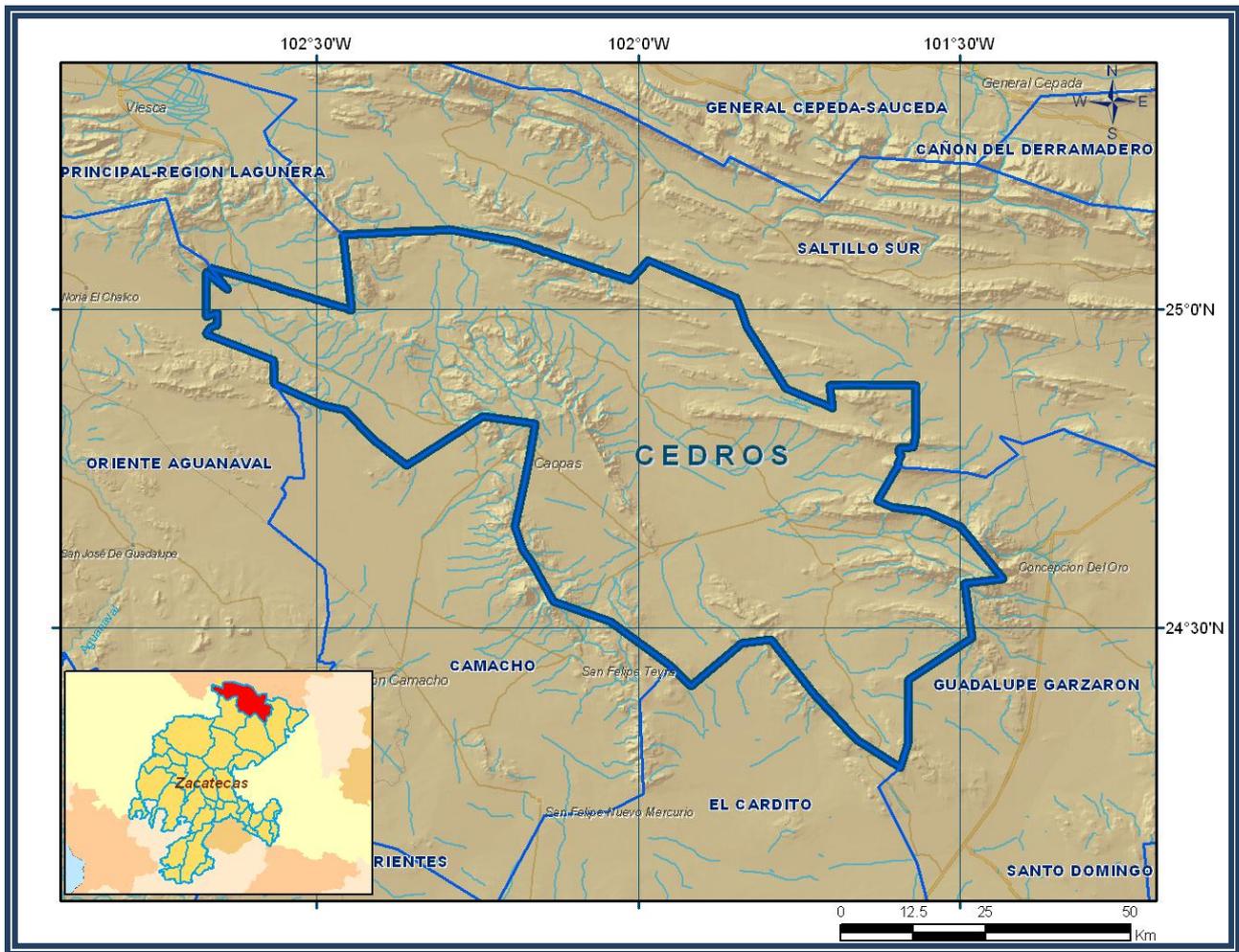


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 3218 CEDROS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	39	51.6	25	3	51.1	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	102	27	30.8	25	6	58.0	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	101	35	54.3	24	45	13.0	
4	101	37	47.4	24	41	56.0	
5	101	36	25.1	24	41	21.0	
6	101	33	7.4	24	40	53.9	
7	101	30	5.3	24	39	29.8	
8	101	26	2.6	24	34	33.3	
9	101	29	37.8	24	34	11.2	
10	101	28	57.8	24	28	59.5	
11	101	34	48.1	24	25	6.4	
12	101	34	55.0	24	19	0.9	
13	101	35	36.3	24	16	45.8	
14	101	39	40.5	24	19	25.8	
15	101	43	39.1	24	23	42.3	
16	101	47	40.4	24	28	48.5	
17	101	50	23.5	24	28	30.7	
18	101	55	5.9	24	24	27.8	
19	101	56	53.5	24	26	15.4	
20	102	2	39.7	24	30	34.7	
21	102	7	54.1	24	32	23.6	
22	102	9	51.4	24	36	2.9	
23	102	10	50.7	24	37	25.7	
24	102	11	33.4	24	39	32.6	
25	102	10	30.5	24	44	21.3	
26	102	10	7.9	24	46	4.3	
27	102	9	40.3	24	49	13.2	
28	102	14	30.0	24	49	53.2	
29	102	21	37.5	24	45	13.2	
30	102	24	45.4	24	47	43.2	
31	102	27	22.3	24	50	27.0	
32	102	29	40.2	24	51	1.5	
33	102	33	54.5	24	52	55.2	DEL 33 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	102	39	51.6	25	3	51.1	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cedros pertenece al Organismo de Cuenca VII Cuencas Centrales del Norte. La totalidad del acuífero se encuentra vedado y sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas, así como en el resto de los Municipios del Estado de Zacatecas y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las agua del subsuelo en los municipios señalados”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 5 de agosto de 1988. Este decreto es de tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2008, los dos municipios que conforman la región, Mazapil y Melchor Ocampo, se ubican en la zona de disponibilidad 7.

En su territorio no existen Distritos de Riego y actualmente no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

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

ESTUDIO HIDROGEOLOGICO CONSECUTIVO DEL ACUIFERO CEDROS, elaborado por Elaborado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, para Minera Peñasquito, S.A. de C.V., en 2007. El informe consta de tres tomos, dos anexos y un resumen ejecutivo:

Tomo I. Exploración Hidrogeológica. En este tomo se incluye las memorias técnicas de los pozos perforados.

Tomo II. Prospección hidrogeofísica. Incluye la información geofísica generada, la cual es mostrada en secciones y planos en dos y tres dimensiones.

Tomo III. Hidrogeología. En este tomo se muestra el marco hidrogeológico del acuífero Cedros y del valle de Mazapil, así como la hidroestratigrafía, hidrodinámica y los avances del modelo de simulación.

Anexo I (Anexo del tomo I). Consiste en la memoria de los pozos DW, que incluye: localización, perforación exploratoria, ampliación e instalación de tubería, desarrollo y pruebas de aforo y fotografías de cada pozo.

Anexo II (Catálogo de pozos). Consiste en un catálogo de los 151 aprovechamientos subterráneos localizados en el acuífero Cedros, donde se muestra las características principales, ubicación y fotografía.

ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y EVALUACION INTEGRAL DEL ACUIFERO ADMINISTRATIVO CEDROS, EN EL MUNICIPIO DE MAZAPIL, ZACATECAS, elaborado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, para Minera Peñasquito, S.A. de C.V., en 2006. Los objetivos del estudios fueron los siguientes:

A.- Verificar la existencia de un acuífero profundo en rocas fisuradas, y determinar los parámetros hidráulicos utilizando los pozos exploratorios para este propósito. El avance del estudio hidrogeológico confirma la presencia de un acuífero constituido por rocas fisuradas en el área de mina. Las evidencias han sido aportadas por los resultados de los pozos de exploración-laboreo y los barrenos de condenación. Los rendimientos de cada obra hidráulica corresponden con los típicos para este tipo de acuíferos formado por una secuencia inter-estratificada de lutitas calcáreas (lodolitas o mudstones) y areniscas calcáreas, con fracturamiento.

B.- Determinar los parámetros hidráulicos que se utilizarán en la modelación hidrodinámica y para definir el comportamiento del acuífero. Con los rendimientos hidráulicos obtenidos en la etapa anterior del estudio, es posible extraer caudales bajos dentro del área de mina, que pueden variar desde 1 a 3.5 litros por segundo y en forma excepcional hasta 7 lps, en donde las estructuras presentan mayor densidad, con niveles dinámicos situados entre 85 y 130 m de profundidad.

C.- Describir la hidroestratigrafía del acuífero. Con la información litológica del programa de barrenos de condensación y los pozos de exploración-laboreo, se integra la hidroestratigrafía del área de mina. La columna litológica típica para el área de mina es:

- 1) Suelo.
- 2) Arenas y gravas con caliche.
- 3) Areniscas calcáreas alteradas.
- 4) Areniscas alternadas con lutitas calcáreas.

Todas estas unidades presentan espesores variables, siendo la de mayor espesor la número 4, de la cual se han cortado más de 500 m con barrenos de exploración minera.

D.- Obtener el modelo hidrogeológico tridimensional del área de mina. El modelo geológico tridimensional del área es complejo, ya que las rocas del área de mina fueron tectonizadas hasta generar rompimientos diferenciales debido a las propiedades de plasticidad de cada tipo de roca, lo que generó un escenario de fosas seccionadas en bloques, más allá de una simple deformación en sinclinal entre las Sierras de Mascarones, ubicada al norte, y Las Bocas al sur. Como resultado de ello, es posible encontrar una serie de acuíferos “colgados” a distintas elevaciones, formados por las diferentes unidades hidrogeológicas citadas.

E.- Identificar las condiciones físicas y químicas del agua e interpretar sus relaciones hidrogeoquímicas y calidad del agua. La calidad del agua se considera buena para los tramos observados. Se obtiene una calidad mezcla que a veces la deteriora, al recibir aportes de los tramos profundos de los pozos, por lo que la mezcla de agua de los aflores se integra con una salinidad expresada en conductividad eléctrica promedio de 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y sólidos totales disueltos que igualmente ascienden hasta 720 ppm. La calidad es reflejo del área de influencia de zonas mineralizadas del área de mina.

F.- Construir el modelo de simulación numérica que permita observar el comportamiento del acuífero en diversos escenarios. La simulación de flujo del agua subterránea se llevó a cabo para el entorno de la unidad minera, proyectando su explotación al año 2010. En el valle de Mazapil se presentó únicamente la posibilidad de llevar a cabo la simulación, con los diferentes parámetros que requiere el modelo.

ESTUDIO REGIONAL DE EVALUACION HIDROGEOLOGICA DEL ACUIFERO CEDROS, EN EL MUNICIPIO DE MAZAPIL, ESTADO DE ZACATECAS, elaborado por la Universidad de Sonora, para M3 Mexicana S. de R. L. de C. V., en 2004. En este estudio se definieron las características físicas del medio saturado y de las unidades de roca que actúan como medio impermeable, generando una diferenciación por unidades hidrogeológicas. Se determinaron los parámetros hidráulicos y la geometría del acuífero en las zonas de interés, así como su capacidad hidráulica. Asimismo, se identificaron las condiciones físicas y químicas del agua, interpretando sus relaciones hidrogeoquímicas y calidad del agua. Se realizó un balance hidrometeorológico y con base en él, se determinó el volumen potencial para recarga. Adicionalmente, se planteó el balance de aguas subterráneas para evaluar la recarga total media anual que recibe el acuífero. El

valor de esta variable se estimó en 10.1 hm³ anuales, en tanto que el valor de la extracción asciende a 6.6 hm³.

ESTUDIO DE PROSPECCION GEOHIDROLOGICA Y EXPLORACION GEOFISICA EN LAS ZONAS MARGINADAS DEL ESTADO DE ZACATECAS, elaborado por CONAGUA, en 1990.

En un área aproximada de 6,000 km², se realizaron actividades de verificación y muestreo geológico de campo, secciones geológicas, censo de población y aprovechamientos hidráulicos; así como toma de muestras de agua para su análisis físico-químico. Durante el estudio se cartografiaron 19 unidades litológicas, de las cuales 7 son las que revisten mayor importancia desde el punto de vista geohidrológico. La tectónica del lugar proporciona un complejo arreglo geológico-estructural que limita a la zona en grandes bloques de comportamiento hidrogeológico diferente. Se recomienda programar recorridos de nivelación topográfica.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO, elaborado por Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en el Estado de Zacatecas, para la S.A.R.H., en 1980.

En una superficie de 7,500 km² en la zona de Guadalupe Garzarón, y consistió en la realización de censos de aprovechamientos hidráulicos, obtención de muestras de agua y roca, análisis físico-químicos así como recorridos geohidrológicos de campo. Entre los aspectos relevantes se menciona que en el Bolsón de Cedros se recomienda incrementar el número de perforaciones, debido a que la permeabilidad y niveles estáticos son adecuados, además de que la calidad del agua es aceptable. Propone efectuar perforaciones exploratorias hacia los flancos de las sierras El Ratón y Guadalupe, a profundidades del orden de 200 m.

INFORME GENERAL DEL ESTADO DE ZACATECAS, elaborado para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1974.

Para este informe se tomaron datos referentes a los análisis de aguas de los estudios: "Estudio Preliminar de la Región Noreste de Zacatecas" (1948) y "Estudio Geohidrológico de la zona Ixtlera de Zacatecas" (1971). El objetivo del estudio fue investigar las características químicas del agua subterránea de la región, y de acuerdo con ellas planear racionalmente su uso. Entre los aspectos relevantes se concluye que el Bolsón de Cedros es uno de los dos lugares donde es posible desarrollar, aunque en forma limitada, la agricultura convencional mediante el riego por bombeo en una superficie de entre 1000 y 1500 hectáreas. Finalmente se recomienda impulsar al máximo la explotación de sales industriales como el sulfato de sodio, carbonato de sodio y sales de potasio.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

El área de estudio queda comprendida, en su totalidad, dentro de la subprovincia Sierras Transversales que a su vez está comprendida en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental (E. Raisz, 1964).

La Sierra Madre Oriental es, fundamentalmente, un conjunto de sierras menores de estratos plegados. Estos estratos están constituidos por rocas sedimentarias marinas (cretácicas y del

Jurásico Superior) entre las que predominan las calizas, areniscas y rocas arcillosas, éstas últimas en forma menos abundante. Dentro del estado de Zacatecas la subprovincia Sierras Transversales tiene una extensión de 11,386 km² que representan el 14.71% de la superficie total de la entidad abarcando los municipios de Concepción del Oro, Melchor Ocampo, El Salvador y parte de Mazapil.

3.2. Clima

El clima de la región, de acuerdo con la carta de clasificación climática de INEGI escala 1:1000 000, varía de muy seco semicálido a seco semicálido, con lluvias en verano y menor proporción de lluvias en invierno.

Para el análisis climatológico se consideraron 16 estaciones: Agua Nueva, Parras, San Pedro, Viesca, Dos de Abril, Camacho (1), Cedros, Caopas, Concepción de la Norma, Gruñidora, Mazapil, San Rafael, San Tiburcio, Concepción del Oro, Camacho (2), y F. Pescador Cañitas.

De acuerdo con los registros de las estaciones, mediante el método de polígonos de Thiessen, se determinó que la temperatura media anual es de 13.1° C, con una máxima de 28°C, registrada en agosto, y una mínima de 2° C en enero. La temperatura promedio mensual mayor es la del mes de julio, con 16° C. Los meses más fríos son enero y febrero, con promedios de 6 y 7° C, respectivamente. La temperatura media anual máxima es la de la estación Viesca, con 18.74° C, para el período de observación mencionado, en tanto que la temperatura media anual mínima se registró en la estación F. Pescador Cañitas, donde el valor promedio obtenido fue de 5.7° C.

La precipitación media mensual máxima se registra en julio, donde se promedia una lámina de 51 mm. Las menores precipitaciones promedio corresponden a los meses de febrero y marzo, con registros de 6 y 4 mm, respectivamente. La mayor precipitación promedio anual es de 435 mm al año (estación Mazapil) y la mínima es de 115 mm, registrada en la estación Agua Nueva. La precipitación media anual de la subcuenca, de acuerdo a los polígonos de Thiessen, es de 350.8 mm.

La información de los registros de evaporación potencial de las estaciones climatológicas revela que su valor varía de 1810 a 1933 mm anuales, dependiendo de la elevación topográfica a la que éstas se ubican. El mayor valor corresponde al registrado en la estación Concepción del Oro y el menor en la estación Caopas. De acuerdo con los polígonos de Thiessen, la lámina media de evaporación potencial es de 1870.5 mm.

3.3. Hidrografía

El acuífero Cedros es una cuenca de forma irregular que pertenece a la Región Hidrológica 36 "Nazas Aguanaval", cuenca "Laguna de Mayrán y Viesca". La Laguna de Viesca guarda cierta similitud con la Laguna de Mayrán ya que cuenta con un alimentador principal, en el caso de la Laguna de Mayrán es el Río Nazas y en la Laguna de Viesca es el Río Aguanaval, el cual está

sujeto a importantes aprovechamientos, no así la Laguna de Mayrán que se encuentra en proceso avanzado de desecación.

El valle de Mazapil aporta importantes recursos hidráulicos en su salida, hacia el bolsón de Cedros. Las condiciones climáticas, topográficas y geológicas del valle de Mazapil, generan un escurrimiento superficial en el Arroyo Grande estimado de 16.5 millones de m³ anuales, a la altura donde desemboca al Bolsón de Cedros, donde desaparece físicamente al infiltrarse en las partes bajas.

La dirección de flujo superficial se encuentra controlada orográficamente desde las sierras altas, con elevaciones de 3000 m.s.n.m., hacia las partes más bajas, controlado por las pendientes suaves de los valles de Mazapil, Melchor Ocampo, El Jagüey, Santa Rosa y principalmente el de Cedros. Los cuatro primeros tienen una dirección preferencial este-oeste, conectándose al flujo principal del valle de Cedros que tiene una dirección sureste-noroeste. Aunado a él están los escurrimientos de San Rafael, al oeste, y al sur Sábana Grande, que en su totalidad desembocan fuera de los límites administrativos del acuífero Cedros, hacia el Bajío Los Llanos, cerca del poblado de Viesca, en el Estado de Coahuila. Los arroyos existentes son intermitentes, algunos de estos son: Escobillas, La Bolsa, Lagunilla y Grande.

Especialmente dentro del acuífero no se tienen obras hidráulicas importantes para el almacenamiento de las aguas pluviales, sólo se cuenta con algunas represas y bordos que satisfacen las necesidades básicas de la región: principalmente para uso de abrevadero y en ocasiones, debido a la escasez, para consumo humano.

3.4. Geomorfología

Gran parte de la morfología que se presenta en la cuenca es producto de patrones geológico estructurales resultantes de la tectónica compresiva y distensiva que han sufrido las rocas a lo largo de su historia geológica, de aquí que la mayoría de los cambios bruscos en la dirección de las principales corrientes de la cuenca se deben a grandes estructuras geológicas (fallas y fracturas) que siguen los ríos como zonas de debilidad. Estructuralmente, el acuífero Cedros presenta dos patrones de estructuras que originan fosas tectónicas, el primero orientado NW-SE que corresponde a la falla San Tiburcio, en la parte central del acuífero; el otro patrón son los lineamientos este-oeste marcados por los sinclinales y anticlinales que ocupan la porción este, los cuales aportan su flujo hacia el centro del acuífero.

El análisis hidromorfotectónico es la correlación de la dirección de lineamientos estructurales del drenaje con el esquema tectónico de la región, útiles para identificar las zonas de recarga y descarga. Los lineamientos principales de estructuras de ríos y arroyos tienen tendencias variadas de acuerdo con las estructuras localizadas. Esta tendencia de los patrones de estructuras formó un sistema de manera ortogonal principal E-W y NW-SE que induce y genera una dirección de flujo subterráneo preferencial hacia el NW, en dirección al Bajío El Llano.

4. GEOLOGÍA

La geología que cubre el área de estudio está compuesta por rocas sedimentarias tanto marinas como continentales, volcanosedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, y metamórficas; cuyo rango de edad varía del Triásico al Cuaternario (figura 2).

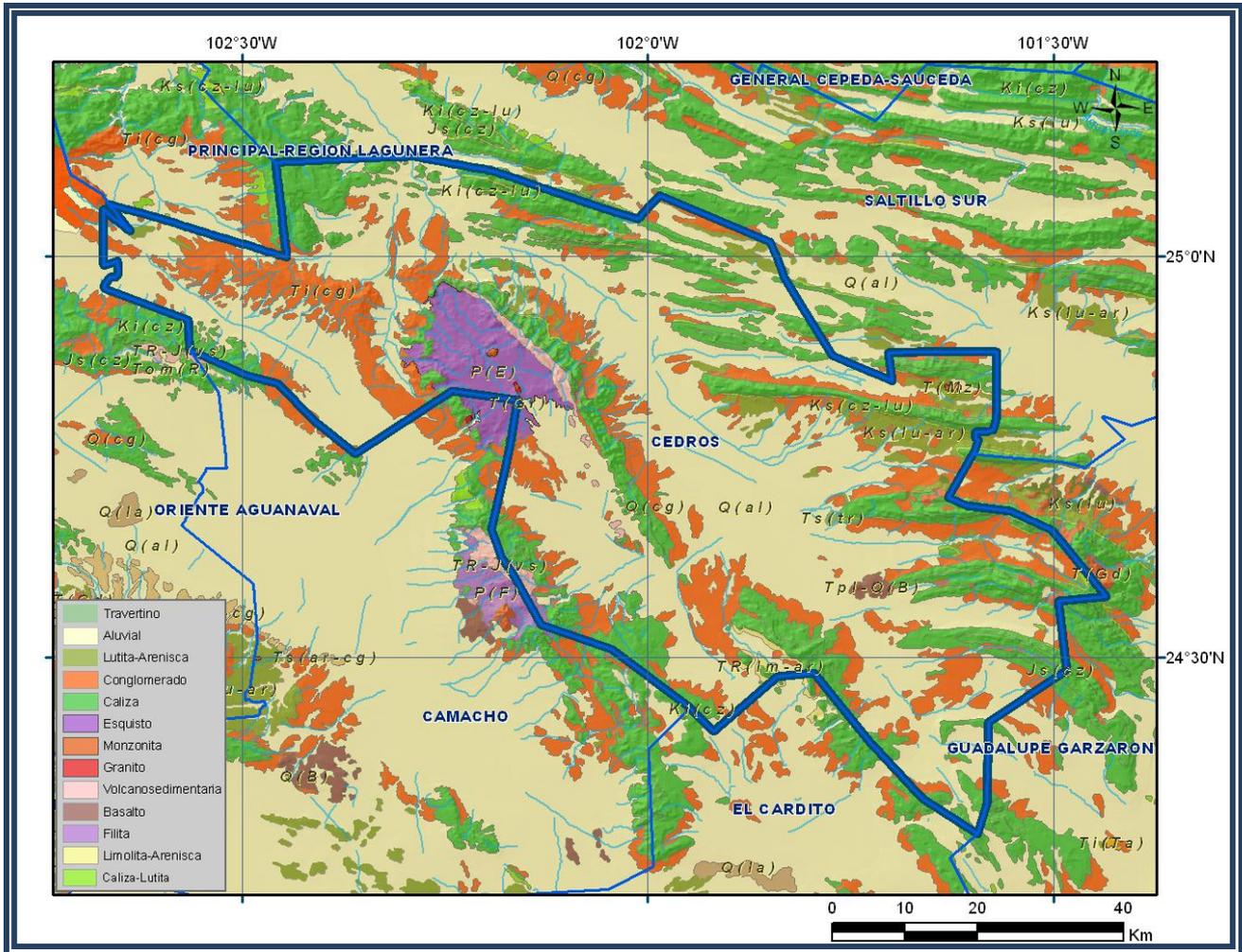


Figura 2. Mapa Geológico

4.1. Estratigrafía

A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en el área:

FORMACION NAZAS

Es la base de la columna, comprende una alternancia de rocas sedimentarias, constituida por limolitas, lutitas y areniscas; intercaladas con rocas volcánicas de composición ácida a intermedia representadas por riolitas, ignimbritas, dacitas, traquitas, andesitas y tobas; intrusivas por el granitoide milonitizado Caopas que presenta diferenciaciones a pórfido andesítico y foliación de aspecto esquistoso a gnéisico. Depositada al mismo tiempo, se encuentra una unidad volcanosedimentaria perteneciente a la misma Formación Nazas, de edad Triásico Superior al Jurásico Inferior, que aflora en la parte central-oeste del acuífero. La cima de esta formación se

encuentra en contacto discordante con el conglomerado La Joya.

CONGLOMERADO LA JOYA

Del Jurásico Medio, constituido básicamente por fragmentos derivados de la Formación Nazas, el cual sobreyace discordantemente a esta y subyace, también en discordancia, a las calizas con nerineas de la Formación Zuloaga.

FORMACION ZULOAGA

La caliza Zuloaga está conformada por calizas biógenas y dolomías en estratos delgados a gruesos, de colores que varían de gris claro a crema. En ocasiones presentan capas con clásticos angulares, así como estratos arcillosos. En algunas áreas aisladas, contiene zonas de dolomita criptocristalina. Su edad es Jurásico Superior, del Oxfordiano al Kimmeridgiano. Esta unidad contiene moluscos y fragmentos de coral. Descansa discordantemente sobre el conglomerado La Joya y a su vez subyace concordantemente a la Formación La Caja. Sus áreas de exposición se encuentran aflorando en la mayor parte del área de estudio, conformando el núcleo de los anticlinales.

FORMACION LA CAJA

Está compuesta por argilitas calcáreas, con intercalaciones de capas delgadas de pedernal negro hacia su porción media y superior. Contiene estratos delgados de caliza, lutitas, lutitas calcáreas y calizas arcillosas. También presenta concreciones de argilita y horizontes ricos en fosfato. Su edad es del Kimmeridgiano al Portlandiano; la abundancia de amonitas en esta formación sugiere un depósito de ambiente infranerítico.

FORMACION TARAISES

Está constituida por estratos delgados a medianos de calizas y por algunas capas de lutitas muy delgadas hacia la cima. Presenta un color que varía de gris claro a gris oscuro-azuloso y pardo. En la parte superior de esta unidad se presentan bandas y nódulos de pedernal color negro y crema. Estas rocas contienen pirita diseminada y en nódulos, que al oxidarse le dan a la roca una coloración que ocre amarillento a rojo ladrillo. La edad de la Formación Taraises es Cretácico Inferior, Berriasiano al Hauteriviano. Subyace concordantemente a la Formación Cupido y descansa de igual forma sobre la Formación La Caja.

FORMACION CUPIDO

Está constituida por calizas con estratificación mediana y gruesa, presentando una coloración en tonos de gris. Estas calizas contienen lentes y nódulos de pedernal más abundante que la Formación Taraises, cuyo contacto no es fácil distinguir por ser transicional, las concreciones de pirita son más abundantes y más grandes que en la unidad subyacente; en cambio, las intercalaciones de lutitas son muy escasas y se presentan en capas muy delgadas. Su depósito ocurrió durante el Hauteriviano Tardío al Aptiano Temprano, descansando concordantemente sobre sedimentos arcilloso-calcáreos (Formación Taraises) y subyaciendo de la misma manera a las calizas y lutitas de la Formación La Peña.

FORMACION La Peña

Morfológicamente se le puede observar en el terreno formando puertos, sobreyaciendo de manera

concordante y transicional a la Caliza Cupido, en cuya parte superior forma capas gruesas que continúan en la parte inferior de la Formación La Peña, y disminuyen en la parte media. Esta formación también se caracteriza por contener intercalaciones de capas delgadas de argilitas de coloración que varía de amarillenta a gris. Hacia la cima de esta unidad, disminuye de forma notable el espesor de los estratos de caliza y aumenta su naturaleza arcillosa hasta predominar cuantitativamente. Subyace transicional y concordantemente con la Formación Cuesta del Cura y hacia la parte norte de la zona acuífera se le observa en contacto con las calizas arrecifales de la Formación Aurora, la cual es correlacionable con el piso de la Formación Cuesta del Cura. Los fósiles que contiene esta formación son escasos y mal conservados, pero por su posición estratigráfica se le ha asignado una edad correspondiente al Aptiano.

FORMACION AURORA

Consta de calizas con estratificación mediana y gruesa, de color gris y gris oscuro, con intercalaciones de calizas laminares y delgadas bandas de pedernal. Hacia la cima de esta unidad, se presentan estratos gruesos de calizas conglomeráticas con los fragmentos más grandes hacia la base. Por su contenido faunístico y por sus características litológicas, se infiere que estas calizas se depositaron en un ambiente somero con facies arrecifales. La edad asignada a esta formación corresponde al Albiano Medio, definida con base en determinaciones paleontológicas y a su posición estratigráfica.

FORMACION CUESTA DEL CURA

Esta unidad consta de calizas con estratificación laminar, delgada y mediana, de color gris claro a negro, con intercalaciones de pedernal negro y algunas concreciones de pirita. La principal característica que distingue a esta formación es una estratificación ondulada y abundantes marcas de oleaje. El contenido de fósiles de esta unidad es escaso y se restringe a unas pocas amonitas. Su edad determinada con base en su posición estratigráfica corresponde al Albiano-Cenomaniano.

FORMACION INDIDURA

Está constituida por un paquete de calizas arcillosas y lutitas calcáreas con estratificación laminar y delgada, intercaladas con capas de calizas con estratificación que varía de delgada a gruesa, de color gris hasta parduzco. Hacia la cima se presentan lutitas de color gris oscuro muy fáciles de erosionar, por lo que tienden a formar ligeras depresiones en el terreno. Esta formación descansa de manera concordante sobre la Formación Cuesta del Cura, y contiene fósiles que le confieren una edad que data del Cretácico Superior, del Cenomaniano Tardío al Turoniano.

FORMACION CARACOL

Esta formación presenta ciertas variaciones, pero en general está constituida por un flysch de alternancia rítmica de grauvacas de grano fino a medio en estratos delgados a medianos, con intercalaciones de lutitas y de forma ocasional calizas de naturaleza lenticular. Su color varía de gris oscuro a casi negro con tintes verdosos, su contenido faunístico es en general muy pobre. Por su posición estratigráfica se le ha determinado una edad que comprende del Coniaciano hasta el Santoniano.

FORMACION AHUICHILA

Consiste en un conglomerado calizo de color rojo, compacto, cuya granulometría varía de fina a muy gruesa, con fragmentos de calizas, lutitas, filitas, esquistos y rocas volcánicas. Su edad corresponde al Eoceno y está asociada a las márgenes de bloques y fosas tectónicas.

DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS

Son materiales depositados en las partes bajas de las sierras durante el Neógeno y están constituidos principalmente por conglomerados polimícticos mal consolidados. Hacia los valles se depositaron materiales coluviales y aluviales, así como y depósitos lacustres y travertinos.

ROCAS IGNEAS

Las rocas ígneas intrusivas del Terciario son de naturaleza plutónica e hipabisal, formando stocks de dimensiones moderadamente grandes y pequeños, asimismo existen pórfidos riolíticos, diques, diquestratos y brechas.

4.2. Geología estructural

El área del acuífero Cedros se puede dividir en dos regiones principales que están marcadas por la tectónica y se evidencian por el lineamiento y posición de los afloramientos existentes. A la primera región pertenecen los sinclinales y anticlinales, localizados al oriente del acuífero, con ejes alineados en sentido este-oeste. La segunda zona se ubica en la porción occidental del acuífero y está integrada por los afloramientos de los sinclinales y anticlinales recumbentes. Estas dos regiones o márgenes están separadas por un lineamiento NW-SE que atraviesa el bolsón de Cedros.

Los sinclinales y anticlinales de la margen derecha forman las sierras y valles transversales en donde también se localiza el Valle de Mazapil, caracterizado por las rocas sedimentarias del Geosinclinal Mexicano. Estas rocas sedimentarias se encuentran cubiertas por depósitos aluvial cuyo espesor promedio es de 40 metros, el cual se incrementa hacia el oeste, internándose en el bolsón de Cedros. El aluvión se encuentra descansando sobre la Formación Caracol que se considera el basamento del acuífero granular. Las rocas sedimentarias se encuentran fracturadas y plegadas y presentan condiciones favorables para constituir acuíferos, hecho que se comprueba en las obras mineras. Esto es evidente también en las rocas aflorantes de la Sierra El Mascarón las cuales presentan manantiales que aportan agua al poblado Concepción del Oro.

Las rocas del Cretácico que están constituidas por calizas y rocas arcillosas correspondientes a las formaciones Cupido, La Peña, Zuloaga y Cuesta del Cura, las cuales se encuentran plegadas en anticlinales y sinclinales asimétricos, cortados en algunas partes por fallas orientadas NE-SW en la porción oriental del área.

Por otra parte, las rocas que se encuentran afectadas por cuerpos ígneos intrusivos de composición pórfido andesítico, han sido deformadas, fracturadas y alteradas. Estas rocas se localizan en la parte occidental del área, acompañadas de rocas metamórficas compuestas de metagranitos (Caopas) y metavolcánicos (Nazas-Rodeo) de edad Triásico Medio.

4.3. Geología del subsuelo

Tanto en la porción oriental como en la occidental del acuífero existe una serie de sinclinales y anticlinales, cuyo eje tiene un rumbo este-oeste y noroeste-sureste, respectivamente, los cuales forman las sierras y valles transversales; uno de estos valles es el de Mazapil. En los valles, a profundidad, las rocas sedimentarias que constituyen estas estructuras se encuentran cubiertas por un material aluvial con espesores aproximados de algunos metros hasta 400 m que han alcanzado las perforaciones exploratorias, aumentado gradualmente desde los flancos de las sierras hacia el centro del bolsón Cedros, donde se presentan, los mayores espesores. Estas rocas sedimentarias se encuentran fracturadas y plegadas, almacenan y transmiten el agua, constituyendo una unidad hidrogeológica susceptible de ser explotada, como lo han demostrado los trabajos de exploración y de explotación de algunas minas.

Las principales zonas de recarga al acuífero se encuentran los valles que tienen dirección este – oeste, mismos que reciben la aportación de agua subterránea de las sierras que los delimitan y la transmiten al bolsón de Cedros. En uno de ellos es el valle de Mazapil que presenta un espesor granular promedio de 35 m, depositado sobre las rocas Calizas de la Formación Caracol. Esta unidad rocosa presenta una serie de fallas y fracturas que propician una infiltración profunda, que recarga a las unidades que se encuentran a mayores profundidades. Sin duda, este mismo comportamiento debe presentarse en los demás valles, pues su génesis es la misma.

Hacia el centro y norte predominan los sedimentos limo-arcilloso y gravillas con escasa arena, empacados en material limo-arcilloso. Las secciones descritas en la zona del valle de Mazapil, muestran un incremento en el espesor del acuífero granular de este a oeste. Este es el acuífero actualmente en explotación, el cual tiene como fronteras laterales y basamento a las rocas calcáreo-arcillosas de las formaciones Indidura, Caracol y el conglomerado Ahuichila, que funcionan como barreras al flujo del agua subterránea.

Existe otro acuífero alojado en rocas calizas fracturadas, que se explota al este del poblado de Mazapil, en las inmediaciones de Salaverna en donde el espesor aluvial es muy pequeño. Su presencia también es evidente en los barrenos y pozos exploratorios perforados como parte del proyecto minero Peñasquito.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

La mayor superficie del área está constituida por sedimentos fluvio-aluviales donde se desarrolla la actividad agrícola principal. El sistema acuífero está compuesto por dos tipos medios: el granular constituido por sedimentos no consolidados y las rocas fisuradas que se encuentran debajo de él.

Los acuíferos descritos constituyen un sistema hidráulico compuesto por una unidad formada por

depósitos aluviales y un conglomerado semiconsolidado, ubicado en la zona próxima a la superficie, que constituyen un acuífero de **tipo libre**, que recibe recarga local de las zonas adyacentes, procedente de los valles de San Rafael, Sabana Grande, Santa Rosa, Mazapil, El Jagüey y Matamoros; y una unidad regional, de amplia extensión, de espesor y composición variable, alojado en rocas sedimentarias fisuradas.

El acuífero se extiende en todo el valle principal y sus adyacentes, por lo que presenta muy poca variabilidad en cuanto a espesor, textura, y permeabilidad vertical y horizontal.

La recarga que recibe el acuífero tiene su origen en la precipitación que tiene lugar en las sierras, lomeríos y pie de monte, formando corrientes torrenciales, que al llegar al contacto con los materiales granulares una parte se infiltra, recargando el acuífero, y otra parte escurre para formar pequeñas lagunas. Existen además entradas por flujo vertical provenientes de la infiltración de la precipitación sobre la superficie del acuífero. La descarga se realiza de manera artificial por bombeo, y de forma natural por salidas horizontales y por flujo vertical hacia el acuífero profundo, por medio de fallas y fracturas.

5.2. Parámetros hidráulicos

La determinación de los parámetros hidráulicos del subsuelo se obtuvo a partir de la interpretación de 5 pruebas de bombeo de corta duración ejecutadas en el valle de Mazapil, efectuadas durante la realización del estudio llevado a cabo por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos, en el 2007. En el estudio realizado por *M3 Mexicana S. de R. L. de C. V.* (2004), también se ejecutaron pruebas de bombeo, sin embargo se considera que los coeficientes de K son altos para la zona de salidas subterráneas. La tabla 2 presenta los resultados de las pruebas de bombeo.

Las pruebas permitieron conocer que la transmisividad en la zona varía de $6.23 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ a $2.67 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. El valor promedio fue de $1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de bombeo realizadas (IDEAS 2007)

No. DE POZO	COORD. UTM (WGS84)		ELEV. (msnm)	PROF. TOTAL (m)	GASTO (l/s)		N. E (m)	N. D. (m)	ABAT. (m)	T (m ² /s)	K (m/s)	C. A.
	X	Y			MAX.	OPTIMO						
DW-1	229373	2728874	1965.65	200.83	63	63	56.4	111	54.88	2.67E-03	1.83E-05	3.53E-04
DW-2	229715	2728181	1962.18	201.18	37	37	52.3	152	99.95	7.73E-04	5.18E-06	6.79E-05
DW-4	229829	2727719	1963.6	200.32	37	37	53	148	94.86	5.80E-04	3.93E-06	7.69E-05
DW-5	229045	2728011	1945	200.51	2.2	2.2	43.9	161	117.42	6.23E-05	4.23E-07	8.26E-06
DW-6	230374	2727259	1967	200.09	58	58	81.1	143	62.23	1.82E-03	1.24E-05	7.28E-04

No fue posible realizar una estimación del coeficiente de almacenamiento, debido a que la corta duración de las pruebas y los bajos caudales de extracción no permitieron el registro de abatimientos en los aprovechamientos más cercanos. Por esta razón, considerando el tipo y características de los materiales que constituyen el subsuelo de la región, se adoptó un valor de 0.1, el cual es consistente con los valores reportados para los acuíferos libres.

5.3. Piezometría

Para la descripción del comportamiento de los niveles piezométricos, se cuenta con información de los niveles estáticos recabada durante la realización de los estudios hidrogeológicos realizados en 2004, 2006 y 2007; de este último se registró la profundidad al nivel estático en 124 aprovechamientos.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para el 2007 varía entre 0 y 130 m. El valor promedio en las mediciones es de 31 m y la mediana es de 28 m. Las mayores profundidades se encuentran en la porción centro-occidental, al pie de las sierras. Los niveles someros se localizan hacia el centro de los valles, y en los cauces de ríos y arroyos (figura 3).

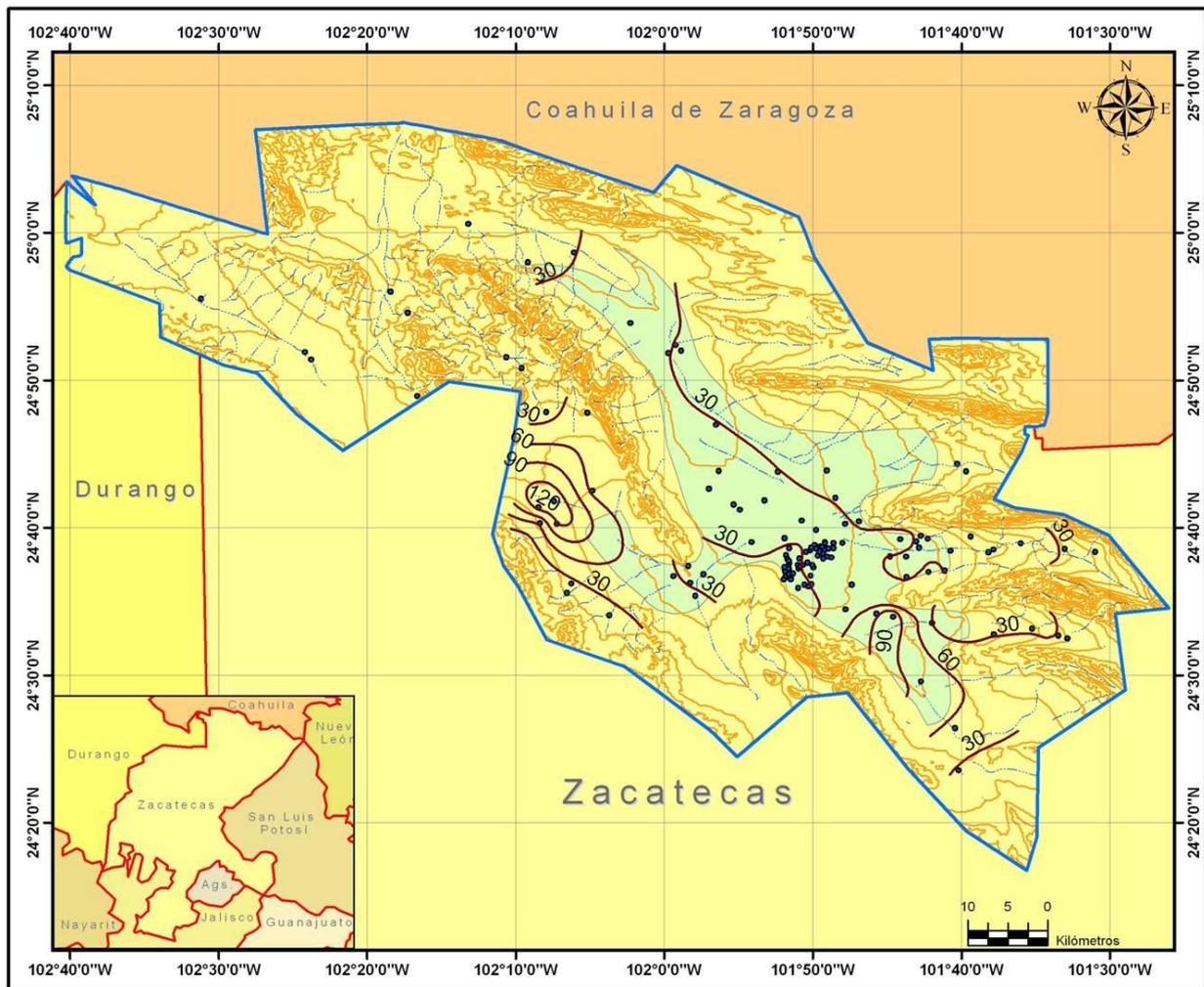


Figura 3. Profundidad al nivel estático -manantiales- en m (2007)

5.4.2 Elevación del nivel estático

En lo que se refiere a la elevación del nivel estático, los valores varían de los 2390 msnm, que se registran en la porción este del acuífero, en el valle de Mazapil, hasta los 1350 msnm, que se presentan en la porción norte y noroeste del acuífero, identificando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo, en sentido sureste-noroeste.

El agua subterránea fluye desde los pequeños valles intermontanos de las sierras circundantes, hacia la parte central del valle, con un rumbo preferencial de este a oeste, y de oeste a este. A partir del valle central, el agua fluye con dirección preferencial hacia el noroeste, hasta su descarga a la cuenca de las lagunas Mayrán y Viesca, en el estado de Coahuila. En este mismo extremo noroeste, se identifica una zona cuyo flujo subterráneo es independiente del de la porción central, desembocando hacia la cuenca del río Aguanaval, en el estado de Coahuila (figura 4).

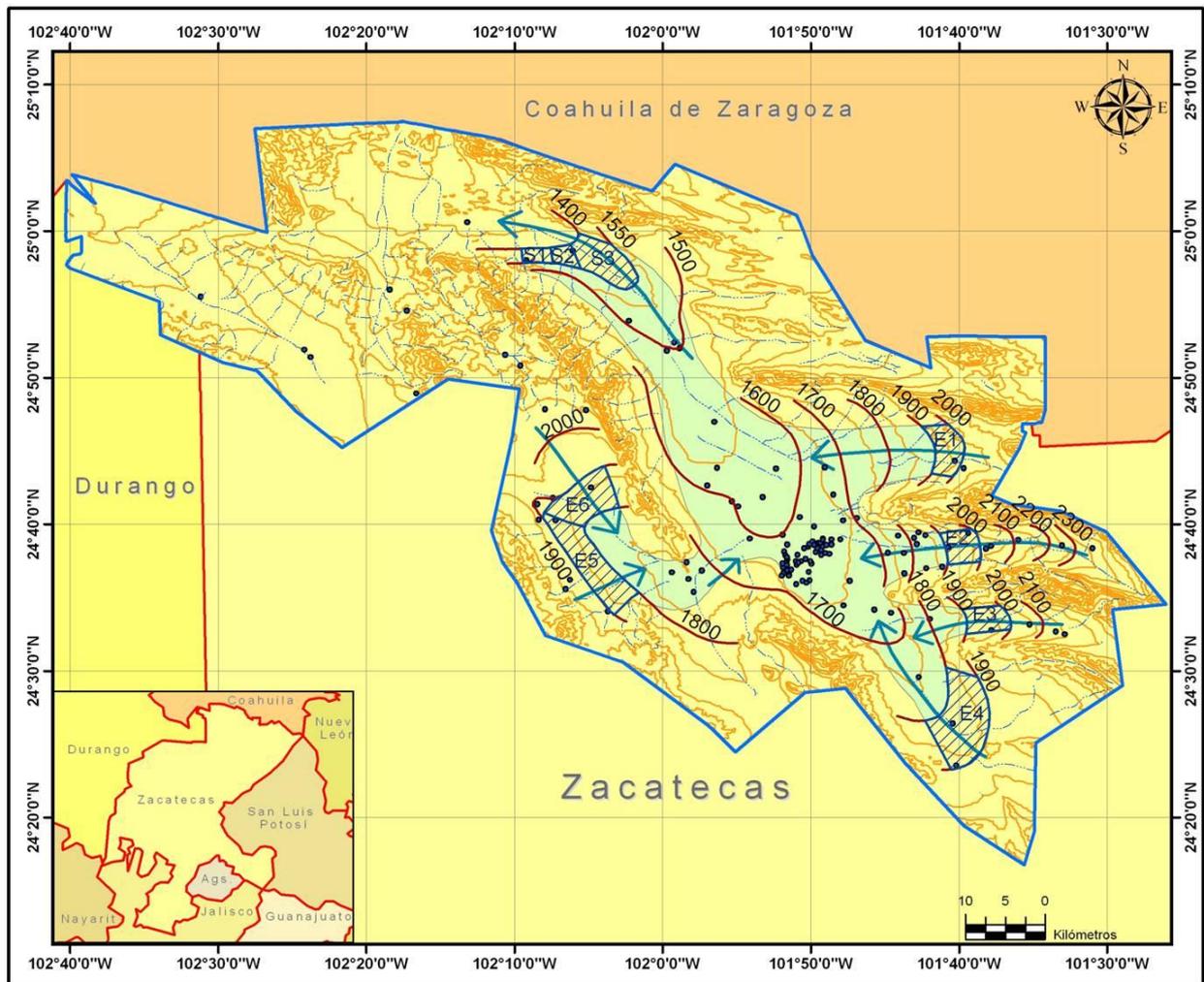


Figura 4. Elevación del nivel estático (msnm) y dirección de flujo subterráneo, 2007

5.4.3 Evolución del nivel estático

El análisis de la evolución de los niveles estáticos se realizó para el periodo 2004–2007. Se observa que las recuperaciones se registran en la parte central y oriental del acuífero, siendo su

valor máximo de 7.7 m, para dicho periodo. Los abatimientos se manifiestan en la parte centro-noroeste y suroeste del acuífero, con un valor máximo de 3.8 m. El valor promedio de evolución para el periodo de 3 años representa una recuperación de 0.11 m, con un valor anual de 0.037 m. Esto indica que la posición de los niveles del agua subterránea no muestra variaciones significativas, por lo que el acuífero se encuentra en equilibrio geohidrológico (figura 5).

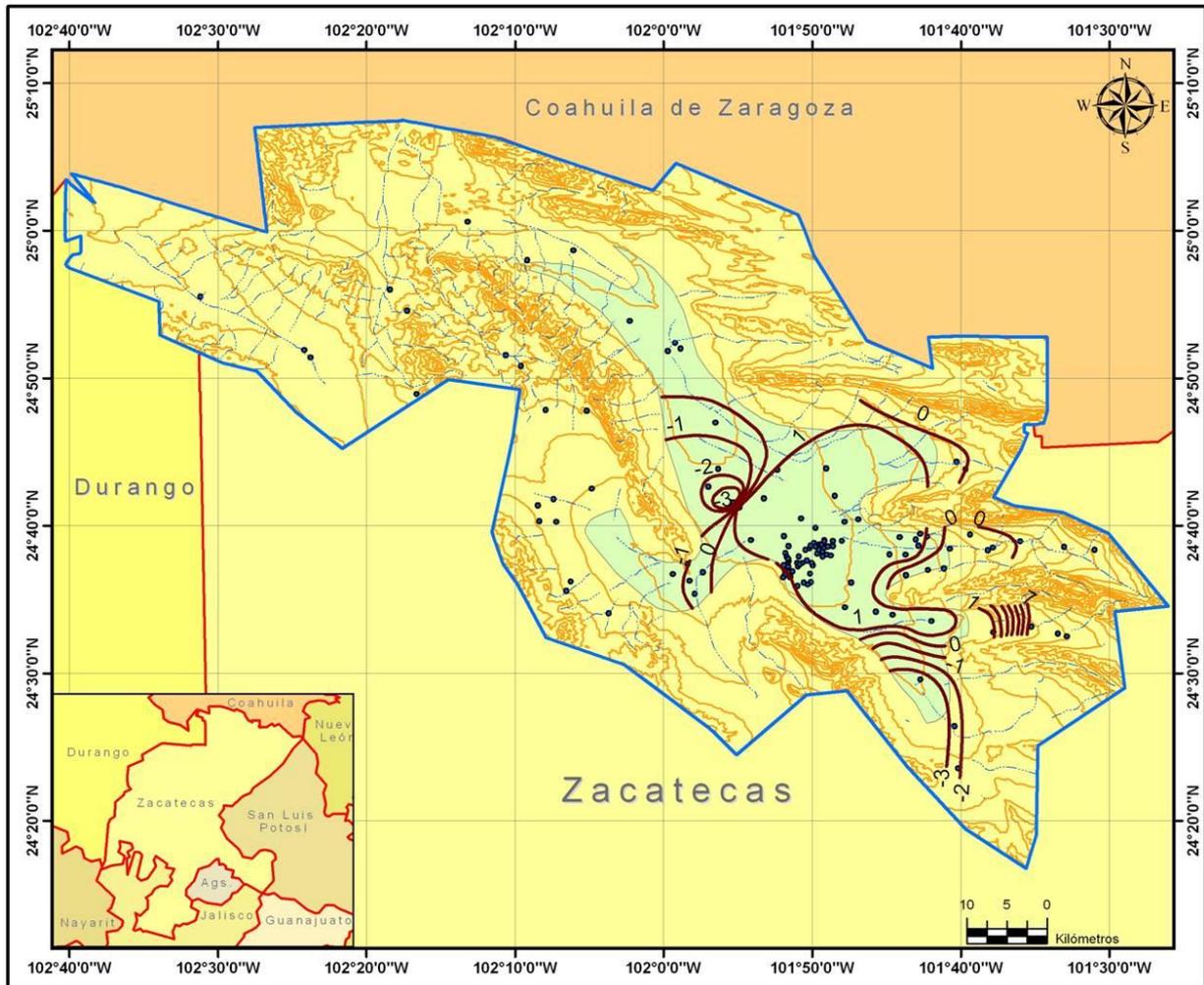


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2004-2007)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Del estudio geohidrológico realizado en el 2004 se recolectó un total de 25 muestras para análisis fisicoquímicos entre los meses de agosto y septiembre.

Para el Acuífero Cedros, el rango del pH se mantiene ligeramente por encima de la neutralidad, lo que indica que en general, para toda el área de estudio el agua es ligeramente alcalina, es decir, la presencia de carbonatos muestra un claro predominio sobre el contenido de sulfatos. Los aprovechamientos que se detectaron con pH fuera del rango establecido por la NOM son un pozo localizado en La Lagunilla con pH de 8.71 y en un tiro de mina ubicado en la localidad El Peñasco, donde el agua es muy ácida (pH = 3.45), en parte debido a la ausencia de carbonatos.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) en la mayoría de los aprovechamientos

muestreados varía de 340 a 970 ppm, asociada directamente a la conductividad eléctrica medida en campo, cuyos rengos oscilan entre 491 y 1784 μ S/cm (figura 6). Del total de muestras, 8 presentaron valores de STD superiores a las 1000 ppm, con valores que varían de 1020 a 2765 ppm, con los valores más altos registrados en dos pozos y en un tiro de mina, ubicados en los poblados de La Pendencia, Nuevo Tampico, y El Peñasco respectivamente.

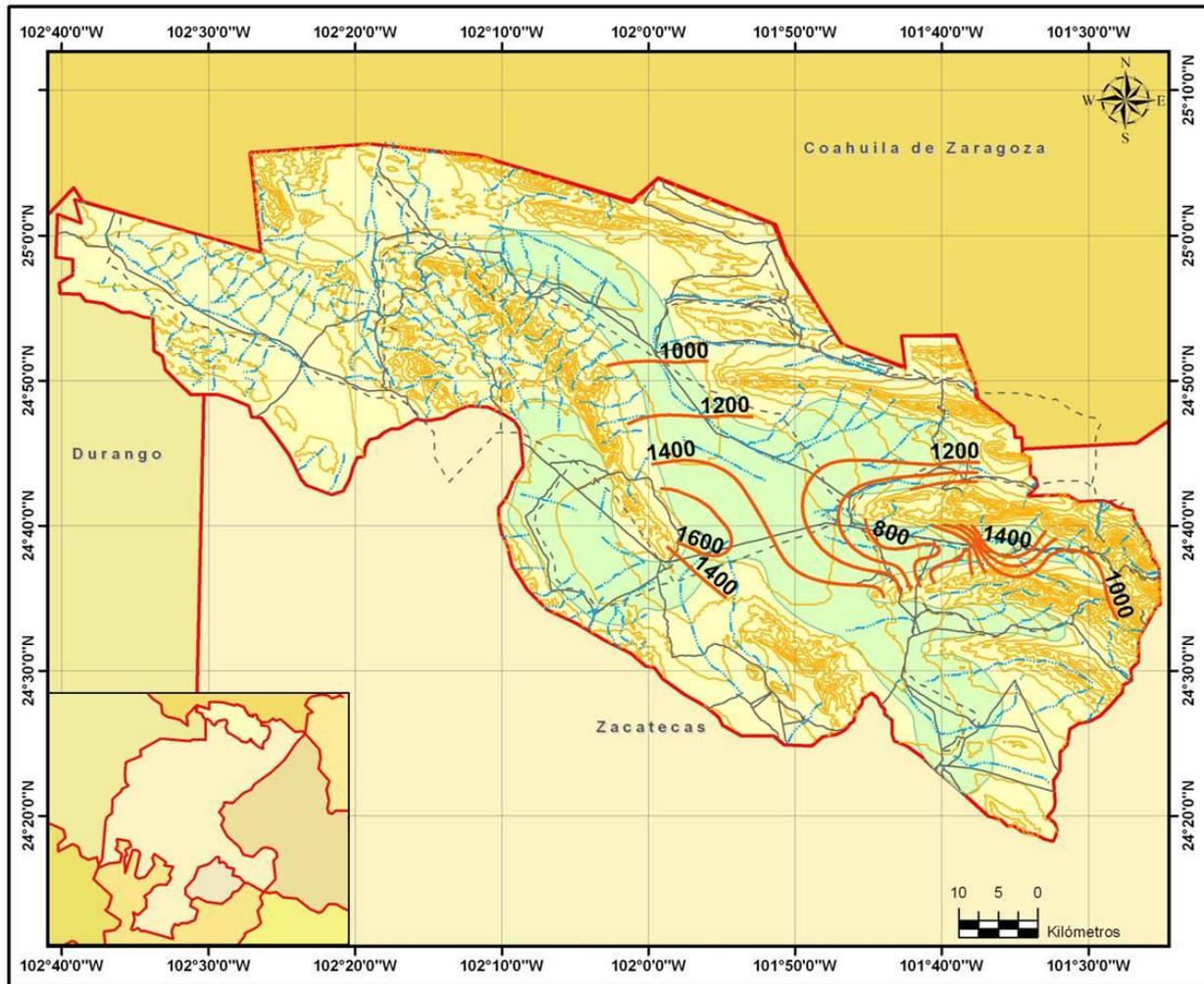


Figura 6. Conductividad eléctrica en el acuífero

En lo que se refiere a la dureza total, el agua se puede clasificar como muy dura ya que el 77% de los aprovechamientos presentaron concentraciones mayores a los 200 ppm. En general los valores varían de 27 ppm a 1162 ppm. Esta dureza se puede atribuir a las rocas con carbonatos de calcio, principalmente calizas y dolomías, y sedimentos que aportan los iones de calcio y magnesio. Los aprovechamientos con concentraciones que superan la norma corresponden a las localidades de La Mejorada, El Vergel, San Antonio de Portezuelos, El Jagüey y Nuevo Tampico, con valores de 530, 584, 870, 941 y 1162 ppm respectivamente, localizados al este y oeste del área de estudio.

Respecto a los iones mayoritarios, los pozos con valores por arriba del límite máximo permisible de concentración de sodio de 200 ppm, establecido por la NOM son: el pozo ubicado entre Matamoros y San Miguel con 242 ppm, dos pozos localizados en La Pendencia y Nuevo Tampico

con 323 ppm cada uno. Las demás concentraciones varían de 15 a 148 ppm. Las mayores concentraciones se localizan al noroeste y centro del acuífero.

En general en el acuífero Cedros las concentraciones de calcio son bajas, pues oscilan entre 5 y 249 ppm. Los valores no aptos para consumo humano se localizan en dos pozos ubicados en las poblaciones de El Jagüey y Nuevo Tampico con 361 y 443 ppm, respectivamente. Las mayores concentraciones se localizan en la parte noroeste y sureste del acuífero Cedros.

En lo relativo al ión Magnesio, la concentración en los aprovechamientos muestreados varía de 2 a 60 ppm. Se observa que al igual que en el ión calcio las líneas de isovalores de mayor concentración se localizan al este del área de estudio entre los poblados de El Jagüey, Mazapil y La Mejorada, así como también en la porción centro sur, en el poblado San Rafael.

Los aprovechamientos con concentraciones de potasio mayores de 10 ppm, pertenecen a las localidades de Palmas Grandes, El Jagüey, San Antonio de Portezuelos, Las Mesas, El Vergel, el pozo ubicado entre Matamoros y San Míguelo, Nuevo Tampico y La Pendencia; con valores de 12, 13, 14, 18, 21, 31, 40 y 40 ppm respectivamente. Las mayores concentraciones se localizan al noreste y al centro del acuífero.

Respecto al Cloruro, la NOM establece un límite máximo permisible de 250 ppm para el agua destinada al consumo humano. Los valores máximos corresponden a dos muestras con valores de 263 ppm. Las mayores concentraciones se encuentran al noroeste del área de estudio en los poblados de Nuevo Tampico y La Pendencia; y en el centro en el poblado El Vergel y cerca de Matamoros. El resto de las concentraciones de cloruro varían 13 a 197 ppm.

Para el ión sulfato, se obtuvieron ocho muestras con concentraciones anómalas de sulfatos, según el límite máximo permisible establecido por la NOM para el agua potable, que es de 400 ppm. La muestra de mayor concentración, 1885 ppm, pertenece a un tiro minero ubicado en el poblado El Peñasco, seguida de un pozo ubicado en la localidad Nuevo Tampico, con un valor de 1083 ppm. En los demás aprovechamientos con valores anómalos, las concentraciones son de 719, 598, 577, 483, 455 y 441 ppm, y se localizan en los poblados de El Jagüey, San Antonio de Portezuelos, La Pendencia, El Vergel y La Mejorada, respectivamente, al noroeste y este del acuífero.

Para el caso del ión bicarbonato, las concentraciones oscilan entre 0 y 496 ppm. Las concentraciones mayores a 400 ppm se encuentran en los aprovechamientos de los poblados Rosario, San Rafael, El Tecolote, Tanque Gallego y Los Indios, localizados de manera dispersa en el área de estudio, con valores de 410 a 496 ppm.

Las concentraciones de nitrato (en términos de nitrógeno), varían de 0 a 9 ppm, valores que se encuentran dentro del límite máximo permisible establecido por la NOM de 10 ppm para el agua potable. Las mayores concentraciones se localizan hacia el poblado Nuevo Tampico, con una tendencia a disminuir hacia el oeste.

Las familias del agua predominantes, de acuerdo con los diagramas Piper y de Stiff, son las siguientes: Bicarbonatada cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$); Sulfatada cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$); Bicarbonatada mixta

(HCO₃-mixta); Sulfatada sódica (SO₄-Na); Sulfatada mixta (SO₄-mixta) y Bicarbonatada sódica (HCO₃-Na).

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Durante la actualización del censo de captaciones realizada en el 2007 se identificaron un total de 158 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 102 corresponden a pozos, 53 son norias y 3 manantiales. La profundidad total de los aprovechamientos varía entre 6 y 300 m. Las obras más comunes son los pozos someros y las norias excavadas manualmente. Los diámetros de descarga varían entre 1 y 10 pulgadas, predominando los diámetros menores a 2" en un 85% (se incluyen los aprovechamientos sin equipo).

De los 158 aprovechamientos censados, 58 están inactivos por carecer de equipo, relocalización o abandono por la mala calidad del agua. En la tabla 3, se muestra la distribución por uso del agua subterránea extraída.

Tabla 3. Distribución de los aprovechamientos y volumen de extracción por uso

Uso	Número de obras	Volumen (hm ³ /año)	Porcentaje
Pecuario	35	1.2	16.6
Agrícola	25	2.7	37.5
Público-Urbano	19	1.1	15.3
Doméstico-abrevadero	17	0.1	1.4
Industrial y servicios	4	2.1	29.2
Total	100	7.2	100

En total el volumen de extracción asciende a **7.2 hm³/año**, de los cuales 2.7 hm³/año (37.5%) se utilizan en agricultura, 1.2 (16.6%) para uso pecuario, 1.1 (15.3%) para abastecimiento de agua potable, 0.1 (1.4%) para uso doméstico-abrevadero, y los 2.1 hm³/año restantes (29.2%) para usos industrial (minería) y de servicios.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 se expresa como:

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

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

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

El balance de aguas subterráneas se realizó en un área aproximada de 902 km², que corresponde a la porción del acuífero granular en la que existe información hidrogeológica para su evaluación.

La ecuación de balance para este acuífero considerando todos los parámetros es:

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

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Eh= Entradas por flujo horizontal;

B= Bombeo;

Sh= Salidas por flujo horizontal;

Dnp= Descarga natural profunda;

ΔV(S)= Cambio en el volumen almacenado;

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero Cedros, las entradas están integradas por la recarga vertical (Rv) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos, y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

La recarga incidental o inducida (Ri) es la que se origina por la infiltración del agua que se destina a las actividades agrícolas y a la infiltración de las fugas en las redes de abastecimiento de agua potable o del drenaje. Para este acuífero esta componente es despreciable debido a que la zona agrícola es pequeña y sólo utiliza 2.7 hm³ anuales y a que no existen centros de población importantes. Por lo que **Ri = 0**.

Para la evapotranspiración (ETR), debido a que las profundidades al nivel estático más someras en el acuífero se encuentran a más de 10 m, como se muestra en la figura 3, no existen salidas por evapotranspiración. Por lo que **ETR = 0**.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

El valor de la recarga vertical por lluvia se estimó a partir de un **balance hidrometeorológico**, de este balance se determinó el volumen susceptible de infiltrarse mediante la siguiente expresión:

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración} - \text{Escorrimento}$$

Para realizar el balance hidrometeorológico se requiere conocer, entre otros parámetros, los volúmenes de escurrimiento que se presentan por lluvia dentro del área de estudio, es decir, el volumen de agua que se genera en la misma cuenca.

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se puede utilizar el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, del 17 de abril de 2002, que señala que en caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento.

El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento. El coeficiente de escurrimiento (C_e) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo.

Con la finalidad de obtener un valor de K representativo de la realidad, en lugar de asignar un valor de K único para todo el acuífero, se dividió el acuífero en dos zonas, de acuerdo con las características de permeabilidad de los materiales geológicos que afloran y con la cobertura vegetal. De esta manera, se obtuvieron las áreas para cada una de ellas y se calculó K como un promedio ponderado.

En la zona 1, las unidades cubren una superficie de 4009 km² (78.5 % de la superficie del acuífero). En esta superficie domina el matorral desértico, por lo que se considera un porcentaje de menos del 50 de suelo cubierto por pastizales. Con esta información, para suelos tipo B, el valor de $K= 0.28$

En la zona 2 (resto del acuífero), que tiene una superficie de 1099 km² (21.5%), los materiales fueron clasificados como suelos tipo C, en los que predomina el matorral desértico, con cobertura de pastizal menor al 50 %. El valor de K para esta superficie es de 0.30.

De esta manera, el valor de K ponderado por área es: $K = 0.28 (0.215) + 0.30 (0.785) = 0.2957$

Este valor se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento:

$$C_e = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$$

Donde:

C_e = Coeficiente de escurrimiento [1];

K = Conductividad hidráulica [m/s];

P = Precipitación media anual [mm];

De acuerdo a la información anterior se obtiene un coeficiente de escurrimiento de $C_e = 0.1120$.

El volumen de escurrimiento resultó de 200.8 hm³/año al multiplicar el coeficiente de escurrimiento por el volumen precipitado en el área de estudio, el cual es de aproximadamente 1791.9 hm³/año, valor obtenido en un área de 5108 km², y una lámina de lluvia promedio de 350.8 mm/año.

Por otra parte, para estimar el valor de la evapotranspiración (ETR) se utilizó la fórmula empírica de Coutagne, la cual establece lo siguiente:

Fórmula de COUTAGNE:

$$ETR = P - \chi P^2$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real en metros/año
 P = Precipitación en metros/año (¡unidades : metros/año!)
 $\chi = \frac{1}{0,8 + 0,14 t}$
 t = temperatura media anual en °C

La fórmula solo es válida para valores de P (en metros/año) comprendidos entre $\frac{1}{8\chi}$ y $\frac{1}{2\chi}$

La precipitación promedio anual en toda el área del acuífero es de 350.8 mm/año; esta lámina de lluvia proporciona un volumen total precipitado de 1,919.6 hm³/año. La temperatura promedio anual es de 13.1 °C, valores que sustituidos en la ecuación de Coutagne para calcular la evapotranspiración, arrojan un valor de 304 mm/año, que multiplicado por el área total resulta un volumen evapotranspirado de 1552.8 hm³/año.

Si se sustituyen los valores antes calculados, tanto de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento en la ecuación que se planteó anteriormente para obtener el volumen infiltrado que recarga verticalmente al acuífero, se tiene:

$$\text{Infiltración} = 1791.9 - 1552.8 - 200.8 = 38.3$$

El resumen del cálculo se muestra en la tabla 4. Al dividir este volumen anual promedio infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.021.

Tabla 4. Balance hidrometeorológico

	hm ³ /año	%
Volumen llovido	1791.9	100
Volumen evapotranspirado	1552.8	86.7
Escurrimiento superficial	200.8	11.2
Infiltración	38.3	2.1

Al aplicar el coeficiente de infiltración al área de balance de 902 km², que sólo incluye la porción del valle, sin considerar el área donde fueron evaluadas la entradas subterráneas, se obtiene un volumen de recarga vertical de **Rv = 18.9 hm³**.

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

El cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático del año 2007 (figura 4), mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

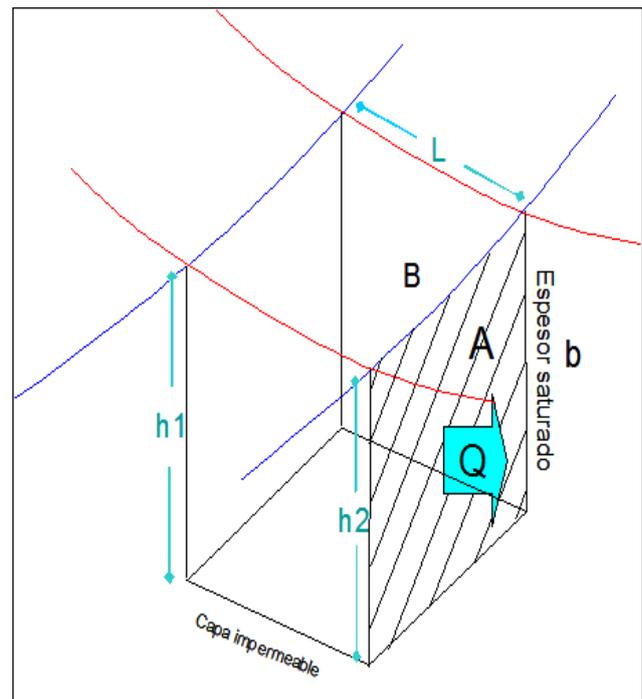
Donde:

Q = Gasto;

T = Transmisividad;

B = Longitud de la celda;

i = Gradiente hidráulico;



Partiendo de esta configuración se seleccionó un canal de flujo para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas (tabla 5). Las celdas de flujo consideradas se muestran en la figura 4.

Tabla 5. Celdas de entrada horizontal

No de Celda	B (m)	b (m)	dh (m)	dl (m)	K (m/s)	T (m ² /s)	i = dh/dl	Q (m ³ /s)	Q (hm ³ /año)
E1	6784	40	100	3188	8.05E-06	3.22E-04	0.031367629	6.85E-02	2.2
E2	4186	50	100	3870	8.05E-06	4.03E-04	0.025839793	4.35E-02	1.4
E3	3138	40	100	4785	8.05E-06	3.22E-04	0.020898642	2.11E-02	0.7
E4	10953	40	100	5660	8.05E-06	3.22E-04	0.017667845	6.23E-02	2
E5	13906	200	100	3330	8.05E-06	1.61E-03	0.03003003	6.72E-01	21.2
E6	7887	200	100	4911	8.05E-06	1.61E-03	0.020362452	2.59E-01	8.1
TOTAL									35.6

De esta manera, el valor de las entradas por flujo subterráneo, asciende a **35.6 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) y por una descarga natural profunda (Dnp).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **7.2 hm³/año**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de las salidas subterráneas se realizó de la misma manera que las entradas subterráneas, utilizando el plano de elevación del nivel estático (figura 4), aplicando la Ley de Darcy para las celdas de flujo identificadas. El detalle del cálculo por celda se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Celdas de salida horizontal subterránea

No de Celda	B (m)	b (m)	dh (m)	dl (m)	K (m/s)	T (m ² /s)	i = dh/dl	Q (m ³ /s)	Q (hm ³ /año)
S1	3378	200	100	1818	8.05E-06	1.61E-03	0.055005501	2.99E-01	9.4
S2	2695	130	100	2416	8.05E-06	1.05E-03	0.041390728	1.17E-01	3.7
S3	4419	150	100	8156	8.05E-06	1.21E-03	0.012260912	6.54E-02	2.1
TOTAL									15.2

Los resultados indican que el volumen total de salidas subterráneas asciende a **15.2 hm³/año**.

7.2.3. Descarga natural profunda (Dnp)

Debido a que existe una componente de salida del balance que no puede ser evaluada, la descarga natural profunda (Dnp), ésta será despejada de la ecuación de balance (1), de esta manera se obtiene lo siguiente:

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

Este tipo de descarga natural se produce en la zona a través de las estribaciones de los flancos montañosos que conforman los pie de montes que alimentan directamente desde las zonas de recarga al acuífero profundo constituido por rocas calizas, por medio de las fallas y fracturas, teniendo como fuentes de alimentación tanto a la lluvia como a los escurrimientos que se producen a lo largo de los arroyos. Se considera una descarga porque, a pesar de que recarga al acuífero granular, cuyo volumen se estima como Eh, la otra parte sale de él y recarga a las unidades hidrogeológicas subyacentes.

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

El registro de profundidad al nivel estático para el periodo 2004-2007 muestra abatimientos y recuperaciones locales. El volumen de cambio de almacenamiento anual se consideró con un valor de coeficiente de almacenamiento de 0.1 (CONAGUA, 1994), como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Cambio de almacenamiento

Evolución (m)	Valor medio (m)	Area (Km ²)	S	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-4 a -3	-3.5	29.1	0.1	-10.2
-3 a -2	-2.5	23.6	0.1	-5.9
-2 a -1	-1.5	72.9	0.1	-10.9
-1 a 0	-0.5	93.6	0.1	-4.7
0 a 1	0.5	48.7	0.1	2.4
1 a 2	1.5	355.4	0.1	53.3

Total para el periodo 2004-2007 = 24.0

Promedio anual = 8.0

El volumen de cambio de almacenamiento promedio anual es de $(\Delta V(S)) = 8.0 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Solución a la ecuación de balance

Una vez obtenidos todos los términos de la ecuación de balance, se calculó el valor de la descarga natural profunda (Dnp) mediante la expresión (2) como se muestra a continuación:

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

$$Dnp = 18.9 + 35.6 + 8.0 - 7.2 - 15.2$$

$$Dnp = 40.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales.}$$

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

$$Rt = Eh + Rv$$

$$Rt = 35.6 + 18.9$$

$$Rt = 54.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

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 (Rt) que recibe el acuífero es la suma de todas las entradas al sistema, para este caso su valor corresponde a la suma de las entradas subterráneas horizontales (35.6 hm³/año), y la recarga vertical (18.9 hm³/año). Por lo tanto, su valor es de **54.5 hm³/año**.

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 del acuífero Cedros, la única descarga natural que se presenta es por flujo subterráneo hacia el vecino acuífero de Saltillo Sur, en el estado de Coahuila. Sin embargo, el límite entre estos acuíferos se localiza a más de 15 km de distancia y no existen aprovechamientos en ambos lados. Por esta razón, adoptando un criterio de equidad, se considera que de los 15.2 hm³ de salidas subterráneas el 50% puede ser aprovechado en el acuífero Cedros y el 50 % restante se debe mantener como flujo de recarga hacia Coahuila. Esto garantiza el abastecimiento de las necesidades de las comunidades rurales asentadas en esta región.

Por lo tanto, el valor de **DNCOM = 7.6 hm³ anuales**.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

De acuerdo a la información reportada en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), el volumen concesionado de aguas subterráneas para el **30 de septiembre de 2008 en este acuífero es de 6'553,329 m³/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 (3), 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 REPDA.

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad (3)}$$

$$DAS = 54.5 - 7.6 - 6.553329$$

$$\mathbf{DAS = 40.346371 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Los resultados indican que el acuífero Cedros tiene una disponibilidad media anual de **40'346,671 m³/año** de agua subterránea para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Informe general del estado de Zacatecas, 1974. Para S.A.R.H.

Estudio Geohidrológico, 1980. Elaborado por: Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos (EGEOCISA), en el Estado de Zacatecas para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en la Zona de Guadalupe Garzarón.

Estudio de Prospección Geohidrológica y Exploración Geofísica en las Zonas Marginadas del Estado de Zacatecas, 1990. Elaborado por Comisión Nacional del Agua.

Estudio Regional de Evaluación Hidrogeológica del Acuífero Cedros, en el Municipio de Mazapil, estado de Zacatecas, 2004. Elaborado por la Universidad de Sonora, para M3 Mexicana S. de R. L. de C. V.

Estudio Hidrogeológico Consecutivo y Evaluación Integral del Acuífero Administrativo Cedros, en el Municipio de Mazapil, Zacatecas, 2006. Elaborado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, para Minera Peñasquito, S.A. de C.V.

Estudio Hidrogeológico Consecutivo del Acuífero Cedros, 2007. Elaborado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, para Minera Peñasquito, S.A. de C.V.