

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero San Juan del Río (1016),
Estado de Durango***

*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.**

CCCLXXVI REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "CUENCAS CENTRALES DEL NORTE"

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					

ESTADO DE DURANGO

1016	SAN JUAN DEL RÍO	19.1	0.0	4.084936	4.3	15.015064	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 SAN JUAN DEL RÍO (1016), ESTADO DE
DURANGO***

México, D.F., Diciembre de 2010

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	1
	Antecedentes	1
1.1.	Localización	1
1.2.	Situación Administrativa del Acuífero	3
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3.	FISIOGRAFÍA	4
3.1.	Provincia fisiográfica	4
3.2.	Clima	5
3.3.	Hidrografía	6
3.4.	Geomorfología	7
4.	GEOLOGÍA	7
4.1.	Estratigrafía	10
4.2.	Geología Estructural	14
4.3.	Geología del Subsuelo	16
5.	HIDROGEOLOGÍA	16
5.1.	Tipo de acuífero	16
5.2.	Parámetros hidráulicos	17
5.3.	Piezometría	17
5.4.	Comportamiento hidráulico	17
5.4.1.	Profundidad al nivel estático	17
5.4.2.	Elevación del nivel estático	18
5.4.3.	Evolución del nivel estático	19
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	20
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 subterráneas por flujo horizontal (Eh)	22
7.2.	Salidas	24
7.2.1.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.2.2.	Evapotranspiración (ETR)	24
7.2.3.	Bombeo (B)	25
7.3.	Cambo de Almacenamiento ($\Delta V(S)$)	25
8.	DISPONIBILIDAD	26
8.1.	Recarga total media anual (Rt)	27
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM)	27
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	27
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas	27
9.	BIBLIOGRAFÍA	28

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 San Juan del Río, designado con la clave 1016 del Sistema de Información Geográfica de Agua Subterránea (SIGMAS), se localiza en la porción central del estado de Durango, entre las coordenadas 24° 28' y 25° 13' de latitud norte y 104° 13' y 104° 57' de longitud oeste , cubriendo una superficie de 2,633 km² (figura 1).

Limita al norte con los acuíferos San José de Nazareno, La Victoria y Nazas; al este con el acuífero Peñón Blanco; al oeste con el Valle de Santiaguillo y al sur con los acuíferos Valle de Canatlán y Madero–Victoria, todos ellos pertenecientes al estado de Durango.

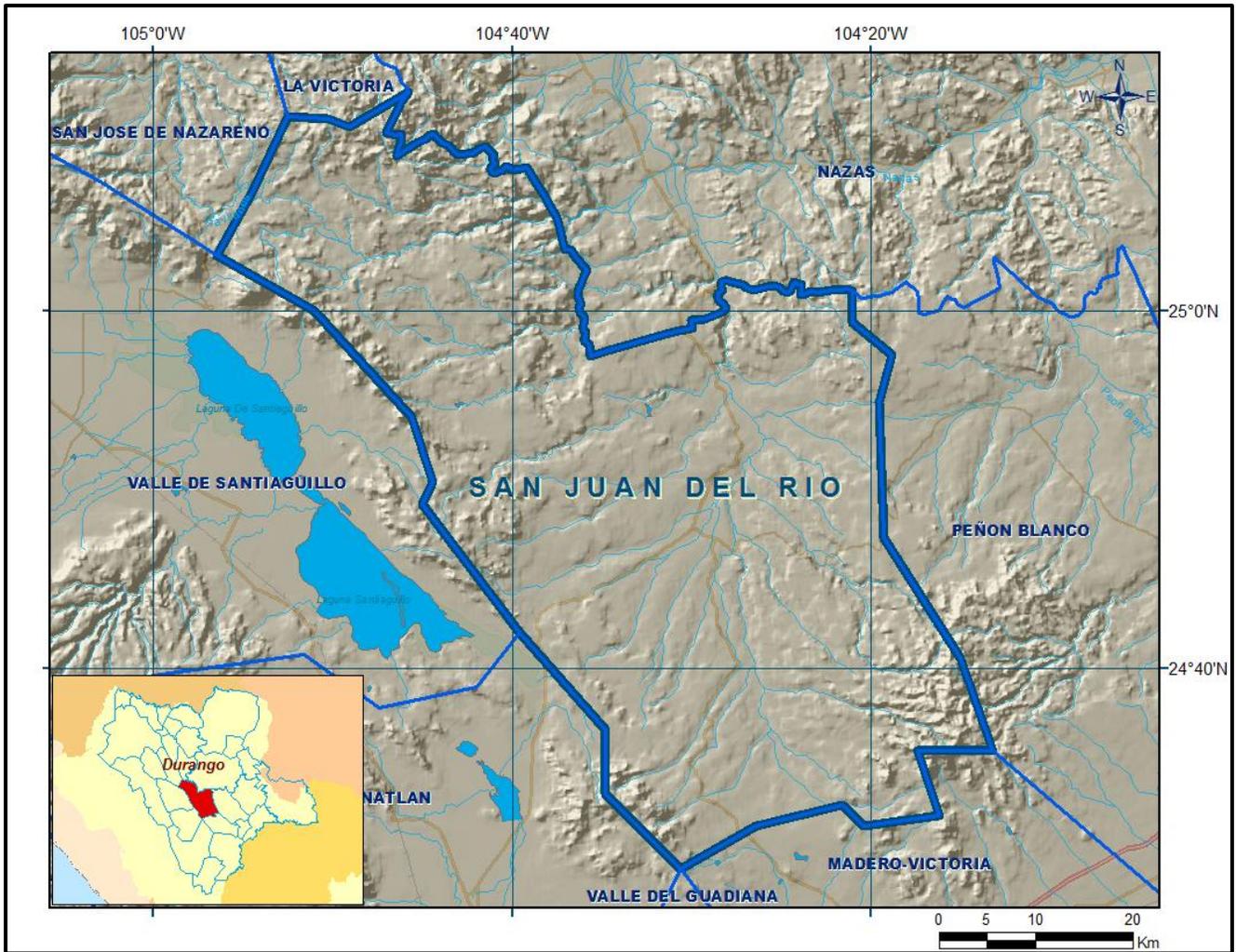


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero comprende casi en su totalidad los municipios de San Juan Del Río y Coneto de Comonfort; en menor proporción el municipio Pánuco de Coronado. Abarca también pequeñas porciones de los municipios de Guadalupe Victoria, Peñón Blanco, Canatlán y Nuevo Ideal.

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 de acuífero

ACUIFERO 1016 SAN JUAN DEL RIO							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	30	36.0	24	28	48.0	
2	104	34	48.0	24	33	0.0	
3	104	34	48.0	24	36	36.0	
4	104	39	36.0	24	42	0.0	
5	104	45	0.0	24	49	12.0	
6	104	44	24.0	24	50	24.1	
7	104	45	36.0	24	54	0.0	
8	104	51	0.0	25	0	0.0	
9	104	56	27.9	25	3	4.3	
10	104	54	31.2	25	6	32.3	
11	104	52	32.3	25	10	48.2	
12	104	50	16.1	25	10	40.2	
13	104	49	3.2	25	10	16.5	
14	104	45	48.4	25	12	12.8	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE MUNICIPAL
15	104	21	3.2	25	1	6.2	
16	104	21	1.4	24	59	19.8	
17	104	18	51.6	24	57	29.3	
18	104	19	33.8	24	54	53.6	
19	104	19	16.8	24	47	19.2	
20	104	15	2.3	24	40	35.3	
21	104	13	12.0	24	35	24.0	
22	104	17	24.0	24	35	24.0	
23	104	16	12.0	24	31	48.0	
24	104	20	24.0	24	31	12.0	
25	104	21	36.0	24	32	24.0	
26	104	26	24.0	24	31	12.0	
1	104	30	36.0	24	28	48.0	

1.2. Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero pertenece a la región Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Durango. Su territorio completo no se encuentra sujeto a las disposiciones de ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos vigente para el 2010, los municipios Peñón Blanco y Coneto de Comonfort, se clasifican como zona de disponibilidad 7, mientras que el municipio de Canatlán como zona de disponibilidad 5; los municipios Guadalupe Victoria, Pánuco de Coronado, Nuevo Ideal y San Juan del Río se clasifican como zona de disponibilidad 6.

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

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero no se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, sólo algunos con fines de prospección minera. En algunos acuíferos vecinos se han realizado estudios hidrogeológicos para determinar su recarga media anual. A continuación se describen los objetivos de los estudios más importantes:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS CABRERA-OCAMPO, MATALOTES-EL ORO, SAN JOSÉ DE NAZARENO, GALEANA-EL QUEMADO, LA VICTORIA, BUENOS AIRES, TORREÓN DE CAÑAS, SAN FERMÍN, SAN JUAN DEL RÍO, CABRERA, LA ZARCA-REVOLUCIÓN Y REVOLUCIÓN, EN EL ESTADO DE DURANGO. Realizado en Convenio por la Universidad de Sonora (UNISON) para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO SANTA CLARA, EN EL ESTADO DE DURANGO. Realizado en Convenio por la Universidad de Sonora (UNISON) para la Comisión Nacional del Agua, 2010. El objetivo del estudio fue el conocer las condiciones geohidrológicas del acuífero mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, obtener información necesaria para calcular la recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

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 a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el acuífero se encuentra ubicadototalmente en las estribaciones de la Provincia FisiográficaSierra Madre Occidental, Subprovincia Mesetas y Cuencas, en los límites con la Provincia Fisiográfica Mesa Central.

La Sierra Madre Occidental en Durango consiste en un gran sistema montañoso originado en el Terciario Inferior o Medio y por su ubicación dentro del contexto continental se manifiesta majestuosamente a lo ancho de más de 140 km y de toda la extensión noroeste, con rumbo suroeste en el Estado. A partir de la ciudad de Durango hacia oeste, la sierra alcanza su altura media de 2,650 msnm a unos cuantos kilómetros de la misma y en ocasiones se pueden admirar desde el Pacífico algunos de sus picos de más 3000 msnm. La sierra está conformada por espesores de 1 500 y 1 800 m de rocas de composición ácida e intermedia.

El relieve se caracteriza por presentar cañones profundos y topografía abrupta, donde es factible encontrar pequeños y estrechos valles en los cañones; la topografía tiende a ser más suave hacia el oriente y al sur, en donde se encuentran amplios valles y extensas llanuras; aquí las montañas se reducen a cerros con pendientes suaves. Las máximas elevaciones en la región están representadas por el cerro Blanco (2,300 msnm), y una porción de la Sierra Gamón (2,580 msnm). La zona de menor elevación se representa en el río Peñón Blanco, con una altitud de 1,450 msnm; en el área del poblado Santa Cruz, la altitud media es de 2,000 msnm.

La subprovincia de la Sierras y Llanuras de Durango se caracteriza por presentar valles intermontados abiertos con montañas, llanos y lomeríos con mesetas limitados por sierras bajas al occidente y sierras altas al suroriente, orientadas en dirección norte-sur. Sus sierras son de origen volcánico, alternadas con sierras constituidas por rocas sedimentarias que presentan diverso grado de plegamiento.

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

3.2. Clima

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), prácticamente todo acuífero San Juan del río se encuentra controlado por el clima seco estepario (BS), que es el menos seco de los climas secos y se presenta en cuatro variedades: $BS_1kw(w)$, $BS_1hw(w)$, $BS_0hw(w)$ y $BS_0kw(w)$.

El tipo $BS_1kw(w)$ se manifiesta en el 78% del acuífero y es de subtipo semiseco ($_1$), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando las temperaturas media anual del mes más frío y del más cálido, corresponde con templado con verano cálido. Presenta una temperatura media anual entre 12 y 18 °C, la media mes más frío entre -3 y 18 °C y la del más cálido > 18 °C. El régimen de lluvia (w), que define el comportamiento de la lluvia durante el año. Indica que la temporada en la que se concentra la mayor cantidad es de verano, cuando el mes

de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término (w) indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual) es < 5 .

La segunda variante de clima seco estepario, que predomina en el 11% del acuífero, es el $BS_1hw(w)$ que se diferencia del clima anterior en que su condición de temperatura (h) corresponde a semicálido con invierno fresco y su temperatura media anual se encuentra entre 18 y 22 °C. En menor proporción se manifiesta el clima $BS_0hw(w)$, donde el tercer término ($_0$) indica que su subtipo es seco, pues su grado de humedad es menor de 22.9; mientras que el tipo $BS_0kw(w)$, varía en que su condición de temperatura corresponde con templado con verano cálido y su precipitación media anual varía entre 12 y 18 °C, la media del mes más frío entre -3 y 18 °C y la del más cálido > 18 °C.

En una pequeña zona al noreste del acuífero, cubriendo el 2% de su área, se encuentra el clima $C(w_0)(w)$, que corresponde con un clima templado (C). En este clima la temperatura media anual se encuentra entre 12 y 18°C, su tipo es subhúmedo (w), pues su régimen de lluvias es de verano, y presenta escasa precipitación todo el año o de invierno. El subtipo ($_0$), considerando el grado de humedad que se obtiene del cociente de la precipitación entre la temperatura, corresponde con el menos húmedo, pues su cociente es menor de 43.2. Su régimen de lluvia es de verano, su porcentaje de lluvia invernal es < 5 , mientras que el mes más seco presenta una precipitación < 40 mm y su temperatura media anual se encuentra entre 12 y 18 °C.

Para la determinación de las variables climatológicas se tiene información de ocho estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Coneto de Comonfort, El Pino, Francisco Primo Verdad, Guadalupe Victoria, San Bartolo, San Juan del Río, Rodeo y Guatimape, cuyo registro comprende los periodos 1976-2007, 1963-2003, 1924-2007, 1963-2008, 1942-2008, 1939-2007, 1976-2007 y 1977-2007, respectivamente. De acuerdo con estos datos y utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **488.2 mm** y **17.5° C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1988 mm anuales**.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica RH 36 denominada Nazas-Aguanaval, Cuenca del Río Nazas-Rodeo y subcuenca de los ríos Ramos y Otros. Esta Región se encuentra situada al norte del país, en la altiplanicie septentrional; ocupa porciones de los estados de Coahuila, Durango y Zacatecas. Está comprendida entre los meridianos 101°31' y 106°14' de longitud oeste, y los paralelos 22°39' y 26°35' de latitud norte. El área de esta región es de 89,239 km²; limita al norte con la región hidrológica 35, al noroeste con la región hidrológica 24c, al este con la región hidrológica 37,

al sur con la región hidrológica 12, al suroeste con la región hidrológica 11, al oeste con la región hidrológica 10, y al noroeste con la región hidrológica 24a.

La hidrografía de la región está conformada por los ríos Nazas, el cual nace en el estado de Durango, y Aguanaval, que nace en el estado de Zacatecas. Las redes hidrográficas determinan drenaje de tipo dendrítico, enrejado y rectangular, de acuerdo con los tipos de rocas presentes.

En el acuífero se encuentra ubicado el río San Juan, el cual es afluente del río Nazas por su margen derecha. En su territorio existen 3 presas: García en la porción central, San Francisco Javier de Lajas y Miramar en la porción norte.

3.4. Geomorfología

Las características geomorfológicas generales están representadas por varios elementos. En porciones noroccidental y suroriental aparecen mesas y montañas desarrolladas por acumulación de ignimbritas con alturas menores a los 600. La porción central está dominada por lomeríos generados a partir de la erosión de rocas volcánicas y depresiones intermontanas con relleno proluvial de piedemonte. En la región oriental presenta mesas de acumulación volcánica basáltica con alturas también mayores a los 600 m

El sistema de topoformas que predomina en dos terceras partes del acuífero, es el lomerío con mesetas. El resto de topoformas que se manifiestan, en orden de predominancia, son: sierra baja, que se extiende a lo largo del límite occidental del acuífero, cubriendo el 8% de su área total; meseta de gran superficie con cañadas, que presenta en la porción norte cubriendo el 7% del acuífero; sierra alta, en la región sureste en un área correspondiente al 6%; valle abierto de montaña con lomerío (4%), el cual se desarrolla en una franja con rumbo norte – sur, en la porción centro - sureste del acuífero; valle intermontano con lomerío y valle intermontano, ambos cubriendo en conjunto el 6% de la porción noroeste y al este, respectivamente; y meseta con malpaís, que se encuentra al sur y cubre el 2%. En una pequeña área al suroeste se presenta llanura aluvial, cubriendo sólo el 1% del área del acuífero.

4. GEOLOGÍA

De acuerdo con la Carta Geológico-Minera G13-D52 “San Juan del Río” escala 1:50,000 del Servicio Geológico Mexicano (SGM), la región forma parte del Subterreno Parral que pertenece al Terreno Guerrero, cuyo basamento consiste de cuarcitas y filitas (Pp(?)C-F) que aflora en la porción SW (San Agustín de Ocampo) que se correlacionan con la Formación Gran Tesoro la cual aflora en el área de Santa María del Oro. Sobreyaciendo discordantemente aflora en San Agustín de Ocampo una secuencia flysch compuesta por areniscas, limolitas y lutitas (KvhAr-Lm). La cual se hace más

calcárea hacia la cima. Estas rocas se considera que pertenecen al miembro superior del Grupo Mezcalera, que localmente abarca del Valanginiano al Aptiano.

Descansando en discordancia sobre este grupo, afloran ampliamente andesitas y brechas andesíticas (TpaA-BvA) en las porciones SW y NW, con 100 m de espesor en la localidad de San Lucas de Ocampo, cuya edad Paleoceno-Oligoceno ha sido obtenida mediante datación por el método K-Ar. Son rocas favorables para el emplazamiento de mineralización polimetálica (Au, Ag, Pb, Cu, Zn)

En contacto discordante aflora un conglomerado Oligomítico que corresponde a la Formación Ahuichila, conformado por clastos de formas de formas subangulosas a subredondeados de caliza, de 2 a 15 cm de diámetro, en un cementante calcáreo y matriz arcillosas. Aflora al SE de la región en las inmediaciones de San José de Gracia. Subyace a rocas de la Serie Volcánica Superior y por correlación con otras áreas del norte de México se le asigna una edad Eoceno, correlacionable con el Conglomerado Sabinas y el Conglomerado Rojo de Guanajuato. Es receptora de mineralización económica principalmente en áreas cercanas a cuerpos intrusivos.

Afectando a todas las rocas preexistentes existe un cuerpo subvolcánico de composición traquiandesítico que aflora en las porciones SW y central, que por su correlación con un intrusivo que aflora en La Gotera, municipio de Rodeo, Dgo de le asigna una edad Oligoceno. En la región, presenta mineralización diseminada de Au. Sobreyaciendo al conglomerado de la Formación Ahuichila, se encuentra un paquete de material piroclástico que se correlaciona con la Formación San Pablo (Roldán Q., 1969), constituido por una secuencia de areniscas vulcanosedimentarias dispuestas en capas de 20 a 60 cm de espesor, con intercalaciones de tobas híbridas amarillentas, que aflora ampliamente en la porción centro oriental. Presenta un espesor máximo de 200 m en el área e José María Patoni; por su posición estratigráfica se infiere una edad del Oligoceno Tardío y corresponde a la base de la secuencia volcánica superior.

Sobreyacen concordantemente a los piroclastos, ignimbritas de color café claro a rojizo, con matriz vítrea, con cavidades colapsadas rellenas de pómez de 1 a 5 cm de diámetro, que aflora extensamente en toda la superficie del acuífero, presentando su mayor espesor (300 m) en la porción NW (Cerro Buenavista); ocasionalmente presenta en parte inferior un horizonte de toba riolítica de color gris claro y brecha riolítica. Se le asigna una edad Oligoceno Medio-Superior (Lyons, 1975) y se correlaciona con el miembro inferior de la Formación Gamón y es equivalente en tiempo con la formaciones del Grupo Carpintero y Río Chico, asociadas a la caldera Chupaderos.

Cubriendo a toda las unidades preexistentes, se presenta un conglomerado polimítico de origen continental compuesto por guijas y cantos rodados de rocas volcánicas como tobas riolíticas, ignimbritas y algunos fragmentos de basalto, poco consolidados, en forma caótica y ocasionalmente estratificada. Cubre gran superficie de la porción meridional del acuífero y su máximo espesor se

observa en la porción SE, e ambas márgenes del arroyo El Potrero, en donde alcanza los 200 m. Fue definida por Pantoja-Alor (1963) como Formación Santa Inés, quien le asigna una edad del Terciario Superior (Neógeno).

Sobreyaciendo discordantemente a la Formación Santa Inés, existen derrames de basalto que afloran en pequeñas áreas, formando mesas al este de San Agustín de Ocampo, entre San Juan del Río y Otilio Montaña, y en la porción NE; se correlaciona con la Formación Guadiana, por lo que se ubica en el Pleistoceno.

Finalmente, existen depósitos coluviales y aluviales recientes en la regiones bajas y sobre los cauces de los arroyos principales, producto de la intensa erosión de las rocas preexistentes y su posterior transporte y depósito.

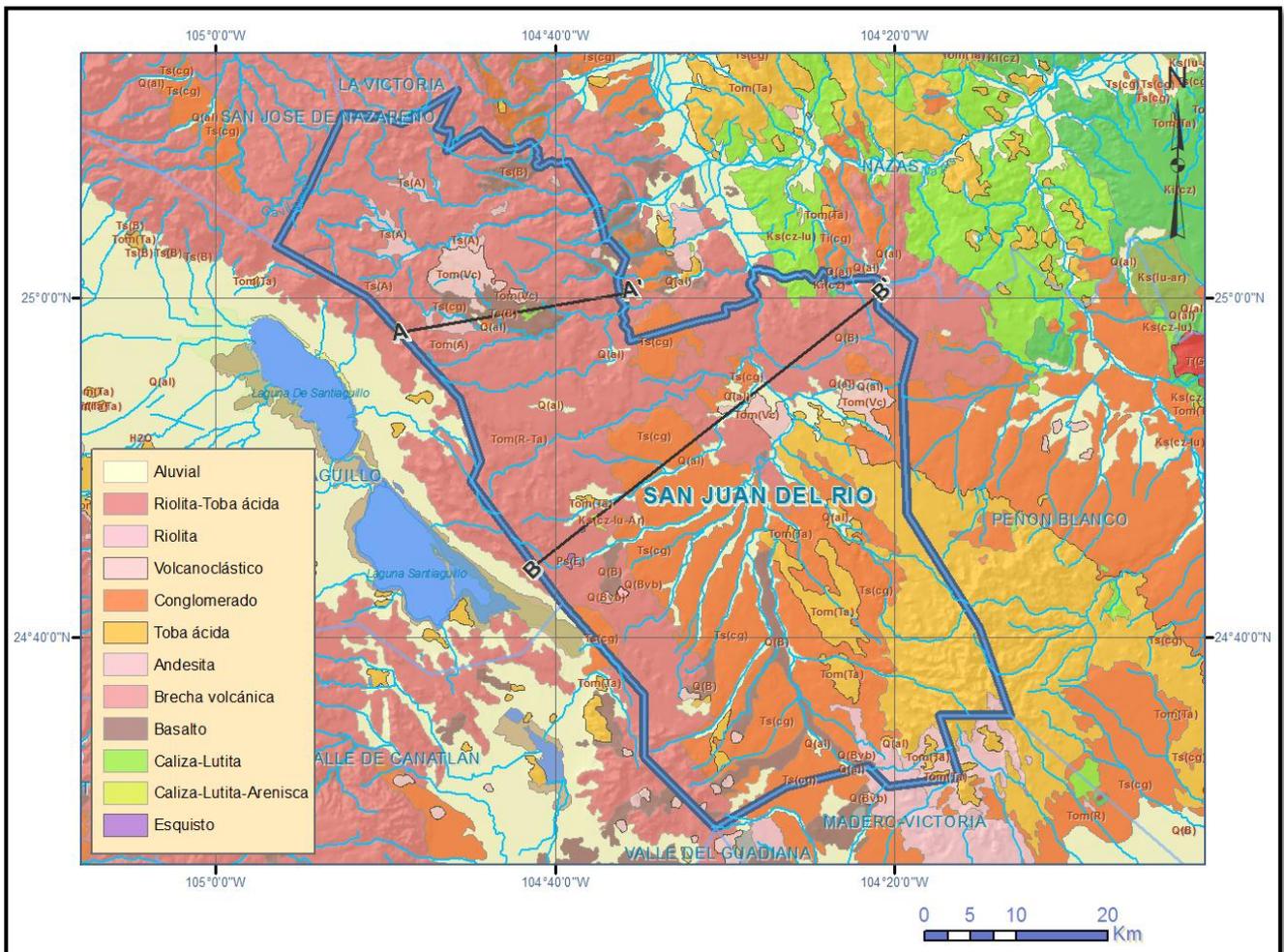


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía está representada por unidades litológicas cuyo rango de edad varía del Paleozoico al Reciente, que comprende rocas metasedimentarias, ígneas (intrusivas y extrusivas) y sedimentarias (figura 2). Se describen a continuación de acuerdo a su posición estratigráfica:

Paleozoico Superior

Formación Gran Tesoro

Son las rocas más antiguas de la región y están compuestas por micaesquistos, metalavas y calizas que fueron definidas formalmente en la localidad de Santa María del Oro. Aflora en el extremo occidental del acuífero, hacia el límite con el acuífero Valle de Santiaguillo, en donde se reconoce una secuencia de esquistos de muscovita y augen gneis de facies de esquistos verdes intercalados, posiblemente en contacto tectónico con filitas de sericita, areniscas y metaandesitas. La edad es del Carbonífero, definida con fenestélidos y crinoides en las calizas y por radiometría se dató el metamorfismo en los esquistos con método de K-Ar en muscovita.

Las rocas de esta unidad fueron descritas por primera vez por Russell R.W. (en Berumen E.R. y Pavón L.R. 1983) de manera informal, utilizando el nombre de Gran Tesoro y considerándolas de edad Permo-Triásico; posteriormente varios autores la mencionan y suponen la presencia del Paleozoico. Garduño M. y Zaldívar R. 1983, las consideran como base del conjunto petrotectónico Santa María. El espesor mínimo propuesto por diversos autores que han estudiado el área, es de 150 m.

Jurásico Superior-Cretácico Inferior

Grupo Mezcalera

En 1986, Araujo M. y Arenas P. la proponen de manera formal como Formación Mezcalera y en la hoja Indé (G13C19 escala 1:50,000) se definieron y cartografiaron cuatro unidades por lo que en términos del Código de Nomenclatura estratigráfico (1983) se conviene denominarla como Grupo Mezcalera. Está representado por una alternancia rítmica tipo flysch de areniscas y lutitas, cuyos afloramientos principales se ubican en la porción nororiental acuífero. Litológicamente está constituida por una secuencia rítmica de areniscas de grano fino y lutitas intercaladas con horizontes gruesos de calizas y limolita. Como cambio de facies de esta secuencia, se presentan rocas calcáreas de la Formación Aurora (KaCz-Lu), constituida por calizas, dolomías, pedernal y horizontes arcillosos, que afloran en la sierra La Sierrita y al noroeste en los cerros Andrés y Sotoles.

El contacto inferior no está bien definido y es cubierto en discordancia por las andesitas del Grupo Volcánico Inferior del Eoceno, así como por las tobas riolíticas del Supergrupo Volcánico Superior del Oligoceno.

Secuencia volcánica inferior andesítica y brechas andesíticas (TpaeA- BvA)

Es considerada de manera informal en el área de Tayoltita por Henshaw (1953), Randall y compañía Minas de San Luis (1975), posteriormente es estudiada sobre la carretera del Mezquitil, Dgo. (Keizer, 1974) y sobre la carretera a Mazatlán por McDowell y Clabaugh (1976); los primeros autores la mencionan constituida por riolitas, toba andesítica y andesitas con un espesor de 800 m; en Topia, Dgo. Lemish (en Clark y otros, 1977), reporta un espesor de 1400 m en una alternancia de andesitas y tobas en la Sierra de Registro y Sierra Colorada, ubicadas al Suroeste de la Cd. de Durango. La litología está constituida por andesitas y brechas andesíticas; megascópicamente las andesitas presentan una textura afanítica de color gris, gris claro, verde oscuro y rojiza; las brechas andesíticas están conformadas por fragmentos angulosos de andesitas y riolitas de pequeñas dimensiones de color variable con tonalidades de púrpura al gris claro. Generalmente esta secuencia tiene la característica especial de presentarse en forma de pseudoestratos de 0.5 a 1.5 m y se encuentra aflorando en forma de ventanas estructurales debido a la tectónica y a la erosión. Se consideran espesores de hasta 700 m en la zona de Tayoltita y Bacís y espesores de 250 m en Tejámen, Alamito, Coneto de Comonfort y San Lucas de Ocampo. La andesita fue datada por el método de K-Ar en la localidad de San Lucas de Ocampo reportando una edad de 38.8 m.a. (Damon, 1975). Otra datación en la carretera Durango - Mazatlán arrojó una edad de 52 m.a. (McDowell y Clabaugh, 1976); por lo que la andesita queda ubicada en el Paleoceno - Eoceno Temprano a Tardío.

Paleógeno (Eoceno)

Formación Ahuichila

Definida formalmente por Rogers (1981), en los afloramientos expuestos en el “Frontón de Ahuichila”, ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas, está constituida por depósitos clásticos de origen continental (conglomerados y brechas) conformados por fragmentos de caliza, calcarenita, calcilutita y de rocas volcánicas, con matriz calcárea y limolítica, que se presentan en bancos gruesos y masivos; de colores que varían de gris al rojizo. Aflora al SE de la región en las inmediaciones de San José de Gracia. Subyace a rocas de la Serie Volcánica Superior. Debido a su posición estratigráfica y su origen, el cual se relaciona con los primeros depósitos de características continentales, formados como consecuencia de la emersión del continente generada por la Orogenia Laramide, su edad se considera del Eoceno-Oligoceno.

Pórfidos riódacíticos y traquíticos (To PRd-tq)

Estas unidades litológicas corresponden a cuerpos subvolcánicos que afloran en las porciones SW y central, que por su correlación con un intrusivo que aflora en La Gotera, municipio de Rodeo, Dgo de le asigna una edad Oligoceno. Generalmente afloran en los arroyos, y en las faldas de lomeríos de pendiente suave en forma de apófisis quedando cubiertos por formaciones volcánicas del Oligoceno. Las masas hipabisales forman importantes depósitos de mineralización económica cuando están relacionados con una roca encajonante favorable y el ambiente tectónico es propicio.

Oligoceno-Mioceno

Supergrupo Volcánico Superior (ToTR-Ig, Tomlg-TR, TomRP)

Una extensa secuencia de ignimbritas intercaladas con flujos de lavas y sedimentos epiclásticos tobáceos sobreyacen el Complejo Volcánico Inferior y forman la capa superior de la Sierra Madre Occidental. Esta gran acumulación de rocas volcánicas del Terciario Medio ha sido designada como el “Supergrupo Volcánico Superior” (McDowell y Keize, 1977). Éste es comparable con depósitos piroclásticos de flujo de cenizas y rocas asociadas de edad similar que cubren áreas amplias del occidente de los Estados Unidos (McDowell y Clabaugh, 1979). En el occidente de México estos dos grupos ígneos ocupan áreas similares, y se pueden identificar a través de la mayor parte de la Sierra Madre Occidental. Ambos están aproximadamente paralelos a la margen occidental del continente.

El Supergrupo volcánico superior fue emplazado durante un periodo de convergencia entre la placa Farallón y la placa Norteamericana (McDowell y Clabaugh, 1979; Aguirre-Díaz y McDowell, 1991). Este periodo de vulcanismo paroxístico ha sido relacionado con pulsos de extensión en la porción meridional de la provincia de Cuencas y Sierras (Aguirre-Díaz y McDowell, 1991, 1993; Aranda-Gómez *et al.*, 2000). Por otro lado, Nieto-Samaniego *et al.* (1999) consideran que el volcanismo silíceo del “*flareup*” fue disparado por el efecto combinado de un emplazamiento extensivo de magmas básicos en la base de la corteza (*mafic underplating*) y el comienzo de extensión en la parte superior de la placa, inducida por el retroceso de la trinchera. Haciendo un estudio comparativo con el campo volcánico de San Juan, McDowell y Clabaugh (1979) estimaron que para producir los más de 300,000 km³ de rocas piroclásticas que forman la Sierra Madre Occidental (300,000 km² de área cubierta por este paquete de ignimbritas multiplicado por un espesor promedio de 1 km) deberían existir de 200 a 400 calderas con un diámetro promedio de 30 km; sin embargo, sólo se han reportado alrededor de 15 calderas (o complejos caldéricos) en la Sierra Madre Occidental, de las cuales solo unas cuantas han sido moderadamente estudiadas (Swanson y McDowell, 1984; Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández, 2003). Varios autores han propuesto que algunas de estas ignimbritas fueron emplazadas mediante fisuras corticales relacionadas a la formación de grabens (Scheubel *et al.*, 1988; Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández, 2003) llamados también “depresiones Vulcano-tectónicas” (Liman, 1997). Aguirre-Díaz y Labarthé-Hernández (2003) y Aguirre-Díaz *et al.* (2005), Aguirre-Díaz *et al.* (2007, 2008) proponen la existencia de cámaras magnéticas alargadas de dimensiones bato líticas que formaron calderas alargadas dentro de los grabens, llamando a estas estructuras “graben-caldera”.

Esta unidad presenta casi el 80% de los afloramientos litológicos dentro del acuífero. Están caracterizados por rocas volcánicas ácidas, tales como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e Ignimbritas. Regionalmente, esta unidad incluye varias unidades caracterizadas por litologías volcánicas félsicas afines: a) tobas líticas con pequeños fragmentos de rocas hipabisales y volcánicas con pseudoestratificación de delgada a masiva, aflora en los flancos de la Sierra de Coneto, con un espesor aproximado de 186 m (Formación Ocampo); b) ignimbritas fluidales y vitrificados pelíticos

asociados a tobas y brechas riolíticas piroclásticas con contenido de calcedonia; su espesor varía de 50 a 100 m (Formación Alumbre); c) ignimbritas masivas con escasos fragmentos líticos, siendo más abundante en la cima, en su parte media contiene areniscas tobáceas con un espesor variable de 20 a 90 m (Formación El Salto); d) ignimbritas rosadas, moradas y rojizas con estructura fluidal y juntas columnares, con un espesor aproximado de 75 m (Formación Yerbabuena); y e) tobas brechoides y aglomeráticas de composición ácida con fragmentos de bloq

Riolitas e ignimbritas y tobas riolíticas de la Formación Gamón (To Ig-R)

Fue propuesta en la Sierra Gamón por (Swanson, 1978). Esta formación está conformada de la base a la cima por brechas riolíticas constituidas por fragmentos angulosos de andesita, riolita y tobas riolíticas cubiertas por ignimbritas riolíticas masivas con zonas de ignimbritas brechoides y fases fluidales con intercalaciones de tobas líticas aglomeráticas con vitrófidos, las cuales son afectadas por domos de pórfidos riolíticos traquíticos y riodacíticos (Lyons, 1975).

Paleógeno-Neógeno

Grupo Carpintero

Esta unidad fue definida por Swanson *et al.* (1978) en la localidad del arroyo del Carpintero, ubicado al NW de la ciudad de Durango, relacionándolo con la Formación de la Caldera de Chupaderos. Consiste de las Formaciones El Águila, Cacaria y Santuario, además de una serie de domos y estructuras tipo plugs latíticos, traquíticos y riolíticos, rocas volcánicas ácidas como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e Ignimbritas. La edad de esta unidad es del Oligoceno Medio, a partir de datación radiométrica por el método K-Ar de 28.3 M.a. a 31.4 Ma.

Conglomerado polimíctico Formación Santa Inés

El término formacional de esta unidad fue propuesto por Pantoja (1963) para designar a las rocas conglomeráticas de origen continental que afloran en las cercanías de San Pedro El Gallo, Dgo. En la región se encuentran distribuidas en la mayor parte de las sierras formadas por rocas volcánicas terciarias (series volcánicas inferior y superior). Está constituida por conglomerados de rocas volcánicas, que en su contacto con las rocas subyacentes presenta capas arenosas de color rojizo, así como limos de color blanquecino, secuencia que paulatinamente cambia a conglomerados hacia la cima. Intercalaciones de derrames basálticos se observaron en las inmediaciones de San José de la Unión.

Los constituyentes del conglomerado presentan fragmentos cuya granulometría varía desde arenas hasta bloques de 50 cm de diámetro, el grado de redondez varía de redondeado a subredondeado, el cementante es escaso, aunque en las inmediaciones de San José de la Parrilla el material está bien cementado; generalmente presenta matriz arenosa y la compactación varía con la profundidad del material, por lo que en superficie se presenta con baja compactación. El espesor de la unidad es muy variable y depende de su distribución geográfica; los espesores mínimos se encuentran en las base

de las sierras, en tanto que en las porciones más bajas del valle su espesor rebasa los 300 m. De acuerdo con su génesis y características litoestratigráficas, a esta unidad se le considera una edad Plioceno-Pleistoceno, aunque si se considera que los basaltos interestratificados son del Paleógeno, su edad puede abarcar desde el Mioceno.

Cuaternario (Pleistoceno)

Formación Guadiana (Qpt B)

Albritton (1958) asigna el nombre de formación Guadiana a los derrames de basaltos que afloran a 25 km al este de la ciudad de Durango, en el poblado de Saltito de La Constancia. Está constituida por derrames de brecha basáltica; basalto de color oscuro en superficie fresca e intertemperiza a café oscuro, de textura afanítica con estructura vesicular, con presencia de olivino de color amarillo verdoso. Estos Basaltos son cubiertos por depósitos aluviales y lacustres del Reciente. Por la similitud litológica y posición estratigráfica, los basaltos del área se correlacionan con los de la localidad tipo, que se ubican en el Pleistoceno. Según Lyons (1975) la emisión de los basaltos ocurrió después del segundo colapso de la Caldera Chupaderos.

Representan la última actividad volcánica del Neógeno y cubren grandes extensiones de terreno; por su color y forma son fáciles de identificar en campo. Se presentan en forma de derrames intercalados en el conglomerado polimíctico; volcanes y conos cineríticos. Los basaltos son de color gris oscuro a negro de textura afanítica que varía a fanerítica, puede ser compacta o vesicular dependiendo de su génesis, contiene plagioclasa sódica (andesina–Labradorita) (Labradorita-bytownita), con cristales de olivino y ferromagnesianos. Esta unidad aflora en la porción norte y centro-sur del acuífero, con una orientación general de NW, originadas por conos volcánicos. El tamaño de las vesículas varía de 1 a 10 mm y su espesor estimado es de 9 a 40 m.

Aluvión (Holoceno)

Dentro de esta unidad informal se incluyen aquellas acumulaciones de material de origen fluvial, producto de la intensa erosión de las unidades mesozoicas y volcánicas cuaternarias, con su posterior transporte y depósito, lo cual ha originado la formación de planicies aluviales y lacustres. Son sedimentos detríticos de forma subredondeada a redondeada con un rango granulométrico muy amplio desde gravas hasta arcillas. Su espesor en algunos sitios alcanza los 100 m, aunque localmente se presentan también pequeños depósitos de terrazas aluviales con espesores de 10 a 20 m. Se le asigna una edad correspondiente al Holoceno.

4.2. Geología Estructural

Las rocas y secuencias presentes dentro del área cuentan con una complejidad litológico-estructural muy importante, de tal forma que están genéticamente asociadas a diversos procesos geológicos que se han sucedido en esta porción de la República Mexicana. Es importante establecer el estado de

Durango se presenta en una ubicación morfoestructónica que lo coloca justo en la transición entre el dominio geográfico de la Sierra Madre Occidental (SMO) y el dominio geográfico de la Plataforma Coahuila (López-Ramos, 1981; Eguiluz de Antuñano y Campa-Uranga, 1982). En este contexto, las litologías presentan una mezcla de evidencia geológico-estructural que obedece principalmente a la sobreposición de diversos ambientes tectónicos.

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

En la región se manifiestan tres eventos de deformación; el primero ocurrió durante el Paleozoico y el responsable de la formación de las rocas metasedimentarias, cuyo evento metamórfico fue datado en el área de San Agustín de Ocampo en una edad de 254 Ma. que lo coloca en el Pérmico y que probablemente sea producto de la Orogenia Ouachita-Marathon-Apalachiana originada por la colisión entre América del Norte y América del Sur-África (Peter Coney, 1983). El segundo evento deformacional se presentó desde finales del Cretácico al Eoceno con la Orogenia Laramide, que dio origen a una deformación de tipo dúctil-frágil, como consecuencia de la subducción y rápido desplazamiento de la Placa Norteamericana hacia el oeste y la Placa Farallón hacia el este; regionalmente este evento originó pliegues anticlinales y sinclinales asimétricos y en forma paralela se desarrollaron cabalgaduras con orientación NW-SE con vergencias hacia el NE, manifestados en las secuencias sedimentarias del Mesozoico al ser comprimidas contra elementos positivos. Algunos de estos rasgos están presentes en el Grupo Mezcalera y consisten de plegamientos de tipo asimétrico que varían de cerrados a isoclinales. Fredickson (1974) distingue varios periodos de intrusión ocurridos entre hace de 90 y 50 Ma., siendo más jóvenes y más ácidos hacia el oriente; con el método radiométrico Ar^{39}/Ar^{40} se determinó un pulso térmico con una edad de 70 Ma., que relaciona el origen de los cuerpos intrusivos en la zona con el evento laramídico y cuyo magmatismo dio origen a depósitos de tipo diseminado de Au-Ag.

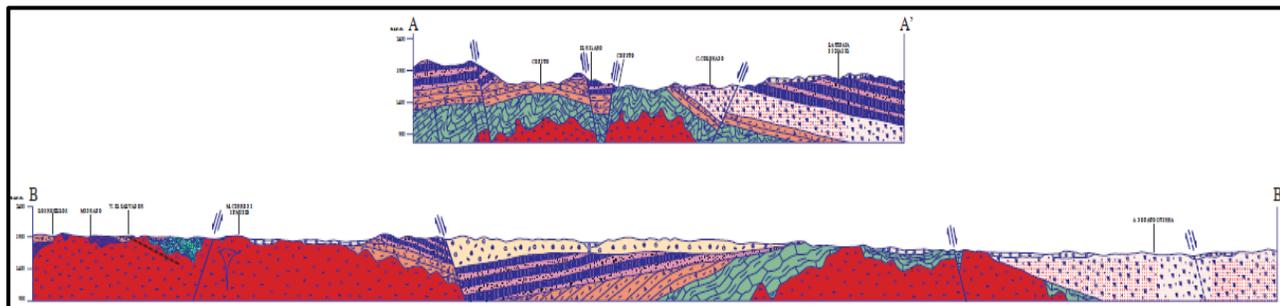
El último evento deformacional se originó durante el Plio-Cuaternario y fue de carácter distensivo con fallamiento normal, que ha sido asociado con la apertura del Golfo de California (Clarke y otros, 1980). Se manifiesta con emisiones volcánicas de composición alcalina, El fallamiento tiene orientación NW-SE y marca límites de bloques, los cuales están basculados hacia el centro, conformando una gran depresión estructural con la misma orientación; las estructuras existentes en el área se consideran parte de la prolongación hacia el SE de la provincia Cuencas y Sierras.

4.3. Geología del Subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales que constituyen el lecho y la llanura de inundación del Río San Juan y arroyos tributarios, así como en los depósitos de conglomerados. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas como son las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (figura 3). A mayor profundidad las rocas calizas representan un acuífero potencial que localmente ha sido identificado y que presenta condiciones confinantes.

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

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



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-D52 "San Juan del Río" Esc. 1:50.000 (SGM, 2001)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un **acuífero tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos de metros en el centro de los valles, principalmente los de origen tectónico. La porción inferior puede alojar un acuífero **de tipo confinado a semiconfinado** en las areniscas, lutitas y rocas volcánicas, que presentan

permeabilidad secundaria por fracturamiento. Su espesor confinante está constituido por lutitas interestratificadas con calizas.

A mayor profundidad las rocas calizas representan un acuífero potencial que localmente ha sido identificado y que presenta condiciones confinantes, debido a presencia de lutitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en el año 2010, se realizaron dos pruebas de bombeo de corta duración en etapas de abatimiento y recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Theis y Theis & Jacob. El primero se utilizó para los datos tomados en abatimiento y el segundo para los de recuperación (Tabla 2).

De los resultados de la interpretación por los métodos analíticos, se establece que los valores de transmisividad varían entre 1.59×10^{-4} y $1.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ con un valor promedio de $4.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$; los valores de conductividad hidráulica varían de 2.03×10^{-6} y $1.71 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ con un valor promedio de $6.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se pudieron obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos del acuífero

CLAVE	TIPO	NAD 27		ABATIMIENTO		RECUPERACIÓN	
		LONGITUD	LATITUD	T(m ² /s)	K(m/s)	T(m ² /s)	K(m/s)
CNA-1016-015	Pozo	-104.4936	26.6994	1.97×10^{-4}	2.03×10^{-6}	1.59×10^{-4}	1.64×10^{-6}
CNA-1016-082	Pozo	-104.4890	24.7882	1.02×10^{-3}	1.71×10^{-5}		

5.3. Piezometría

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

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2010, que se muestra en la figura 4, los valores varían desde algunos metros, a lo largo arroyos, hasta los 110 m, aumentando gradualmente hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero. De esta manera, en las zonas donde se localizan las poblaciones La Encina la Gorda, Leonardo

Vicario, Ciénega Grande, Atotonilco y José María Patoni; las profundidades varían de 10 a 20 m. Entre los poblados de Las Cruces y Agua El Mezquitese registran valores someros de hasta 5 m de profundidad. Hacia el occidente del acuífero, entre las poblaciones Diez de Octubre, San Agustín de Ocampo y hacia norte, en las inmediaciones del poblado Francisco Primo Verdad, los valores de profundidad varían entre 40 y 70 m; en tanto que hacia el sur se incrementan hasta los 110 m.

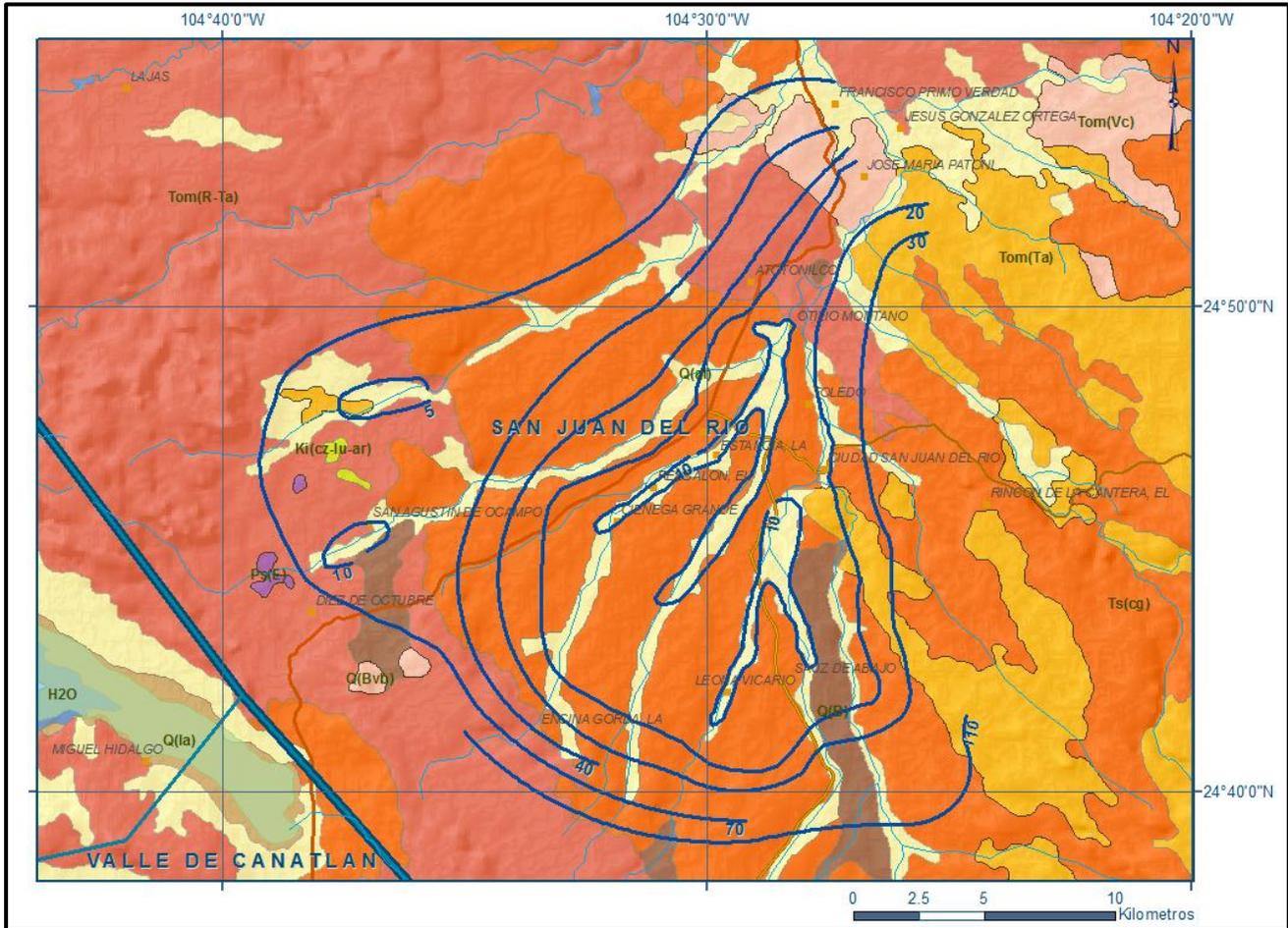


Figura 4. Profundidad al nivel estático en metros (2010)

5.4.2. Elevación del nivel estático

En cuanto a la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5, se observa que los valores varían de 1830 msnm, que se registran en los extremos sur y occidental del acuífero, entre los poblados Los Fresnos y San Agustín de Ocampo, hasta 1600 msnm que se presentan en su porción central, entre los poblados Jesús González Ortega y José María Patoni, descendiendo gradualmente a lo largo del cauce de los arroyos y desde los piedemonte. De esta manera la configuración muestra el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

De esta manera es posible identificar la dirección preferencial del flujo subterráneo de sur a norte, con alimentaciones procedentes de los flancos oriental y occidental. El flujo ocurre de las localidades Mesas de Carretas y Los Fresnos en direcciones radiales hacia el centro hasta llegar a la población de Atotonilco, en donde cambia su rumbo, para después continuar con una dirección preferencial al NE hacia los poblados José María Patoni y Jesús González Ortega.

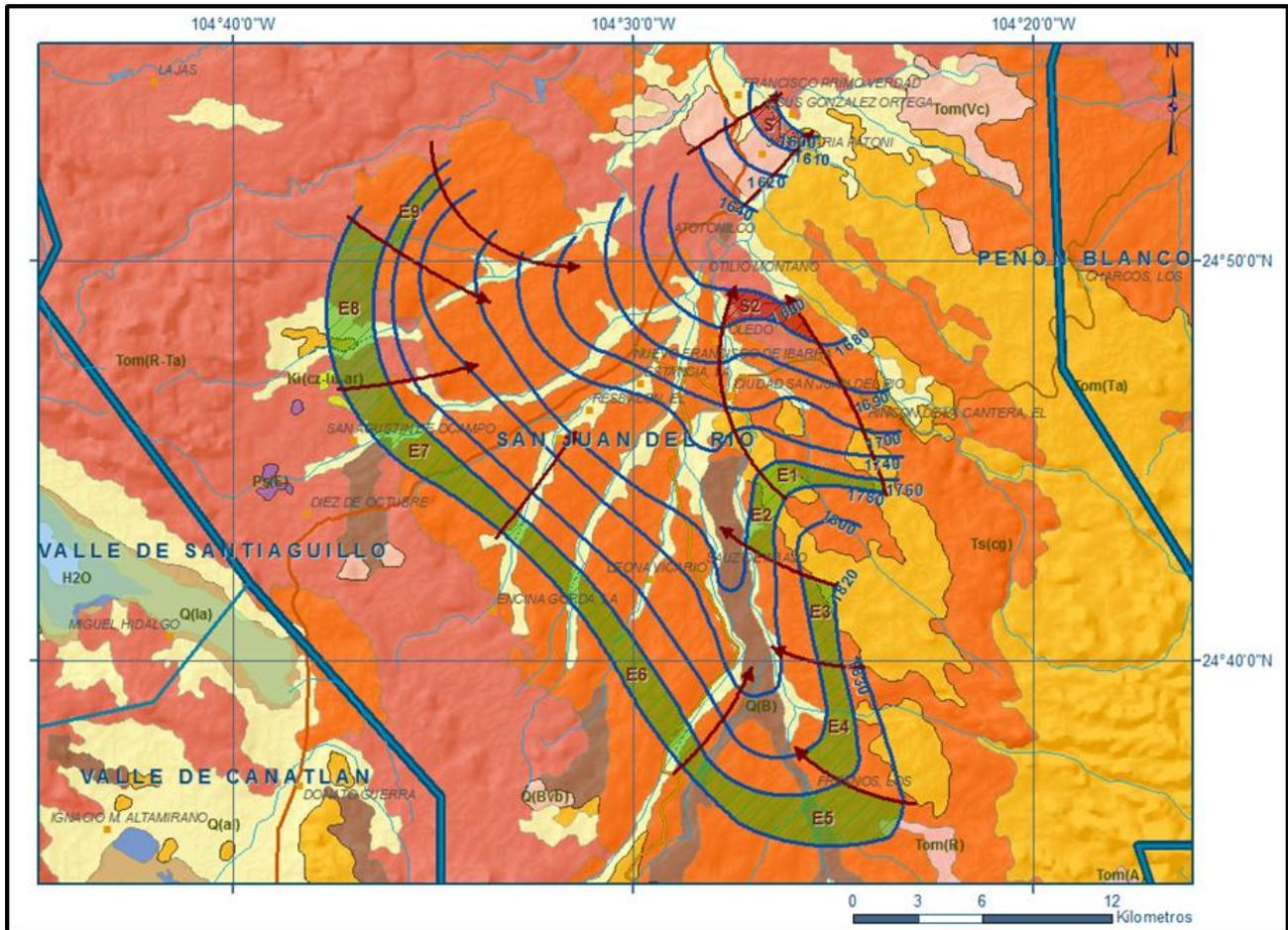


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo durante el estudio realizado en 2010, se tomaron 12 muestras de agua subterránea en aprovechamientos (10 pozos y 2 norias) distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente (tabla 3). Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, etc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de **183 a 510 ppm**, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo humano. Los valores más bajos se ubican en los aprovechamientos ubicados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en los extremos sur y occidental, mientras que los mayores se registran en la porción central, reflejando de esta manera las direcciones preferenciales del flujo subterráneo

Tabla 3. Aprovechamientos muestreados

APROVECHAMIENTOS	X	Y	Latitud	Longitud	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	STD (ppm)	pH	T °C	ALK (ml de HCl)
CNA-1016-083	552463	2740028	24.7755	-104.4811	820	400	5.9	33	7.9
CNA-1016-038	555184	2736667	24.745	-104.4543	230	230	7.3	25	2.6
CNA-1016-040	552444	2738945	24.7657	-104.4813	1020	500	7.1	27	11
CNA-1016-019	552573	2737299	24.7508	-104.4801	850	420	7.2	24	9.2
CNA-1016-EL POZO	553812	2734046	24.7199	-104.4679	1040	510	6.8	36	11
CNA-1016-011	555267	2728568	24.6719	-104.4538	430	210	7.4	22	5
CNA-1016-078	555553	2751451	24.8785	-104.45	805	362	8.38	26.69	5.9
CNA-1016-073	557134	2752794	24.8906	-104.4343	408	183	7.95	21.01	3.6
CNA-1016-092	551691	2747451	24.8425	-104.4884	955	430	7.36	32.4	9.9
CNA-1016-091	551791	2747935	24.8424	-104.4874	914	412	7.11	31.47	9.8
CNA-1016-093	553265	2745468	24.8246	-104.4729	767	345	7.73	23.11	6.9
CNA-1016-055	548473	2740319	24.7781	-104.5202	766	345	7.42	21.33	8.3

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 C_1S_1 , que representa agua con bajo contenido de sales y baja adsorción de sodio, C_2S_1 es agua con salinidad media y baja adsorción de

sodio y C_3S_1 que es el tipo de agua con salinidad alta y con bajo contenido de sodio intercambiable. Las dos primeras son apropiadas para su uso en riego sin restricciones y el uso de la tercera requiere prácticas agrícolas como lavado de suelos y cultivos tolerantes a la salinidad.

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

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 98 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 55 son pozos y 43 son norias; todos ellos activos.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **4.3 hm³ anuales**, de los cuales 3.3 hm³ (76.8%) se destinan al uso agrícola, 0.9 hm³ (20.9%) para dotación de agua potable a los centros de población de la región y 0.1 hm³ (2.3%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero y pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010 en una superficie de 500 km² que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos.

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

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

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

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:

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

7.1. Entradas

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

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

7.1.1. Recarga vertical (R_v)

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

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

Dónde:

R_v = Recarga vertical;

E_h = Entradas subterráneas por flujo horizontal;

B = Bombeo;

S_h = Salidas subterráneas por flujo horizontal;

ETR = Evapotranspiración real;

$\Delta V(S)$ = Cambio en el volumen almacenado;

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

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

7.1.2. Entradas subterráneas por flujo horizontal (E_h)

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

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

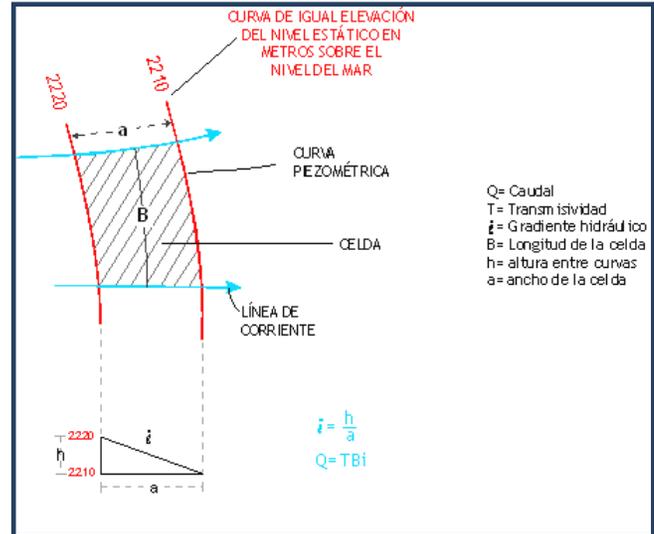
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B= Largo del canal de flujo;

i= Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$);

T= Transmisividad ($m^2/día$);



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 4 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de **18.2 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E1	6045	950	20	0.0211	0.0008	0.1018	3.2
E2	6680	1115	10	0.0090	0.0008	0.0479	1.5
E3	9545	1910	10	0.0052	0.0008	0.0400	1.3
E4	13360	1590	10	0.0063	0.0008	0.0672	2.1
E5	11770	1910	10	0.0052	0.0008	0.0493	1.6
E6	6045	1275	20	0.0157	0.0008	0.0759	2.4
E7	4450	1275	20	0.0157	0.0008	0.0558	1.8
E8	3180	950	20	0.0211	0.0008	0.0536	1.7
E9	5410	1270	20	0.0157	0.0010	0.0852	2.7
Total entradas							18.2

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

7.2. Salidas

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

7.2.1. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración del elevación del NE del año 2010, mostrada en la figura 5. Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación. El valor total estimado de **7.9 hm³ anuales** se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de Salidas subterráneas por flujo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	3180	1275	20	0.0157	0.0030	0.1496	4.7
S2	6400	1275	20	0.0157	0.0010	0.1004	3.2
Total entradas							7.9

7.2.2. Evapotranspiración (ETR)

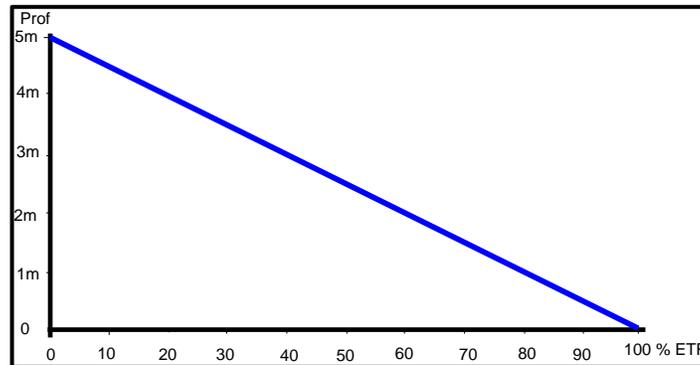
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera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

Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

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

T (°C) = 17.5
 P(mm) = 488.2 P² = 238339.24
 L = 1005.46875 L² = 1010967.41
 ETR (mm) = 458.1

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el 50 % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. Tomando en cuenta una superficie de 30 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 2.5 m y la lámina de evapotranspiración obtenida de 458.1 mm (con valores de 488.2 mm anuales para la precipitación y 17.5 °C de temperatura).

$$\text{ETR} = 30 \text{ km}^2 (0.4581 \text{ m}) (0.5) = 6.9$$

Por lo tanto; ETR = **6.9 hm³/año**.

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es del orden de los **4.3 hm³ anuales**.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de

tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

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

Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, $\Delta V(S) = 0$.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión 2, que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned} R_v &= S_h + B + ETR - \Delta V(S) - E_h & (2) \\ R_v &= 7.9 + 4.3 + 6.9 - 0.0 - 18.2 \\ R_v &= 0.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R_t &= R_v + E_h \\ R_t &= 18.2 + 0.9 \\ R_t &= 19.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma 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:

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

Donde:

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

R_t = 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 que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto de manera natural como inducida. Para este caso particular, su valor es de **19.1 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 San Juan del Río, la descarga por flujo subterráneo ocurre dentro del acuífero, por lo que no se considera descarga natural comprometida. Por lo tanto la **DNCOM = 0**.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2010 es de 4'326,344 m³**.

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas

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 REPGA.

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

$$DAS = 19.1 - 0.0 - 4.326344$$

$$\mathbf{DAS = 14.773656 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

El resultado indica que existe actualmente un volumen de **14'773,656 m³ anuales** disponibles para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

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

Comisión Nacional del Agua 2010. Estudio para Determinar la Disponibilidad del acuífero Santa Clara, en el estado de Durango. Realizado por convenio con la Universidad de Sonora.

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera G13-D52 "San Juan del Río", escala 1:50,000.