



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

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO CULIACÁN (2504), ESTADO DE  
SINALOA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1.</b>	<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
1.1.	Localización.....	2
1.2.	Situación administrativa del acuífero.....	5
<b>2.</b>	<b>ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>8</b>
3.1.	Provincia fisiográfica.....	8
3.2.	Clima.....	9
3.3.	Hidrografía.....	11
3.4.	Geomorfología.....	12
<b>4.</b>	<b>GEOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
4.1.	Estratigrafía.....	14
4.2.	Geología estructural.....	21
4.3.	Geología del subsuelo.....	22
<b>5.</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>24</b>
5.1.	Tipo de acuífero.....	24
5.2.	Parámetros hidráulicos.....	24
5.3.	Piezometría.....	24
5.4.	Comportamiento hidráulico.....	25
5.4.1.	Profundidad al nivel estático.....	25
5.4.2.	Elevación del nivel estático.....	26
5.4.3.	Evolución del nivel estático.....	27
5.5.	Hidgeoquímica y calidad del agua subterránea.....	28
<b>6.</b>	<b>CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>29</b>
<b>7.</b>	<b>BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>29</b>
7.1.	Entradas.....	30
7.1.1.	Recarga vertical (Rv).....	30
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	31
7.1.3.	Recarga incidental (Ri).....	32
7.2.	Salidas.....	33
7.2.1.	Bombeo (B).....	33
7.2.2.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	33
7.2.3.	Evapotranspiración (ETR).....	33
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	35
<b>8.</b>	<b>DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>36</b>
8.1.	Recarga total media anual (R).....	37
8.2.	Descarga natural comprometida (DNC).....	37
8.3.	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	37
8.4.	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	38
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>39</b>

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas. Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

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

### **1.1. Localización**

El acuífero Río Culiacán, definido con la clave 2504 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Sinaloa, en el límite con los estados de Durango y Chihuahua, entre los paralelos 24°24'48" y 26°20'22" de latitud norte y 105°47'33" y 108°10'35" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 20,389km<sup>2</sup>, que comprende también una porción de la zona serrana occidental del estado de Durango. Limita al norte con los acuíferos Río Sinaloa y Río Fuerte; al sur con el acuífero Río San Lorenzo; al oeste con el acuífero Río Mocorito, todos ellos pertenecientes al estado de Sinaloa; hacia el este con los acuíferos Matalotes-El Oro y Tepehuanes-Santiago, del estado de Durango y al noreste con Bocoyna, del estado de

Chihuahua. En su extremo suroccidental su límite natural es el Golfo de California (figura 1).

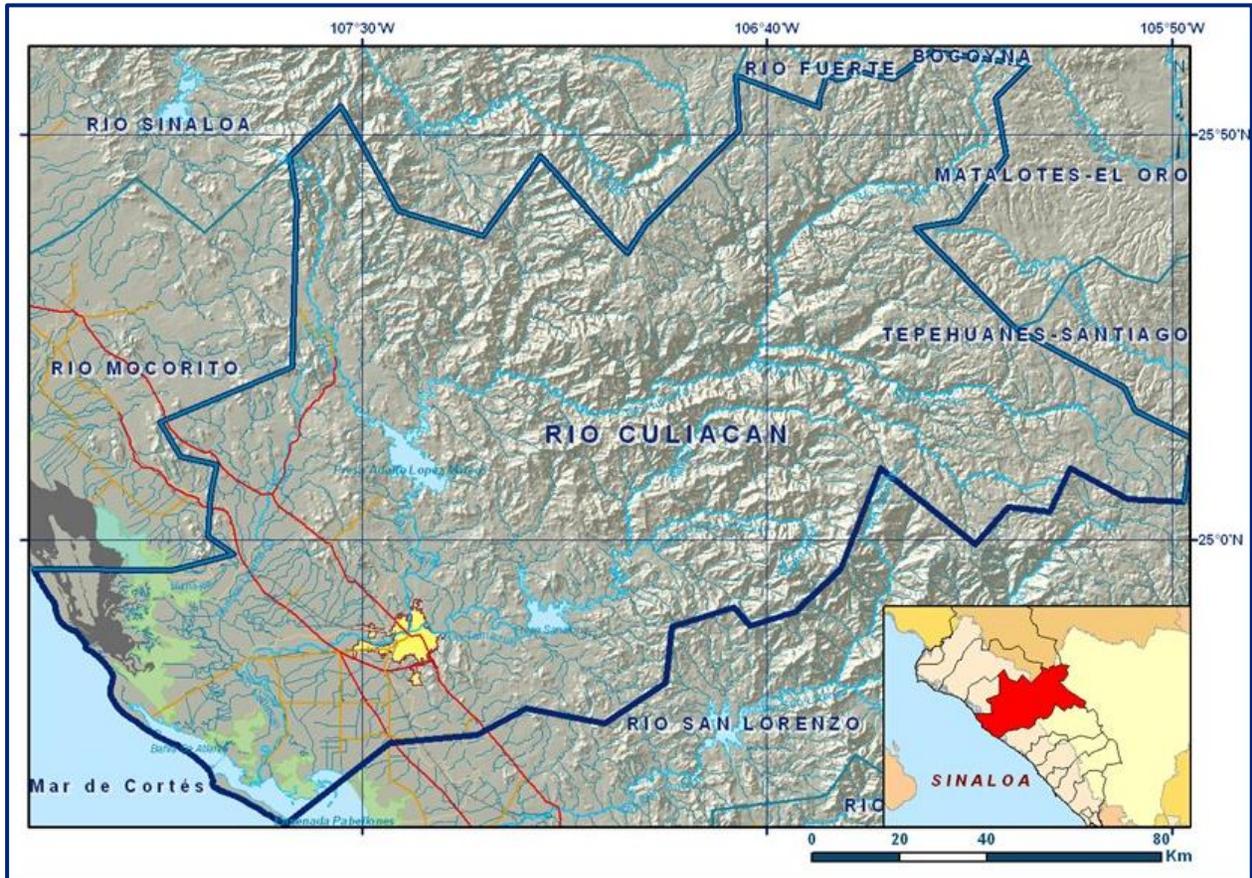


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, en territorio del estado de Sinaloa comprende parcialmente los municipios Badiraguato, Mocorito, Navolato y Culiacán, así como pequeñas porciones de Cósala y Angostura. En el estado de Durango abarca de manera total el municipio de Topia y parcialmente Guanaceví, Tepehuanes, Tamazula y Canelas. En el estado de Chihuahua, incluye de manera parcial el municipio de Guadalupe y Calvo.

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

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

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	106	24	28.1	25	56	55.5	
2	106	19	50.6	26	0	20.7	
3	106	7	41.3	25	58	40.6	
4	106	11	48.5	25	54	33.4	
5	106	10	30.8	25	47	22.5	
6	106	16	20.4	25	39	22.2	
7	106	21	40.7	25	38	31.4	
8	106	9	30.4	25	26	8.5	
9	105	55	58.1	25	18	51.6	
10	105	54	34.5	25	15	59.7	
11	105	47	30.2	25	12	26.7	
12	105	48	35.3	25	4	43.8	
13	105	55	28.2	25	5	2.2	
14	106	2	34.8	25	8	53.8	
15	106	5	8.5	25	3	32.7	
16	106	10	18.1	25	4	4.8	
17	106	14	18.9	24	59	29.6	
18	106	26	3.0	25	8	53.8	
19	106	30	55.3	24	56	21.4	
20	106	36	33.7	24	51	7.4	
21	106	42	8.3	24	49	23.3	
22	106	44	7.3	24	51	40.9	
23	106	51	47.2	24	49	13.7	
24	106	52	30.5	24	42	22.8	
25	107	0	5.0	24	37	19.6	
26	107	9	42.1	24	39	11.5	
27	107	15	54.5	24	35	51.1	
28	107	26	34.1	24	34	51.4	
29	107	39	34.3	24	24	46.8	DEL 29 AL 30 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
30	108	10	34.4	24	56	19.1	
31	107	53	30.0	24	56	17.0	
32	107	45	56.0	24	58	16.0	
33	107	49	4.1	25	0	23.3	
34	107	48	46.0	25	5	35.0	
35	107	48	0.0	25	9	17.0	
36	107	52	27.0	25	10	17.0	
37	107	54	56.1	25	14	31.6	
38	107	38	38.6	25	21	20.6	
39	107	38	6.8	25	41	47.3	
40	107	39	1.2	25	47	26.2	
41	107	32	39.6	25	53	30.9	
42	107	25	28.0	25	40	39.2	
43	107	15	6.7	25	37	36.1	
44	107	8	1.6	25	47	24.7	
45	106	59	9.5	25	37	19.4	
46	106	57	12.7	25	35	31.6	
47	106	55	9.8	25	38	44.2	
48	106	43	30.1	25	50	40.9	
49	106	43	56.2	25	57	25.5	
50	106	33	36.8	25	53	25.2	
51	106	33	33.5	25	54	26.7	
52	106	32	45.6	25	57	13.0	
53	106	31	50.9	25	57	8.3	
54	106	31	27.4	25	56	51.4	
55	106	30	7.3	25	57	12.5	
56	106	29	32.8	25	58	2.9	
1	106	24	28.1	25	56	55.5	

## **1.2. Situación administrativa del acuífero**

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Pacífico Norte y al Consejo de Cuenca Ríos Mocorito al Quelite, instalado el 10 de diciembre de 1999. Su territorio se encuentra parcialmente vedado. La porción costera está sujeta a las disposiciones de tres decretos de veda. El primero es el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de las aguas del subsuelo en la zona comprendida dentro de los límites del Distrito de Riego de Culiacán, Sin.”*, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 26 de noviembre de 1957. La segunda veda es el *“Decreto que declara de utilidad pública la expropiación de setenta mil hectáreas localizadas en el Valle de Pericos, Sin., para adicionar al Distrito de Riego de Culiacán (2a. publicación)”*, publicado en el DOF el 28 de marzo de 1958. La otra veda es el *“Decreto por el que se declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Riego del Río San Lorenzo, en terrenos del Municipio de Culiacán, Sin.”*, publicado en el DOF el 30 de mayo de 1974. Las tres vedas se clasifican como tipo II en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En la mayor parte del territorio del acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero se encuentra sujeta a las disposiciones del *“ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 21 acuíferos que se indican”*, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En el territorio del acuífero se localiza parte de los Distritos de Riego 010 “Culiacán-Humaya” y 109 “Río San Lorenzo”. No se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En la zona costera se localizan parte de los

sitios RAMSAR “Laguna Playa Colorada-Santa María La Reforma”, “Ensenada de Pabellones”, decretados el 2 febrero de 2004 y 2 de febrero de 2008, respectivamente.

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En la zona que comprende el acuífero se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación, otros con fines de prospección minera y algunos de cobertura regional en acuíferos vecinos. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

**EVALUACIÓN DE ACUÍFEROS EN LA ZONA CULIACÁN-SAN LORENZO, EN EL ESTADO DE SINALOA. Realizado en 1978 por Geohidrológica Mexicana, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).** Mediante actividades de campo que incluyeron censo e hidrometría de aprovechamientos, nivelación de brocales, piezometría, ejecución de pruebas de bombeo, plantea el balance de aguas subterráneas mediante el cual calcula una recarga mínima de 50 hm<sup>3</sup> anuales, con una extracción media de 22.5 hm<sup>3</sup> anuales.

**ACTUALIZACIÓN DE CONDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LA ZONA CULIACÁN-SAN LORENZO. Realizado en 1985 por la Residencia de Geohidrología de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).** Su objetivo fue conocer el comportamiento de los acuíferos causado por la explotación del agua subterránea, a través de las mediciones piezométricas e hidrométricas, y de la calidad del agua mediante el análisis químico de muestras de agua obtenidas en los aprovechamientos. Entre sus actividades más importantes destacan el censo e hidrometría de las extracciones, piezometría y muestreo de agua para análisis químicos. Concluye que las condiciones hidrogeológicas en la zona Valle Culiacán-San Lorenzo indican que son muy favorables para la infiltración del agua de los ríos Culiacán y San Lorenzo y del agua de los canales de riego agrícola. Calculó una extracción de 75.7 hm<sup>3</sup> anuales.

**REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES RÍO MOCORITO, RÍO CULIACÁN, RÍO PRESIDIO, RÍO SAN LORENZO Y RÍO FUERTE, SINALOA. Realizado en el año 2000 por Peritos Supervisores y Constructores, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua.** El objetivo del estudio fue establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica de los acuíferos, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo y conocer la evolución de los niveles del agua subterránea.

**ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA ZONA RÍO CULIACÁN-RÍO SAN LORENZO, SINALOA. Realizado en 2003 por Diseño e Ingeniería Aplicada, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua.** Entre sus actividades más relevantes destacan, piezometría, censo de aprovechamientos e hidrometría de las extracciones. **ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS RÍOS CULIACÁN, MOCORITO, SINALOA Y FUERTE, EN EL ESTADO DE SINALOA. Realizado por SPIC Servicios y Proyectos de Ingeniería Civil, S.A. de C.V. en 2010.** El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el análisis 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. 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.

**INTEGRACIÓN DEL ESTUDIO TÉCNICO JUSTIFICATIVO DE LOS ACUÍFEROS RÍO ELOTA CLAVE 2506, RÍO PIAXTLA CLAVE 2507, RÍO QUELITE CLAVE 2508, RÍO BALUARTE CLAVE 2510 Y LAGUNA AGUA GRANDE CLAVE 2512, EN EL ESTADO DE SINALOA. Realizado en 2014 para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Sur, por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. (SIIDSA).** Su objetivo general fue integrar los estudios técnicos que permitan determinar las causales de interés y utilidad públicos necesarios para la fundamentación y motivación que requiere la emisión del ordenamiento de los acuíferos. Adicionalmente incluyó actividades de campo como piezometría, ejecución de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos.

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO RÍO CULIACÁN, SINALOA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Norte, 2019.** Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

El último estudio y la piezometría obtenida por el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, son la base para la elaboración del presente documento.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincia fisiográfica**

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre casi la totalidad del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica “Sierra Madre Occidental”, que se caracteriza por un conjunto de sierras con orientación NW-SE y E-W, que presentan una flexión al N-S. La porción costera pertenece a la Provincia Fisiográfica “Llanura Costera de Sinaloa”.

Por otro lado, según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, Subprovincias Gran Meseta y Cañadas Duranguenses y Pie de la Sierra; y en la Provincia Llanura Costera del Pacífico, Subprovincias Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa y Llanura Costera de Mazatlán.

La Sierra Madre Occidental (SMO) es una cadena montañosa que abarca todo el oeste mexicano y el extremo suroccidental de los Estados Unidos. En sus 1500 km de longitud recorre Arizona, parte de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Nayarit y Jalisco, lugar donde se une al Eje Volcánico Transversal de México. Cubre 289,000 km<sup>2</sup> y ocupa la sexta parte del territorio mexicano. Su punto más alto es el Cerro Gordo ubicado en Durango, su ancho promedio es de 150 km, con alturas de hasta 3,000 msnm. Presenta una orientación NW-SE y comprende la porción oriental del estado de Sinaloa; es una extensa meseta formada por rocas volcánicas disectada por fallas normales y grabens, cuyo borde occidental se caracteriza por presentar una terminación abrupta con fallas normales que presentan grandes desplazamientos y zonas de barrancas profundas.

La Subprovincia Gran Meseta y Cañones Duranguenses está constituida por rocas ígneas extrusivas ácidas y formada principalmente por mesetas de gran superficie con cañadas y de sierras altas con cañones. En el acuífero presenta las principales elevaciones topográficas que varían de 2,300 a 2,600 msnm; su principal rasgo son las grandes mesetas limitadas por abruptos y enormes acantilados. Las características especiales de esta subprovincia son su elevación sobre el nivel medio del mar y el gran número y extensión de sus hermosos y fértiles valles, separados uno de otros por altas barreras montañosas.

La Subprovincia Pie de la Sierra se extiende como una franja angosta en el oeste de la SMO y tiene una orientación NW-SE. Se caracteriza por presentar sierras y lomeríos con litología similar a la de la subprovincia Mesetas y Cañadas del Sur, aunque mucho

más heterogénea, ya que tiene unidades de granito, andesita, basalto y conglomerado; asimismo, las sierras son de altitud menor que las de dicha subprovincia, las mesetas son escasas, dominan los lomeríos bajos disectados, y los valles, algunos de ellos muy llanos; se trata de una región transicional entre la Sierra Madre Occidental y la Llanura Costera del Pacífico, pero presenta una afinidad genética y morfológica mucho mayor a la primera. La Provincia Fisiográfica Llanura Costera de Sinaloa se caracteriza por ser una extensa llanura en forma de cuña, que comienza al sur, en Mazatlán, que se va haciendo más extensa al norte hasta alcanzar su ancho máximo en Los Mochis.

Forma un plano inclinado hacia el suroeste que ocasiona que los ríos en ella tengan en su curso una dirección casi normal a la costa. Estos ríos son: Canoas, Rosario, Quelite, Piaxtla, Elota, San Lorenzo, Culiacán o Tamazula, Mocorito, Sinaloa y Fuerte. Presenta abanicos aluviales, antiguos valles fluvio-deltaicos, pequeñas colinas constituidas por rocas pre-deltaicas, deltas actuales, estuarios, complejos lagunares, cauces de ríos y arroyos, depósitos eólicos y marinos, las cuales pueden ser clasificadas como unidades fisiográficas en cuanto al ambiente de formación como: continentales, fluviales, mixtas o de transición, eólicas y marinas.

La Subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa se caracteriza por presentar abanicos aluviales, antiguos valles fluvio-deltaicos, pequeñas colinas constituidas por rocas pre-deltaicas, deltas actuales, estuarios, complejos lagunares, cauces de ríos y arroyos, ríos, depósitos eólicos y marinos, las cuales pueden ser clasificadas como unidades fisiográficas en cuanto al ambiente de formación como: continentales, fluviales, mixtas o de transición, eólicas y marinas. La Subprovincia Llanura Costera de Mazatlán presenta las menores pendientes y está conformada por materiales de arrastre fluvial y de oleaje complejos, dominada por una llanura irregular con lomeríos bajos y muy modelados por la acción eólica y marina, con grandes llanuras de inundación, lagunas y pantanos, que conforman la interface marino-terrestre fluvial.

### **3.2. Clima**

Con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1981 para las condiciones particulares de la República Mexicana, se puede afirmar que los climas en la zona sur del estado de Sinaloa, están definidos por franjas paralelas a la planicie costera. Debido a la gran extensión territorial del acuífero y a la diversidad de altitudes que varía desde la zona costera hasta las mayores elevaciones de la Sierra Madre Occidental, de 2900 msnm, se presentan varios tipos de clima.

En la porción serrana del acuífero, se registra clima semifrío subhúmedo Cb'(w2) con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C, temperatura del mes más cálido menor de 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual. Descendiendo en altitud, el clima es C(w2) templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C y temperatura del mes más cálido menor de 22 °C; precipitación del mes más seco mayor a 40 mm y el cociente precipitación/temperatura (P/T) es mayor de 55.0.

En las estribaciones de la sierra el clima es cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22 C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. Hacia la zona costera el clima es BSl(h') w semiárido cálido, temperatura media anual mayor de 22 °C, temperatura del mes más frío mayor de 18 °C, y clima BSo(h') w árido, cálido, temperatura media anual mayor de 22 °C, temperatura del mes más frío mayor de 18 °C, ambos con régimen de lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

La zona de estudio está expuesta a dos regímenes de precipitación: las lluvias de verano y las de invierno; las primeras son producidas por la temporada normal de lluvias y eventos hidroclimatológicos extremos, como los ciclones, los cuales se presentan con regularidad; generalmente estas lluvias se presentan en los meses de junio a octubre; suelen ser intensas y de corta duración, generando fuertes avenidas. La segunda temporada de lluvias es invernal, producida por los frentes fríos que se presentan durante los meses de noviembre a enero, de menor intensidad que las de verano. El período de estiaje, donde las precipitaciones son prácticamente nulas, ocurre de febrero a mayo.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 5 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero Culiacán, El Varejonal, Sanalona, La Huerta y Guatenipa, que tienen un periodo de registro que comprende de 1985 a 2015. Con estos datos y utilizando el método de Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual representativos de la zona de explotación de **656.5mm** y **24.9 °C** respectivamente. De

igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,738.5 mm anuales**.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero Río Culiacán se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 10“Sinaloa”, Subregión Río Culiacán, cuenca del río del mismo nombre. En la zona costera se localiza la Ensenada Pabellones, que comparte con el acuífero vecino Río San Lorenzo.

En el territorio que cubre el acuífero la mayoría de las corrientes superficiales son de régimen intermitente; existen ríos perennes, lagunas y zonas inundables. Las principales corrientes superficiales son los ríos Culiacán, Tamazula y Humaya.

El Río Culiacán es la corriente superficial más importante, nace en el estado de Durango, en la Sierra Madre Occidental, a una altitud cercana a 3,000 msnm, con la confluencia de los ríos Tamazula y Humaya, escurriendo con una trayectoria preferencial en sentido norte-sur, que al llegar a la ciudad de Culiacán cambia a este-oeste, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. Es uno de los más importantes del estado de Sinaloa, tiene una cuenca con superficie total de 16,000 km<sup>2</sup> y en ella se localizan dos presas de almacenamiento; la presa Sanalona sobre el cauce del río Tamazula y la presa Adolfo López Mateos sobre el río Humaya, las cuales regulan y controlan los escurrimientos en beneficio de un promedio anual de 200,000 ha del distrito de riego Culiacán-Humaya. La presa Sanalona deriva agua para riego en el Distrito de Riego Río San Lorenzo.

La presa José López Portillo se localiza sobre el río San Lorenzo, a una distancia de 100 km hacia el sureste de la ciudad de Culiacán; se utiliza para el riego de una superficie aproximada de 69,000 ha al año, con un volumen importante de agua que en su mayor parte se aplica en la margen izquierda del río San Lorenzo y en menor proporción en la margen derecha, donde parte del volumen destinado para el módulo III-1, se encuentra compartido en un porcentaje bajo, con el acuífero Río Culiacán.

La Presa Sanalona se ubica sobre el río Tamazula, aproximadamente a 30 km al este de la ciudad de Culiacán; parte del volumen destinado para el riego del módulo II-3, perteneciente a este sistema, se encuentra dentro del acuífero Río San Lorenzo. En la margen derecha del río San Lorenzo, límite entre los acuíferos Río Culiacán y Río San Lorenzo, ambos acuíferos comparten partes proporcionales de los módulos de riego III-1 del DR Río San Lorenzo y el II-3 del DR Culiacán-Humaya, por lo cual se estima que

la superficie agrícola beneficiada por el riego dentro del acuífero del río San Lorenzo es similar a la de la presa José López Portillo.

Se cuenta además con canales principales y canales de distribución, estructuras de operación y servicios y diques, como parte del sistema de irrigación de los distritos de riego Culiacán-Humaya y San Lorenzo.

### **3.4. Geomorfología**

En la superficie que cubre el acuífero se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas: lomeríos, sierras, mesetas, abanicos aluviales, cauces fluviales, valles deltaicos, lagunas litorales, manglares, dunas y playas, relacionadas con el origen y naturaleza de las rocas y depósitos que las conforman.

Las mayores elevaciones topográficas conforman las sierras y mesetas constituidas por las rocas volcánicas ácidas de la Sierra Madre Occidental y las rocas intrusivas que forman parte de Batolito de Sinaloa, de naturaleza granítica y granodiorítica.

De acuerdo con los rasos fisiográficos principales, se identifican dos zonas: una de planicie y otra montañosa. La primera es sensiblemente plana con una ligera pendiente hacia el Golfo de California, mientras que los rasgos montañosos se inician hacia el oriente, en dirección hacia la Sierra Madre Occidental, que se caracteriza por presentar relieves más accidentados, donde generalmente los valles son estrechos en forma de “v” y las corrientes tienen gradientes pronunciados que hacen que la zona se encuentren en una etapa geomorfológica juvenil.

En la zona de transición con la sierra, la planicie costera presenta una topografía de lomeríos aislados de más de 50 metros de altura, que disminuyen gradualmente a 10 m en promedio, hasta volverse semiplana, en dirección hacia la línea de costa. Los valles son estrechos en forma de “v” y las corrientes presentan gradientes altos que las ubica en una etapa juvenil.

En la zona de planicie, el río Culiacán ha depositado materiales deltaicos, formando numerosos meandros que hacia su desembocadura presentan cursos divagantes, dejando huellas de antiguos cauces, que en muchos casos han sido rehabilitados como drenes agrícolas. Estos cauces por lo general tienen la forma típica de “u” por lo que se considera a la planicie en etapa de madurez avanzada. Hacia el este y sureste, los arroyos se amplían adquiriendo relieves topográficos de forma más suave y redondeada, determinado que se encuentran en una etapa de madurez incipiente.

#### **4. GEOLOGÍA**

El basamento de la región está constituido por una secuencia meta-vulcanosedimentaria, conformada por pizarras, filitas y esquistos, con algunos horizontes andesíticos intercalados. A dicha secuencia meta vulcanosedimentaria, se le ubicó en el Paleozoico por su correlación y similitud litológica con la Formación San José de Gracia (Malpica, 1974) del norte de Sinaloa. Esta secuencia subyace discordantemente a las unidades de la cubierta mesozoica y paleógena. El Cretácico Inferior está representado por una secuencia vulcanosedimentaria caracterizada por vulcano-arenitas calcáreas y derrames andesíticos en la base, que se relaciona a un arco volcánico, posiblemente del Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983) Subyace en relación discordante a un paquete de rocas calcáreas de estratificación masiva (arrecifales), cuya edad, por métodos bioestratigráficos, le confieren un rango del Aptiano al Cretácico Superior (figura 2).

Descansando en discordancia sobre el Cretácico, se presentan andesitas y brechas andesíticas, andesitas y tobas andesíticas que afloran en la porción oriental, que por su posición estratigráfica se les ubica en el Paleógeno-Eoceno. Sobre las rocas andesíticas se depositaron discordantemente conglomerados polimícticos ubicados tentativamente en el Eoceno-Oligoceno, que afloran en una franja orientada NW-SE en la porción central de la zona. Sobreyaciendo discordantemente aflora un paquete de brechas riolíticas e ignimbríticas distribuidas en la porción oriental.

Descansando en aparente concordancia sobre el paquete anterior, se depositaron ignimbritas y tobas riolíticas, brechas, así como coladas de riolitas, en menor proporción; que constituyen las zonas topográficamente más elevadas de la región. Su edad se determinó en 22 a 32 Ma por correlación con rocas similares datadas al suroeste del distrito minero Tayoltita (Smith y Hall, 1974), ubicándolas en el Oligoceno-Mioceno.

Intrusionando a las rocas antes descritas, afloran intrusivos de composición granodiorítica y granítico-granodiorítica que forman parte del Batolito de Sinaloa, cuyas edades radiométricas obtenidas varían de 100 a 27 Ma, aunque se han determinado edades aisladas de 135 Ma. Las relaciones de campo observadas indican una intrusión de rocas riolíticas del Oligoceno-Mioceno. Es probable que la evolución de la granodiorita haya iniciado en el Cretácico Inferior y concluido en el Paleógeno, como puede interpretarse también a partir de las edades radiométricas. Estas rocas se encuentran afectadas por generaciones de diques andesíticos y aplíticos, así como

de cuerpos subvolcánicos representados por pórfidos dioríticos y andesíticos, asociados a la mineralización de la zona, de edad posterior a la granodiorita.

Sobreyaciendo concordantemente sobre el paquete de ignimbritas y tobas riolíticas, aflora una secuencia vulcanoclástica constituida por una alternancia de areniscas y limolitas de la Formación San Ignacio (Fredrikson, 1974), que se distribuye localmente en la porción suroriental de la zona. Cubriendo en discordancia a la secuencia anterior, se tiene un depósito sedimentario continental, formado por un conglomerado polimíctico de edad Mioceno, constituido por clastos de las secuencias volcánicas preexistentes. Los eventos finales del Neógeno, se definen por gruesas coladas de andesitas y basaltos, que cubren en discordancia a las rocas riolíticas de la porción oriental, en el Rancho La Traspansa y al poniente en la Huerta de Alaya. Finalmente, el Cuaternario está constituido por coladas de basalto, depósitos conglomeráticos no consolidados, así como depósitos eólicos, aluviales, lacustres y palustres (Carta Geológico-Minera CuliacánG13-10. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

#### **4.1. Estratigrafía**

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende edades que varían del Precámbrico-Paleozoico al Holoceno y está constituida por rocas volcánicas e intrusivas, metamórficas y sedimentarias (figura 2). La sucesión de eventos magmáticos ocurridos se encuentra cubriendo, mediante una discordancia petrológica, a escasos afloramientos de rocas sedimentarias del Cretácico Inferior y Superior. El magmatismo inicia en el Oligoceno y continúa de manera interrumpida hasta el Holoceno.

### **PRECÁMBRICO-PALEOZOICO**

#### **Complejo Sonobari**

Son las rocas más antiguas que afloran en la región y están formadas por esquistos y gneises de muscovita y de biotita, intercalados con anfibolitas, con un alto grado de deformación. Se encuentran afectadas por un intrusivo ácido de edad cretácica perteneciente al batolito que aflora en Sonora y Sinaloa, compuesto por granitos, granodioritas, monzonitas y tonalitas. Tentativamente se les asigna una edad Precámbrico, aflora a manera de "colgantes" en un intrusivo granodiorítico por lo que se desconoce su relación con las demás unidades.

## **PALEOZOICO METASEDIMENTARIO**

El basamento estratigráfico de la región está constituido por una secuencia metamórfica de filitas, esquistos, pizarras y cuarcitas con esporádicos horizontes lávicos andesíticos intercalados, cuya edad se ha asignado al Paleozoico por correlación y similitud litológica con la Formación San José de Gracia del norte de Sinaloa. Con este nombre se designa a una secuencia de rocas sedimentarias marinas del Paleozoico que presentan grados de bajo metamorfismo de la facies de esquistos verdes y de anfibolita. En general, la unidad se caracteriza por rocas esquistosas, pizarras, cuarcitas, calizas recristalizadas, pedernal, otras rocas arcillo-arenosas, así como esquistos y pizarras moteadas que indican metamorfismo de contacto, cuyos afloramientos muestran una morfología de lomeríos bajos y redondeados.

En su litología pueden distinguirse dos grupos diferentes de rocas: Las rocas metasedimentarias esquistosas, producto de un metamorfismo de bajo grado, cuya mineralogía indica una facies de anfibolita, en las que los esquistos más comunes son los de clorita y cuarzo, albita y muscovita o cuarzo- feldespáticos. El otro grupo corresponde a rocas metamórficas de contacto presentadas por esquistos y pizarras moteadas, producto de las aureolas del contacto con los intrusivos que las afectan.

Representa, de manera general, un protolito constituido por una antigua secuencia arcillo-arenosa, algunas veces conglomerática, con intercalaciones de rocas carbonatadas, la cual fue afectada por metamorfismo regional y de contacto, plegada, fallada e intrusionada cuando menos en tres ocasiones.

## **CRETÁCICO**

Sobreyaciendo concordantemente a la unidad anterior se tiene un paquete de rocas calcáreas de estratificación masiva (arrecifales), con horizontes de lutita intercalados, que ha sido datado en el Albiano; sin embargo, se ha observado que, al norte del estado, estos cuerpos calcáreos tienen un rango estratigráfico que abarca al Cenomaniano-Turoniano y ocasionalmente al Maestrichtiano.

Está representado también por las rocas intrusivas, principalmente graníticas y granodioríticas, que forman parte de gran Batolito de Sinaloa, cuyas edades obtenidas abarcan un rango de 100 a 27 Ma, aunque se han obtenido edades aisladas de 135 y 18 Ma. Los cuerpos intrusivos están afectados por generaciones de diques aplíticos y andesíticos, así como por pórfidos dioríticos y por cuerpos de composición ultrabásica, en los cuales es común la mineralización de cobre, cromo y níquel.

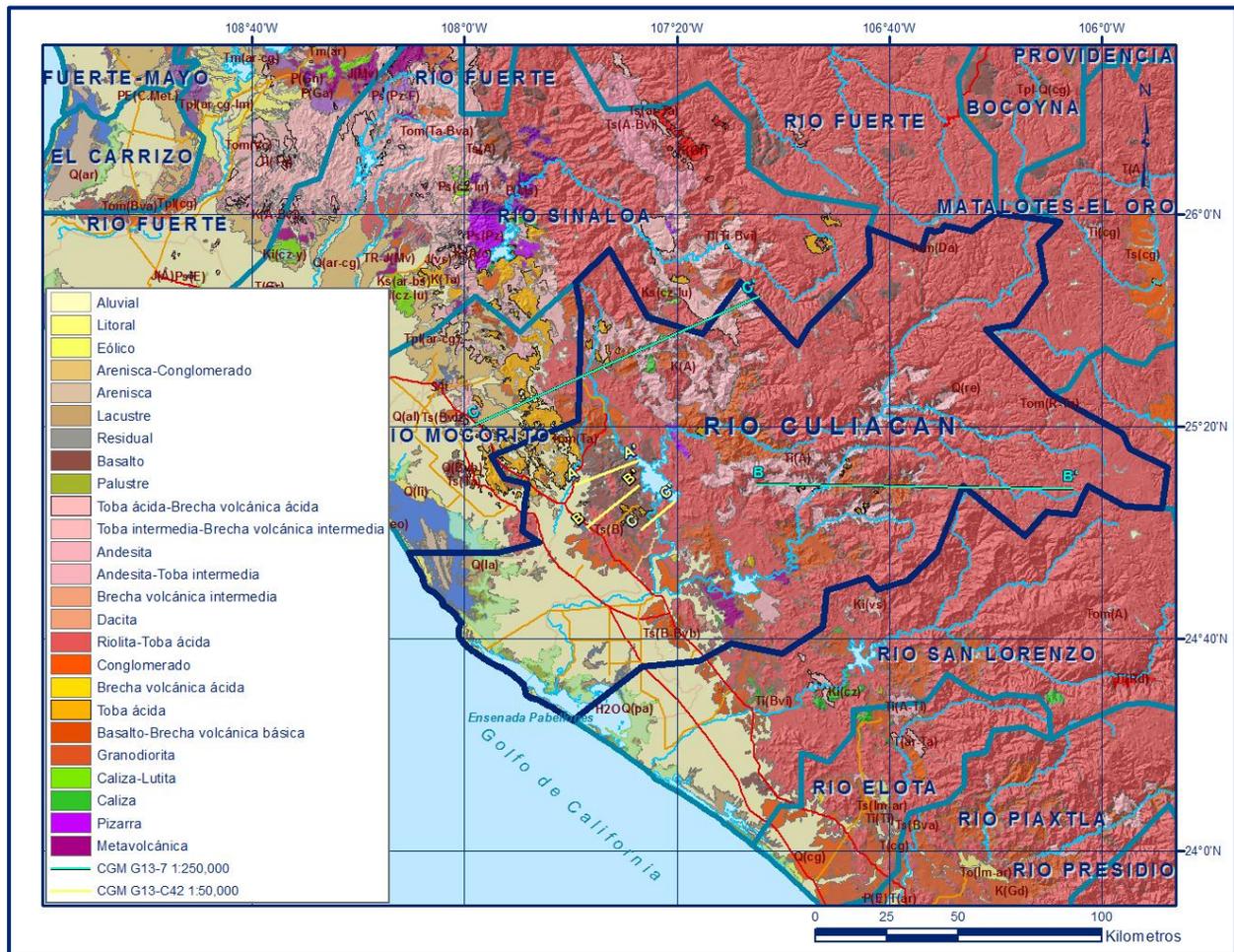


Figura 2. Geología general del acuífero

## PALEÓGENO

La litología característica de esta unidad inferior son las lavas andesíticas con textura porfídica y afanítica que presentan color violeta, tobas, aglomerados, sedimentos híbridos, andesitas basálticas y en algunas localidades rocas intermedias y ácidas interestratificadas, las cuales se encuentran generalmente alteradas y oxidadas. Sus afloramientos se presentan en forma de colinas bajas y onduladas, intensamente falladas y fracturadas como producto de la intensa deformación y alteración causada por intrusivos, en discordancia angular con las rocas metamórficas y las calizas del paleozoico, y cubiertas por rocas de composición riolítica.

También se presenta una secuencia de rocas volcánicas conformada por andesitas, tobas andesíticas, areniscas tobáceas oxidadas, con escasos afloramientos de dacitas, basaltos, y en menor proporción derrames riolíticos, aglomerados, brechas y



representan el intervalo comprendido entre la parte superior del Paleógeno Medio y la inferior del Neógeno. Estas rocas se correlacionan con las del Supergrupo Volcánico Superior (McDowell y Keizer, 1977).

En la porción del acuífero que se localiza en el estado de Durango, las rocas del Supergrupo Volcánico Superior están conformadas en su base por una brecha volcánica riolítica y hacia la cima por tobas riolíticas, con intercalaciones de tobas piroclásticas y ceniza de lapilli, cuya edad se asignó al Oligoceno mediante dataciones radiométricas. La unidad está afectada por cuerpos intrusivos hipabisales de composición diorítica y riolítica de edad Oligoceno y domos riolíticos exógenos de edad Oligoceno Tardío, ambas edades fueron determinadas por medio de sus relaciones de campo.

Sobreyace discordantemente a las secuencias volcánicas anteriores la unidad de tobas riolíticas-ignimbritas, que forma parte del Grupo El Salto-Espinazo, de edad Neógeno Mioceno determinada por medio de dataciones radiométricas. Estas rocas se encuentran afectadas por una unidad de forma cómica, de composición riolítica, conocida como Las Adjuntas, cuya edad es Mioceno Temprano, según datación radiométrica de K-Ar de  $27.7 \pm 0.3$  Ma.

El Neógeno clástico está conformado por un espesor considerable de limos, areniscas tobáceas y conglomerados, con horizontes delgados de piroclastos y en ocasiones con lavas. Las rocas de esta unidad descansan en discordancia sobre rocas más antiguas. Frecuentemente su contacto es tectónico, en otros descansa en contacto erosional sobre rocas de la unidad intrusiva ácida. La edad de las rocas de la base del paleógeno neógeno y las de la unidad paleógena inferior volcánica, o unidad paleógena ácida no varían mucho, lo más probable es que representen una transición entre la mayoría de las unidades paleógeno neógenas, tanto vertical como lateralmente.

### **Conglomerado Polimítico**

Secuencia conglomerática que rellena las depresiones de los valles y presenta intercalaciones de basaltos. El conglomerado está constituido por clastos mal clasificados de variada composición y tamaño, de 1 a 20 cm. La composición de los clastos está en función del paquete rocoso que lo delimita, se aprecia cierta gradación y alternancia en la secuencia de depósito que gradada de finos a gruesos, aunque en la mayoría de los casos se manifiesta como depósito caótico. Los clastos son de color gris claro-amarillento a rojizo, angulosos y subangulosos, de tamaño variable, cementados

por una matriz areno-arcillosa, areno-tobácea y carbonatada de pigmentación rojiza. Considerando su posible correlación con la Formación Báucarit, se puede considerar que la secuencia pertenece a una facies clástica que comprende conglomerados polimícticos y areniscas, asociados a la formación de un abanico aluvial. Por otro lado, su origen también se asocia al proceso distensivo que dio origen a las depresiones y por consiguiente a los clásticos que rellenan estas fosas.

## **CUATERNARIO**

### **Formación Guadiana**

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 Saltito de La Constancia. Está constituida por derrames de brecha basáltica; basalto de color oscuro en superficie fresca que intemperiza a café oscuro, de textura afanítica con estructura vesicular, con presencia de olivino de color amarillo verdoso; su localidad tipo se encuentra en la población de Cárdenas, localizada al SW de la ciudad de Durango, en donde se encuentra constituida exclusivamente por gravas con lentes arenosos, con un espesor que varía de 6 a 12 m. Por otra parte, es sobreyacida por sedimentos aluviales recientes, distinguiéndose de éstos por su textura gravillenta y arenosa de color café claro parcialmente cementados por caliche, así como por la presencia de huesos y dientes de vertebrados de edad Pleistoceno.

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 con cristales de olivino y ferromagnesianos.

## **DEPOSITOS SEDIMENTARIOS**

Los sedimentos de esta edad son los que cubren la mayor superficie de la porción media y llanura costera del acuífero. Están conformados por diferentes unidades. Depósitos conglomeráticos de talud, pie de monte y abanicos aluviales que se localizan hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas; están constituidos por peñascos, bloques y guijarros de composición variable.

Las gravas y conglomerados que constituyen a los abanicos aluviales y depósitos de talud son fragmentos angulosos y redondeados, de 20 cm hasta 1.0 m de diámetro, de composición volcánica intrusiva contenidos en una matriz arenosa o tobácea y ocasionalmente bien cementadas. Por su origen presentan una mala clasificación lo que ocasiona que su permeabilidad sea variable, dependiendo del contenido arcilloso y grado de compactación. Morfológicamente, se presentan como lomeríos de suave relieve.

Las llanuras deltáicas se conforman de conglomerados, sedimentos arenosos y arenolimosos que presentan una clasificación pobre y estratificación cruzada, en ocasiones con abundante materia orgánica. Las arenas y arcillas de origen fluvial, son depositadas por los ríos y arroyos al divagar en la planicie costera antes de desembocar en el mar. Forman parte de la llanura costera y presentan un relieve suave caracterizado por lomeríos remanentes de la superficie preexistente. Incluye también las acumulaciones arenosas de origen eólico, que han quedado fuera de la fuente de aporte de sedimento y que han sido fijadas por la vegetación, formando dunas estabilizadas, o bien por la acción de las aguas circulantes.

Los depósitos aluviales se ubican en la porción media del valle y consisten de gravas y arenas de variada granulometría, así como limos y arcillas de origen aluvio-fluvial. Estos depósitos aluviales junto con los de la llanura deltaica constituyen el acuífero principal, de permeabilidad variable cuyo espesor total no se ha determinado.

Los depósitos arenosos de origen marino que indican el carácter progradante de la línea de costa (bermas o terrazas) fueron formados por la acción del oleaje y mareas que aportan los sedimentos hacia la alta playa y paulatinamente quedan fuera del alcance de la erosión marina. En general, están constituidos por arena de grano medio a fino, con dimensiones medias de 0.5 a 12 mm, con presencia de conchas fracturadas de pelecípodos en cantidades variables.

Sedimentos limosos y arcillosos constituyen lodos negros ricos en materia orgánica (depósitos palustres) que se localizan en las zonas bajas, próximas a la desembocadura de los ríos y lagunas y están sujetos a la acción de las mareas y al flujo del río. Los sedimentos arenosos y arenolimosos se localizan en albardones, las gravas en el lecho de los canales fluviales y ocasionalmente en la llanura de inundación. Por último, en amplias áreas bajas sin relieve, localizadas tierra adentro de las lagunas y barreras litorales inundables por la acción de las mareas, se presentan sedimentos finos, arenas

de grano medio a fino y limos que conforman llanuras de inter-marea; identificadas en su límite superior por un pequeño escarpe de erosión causado por la acción erosiva de la marea ascendente y oleaje por viento.

#### **4.2. Geología estructural**

La interpretación de imágenes de satélite define lineamientos orientados en dos direcciones: NW-SE y SE-NW, ocasionalmente E-W. El segundo patrón desplaza y modifica la orientación de las estructuras NW-SE, constituyendo una serie de bloques desplazados unos con respecto a otros.

Se interpreta que estos lineamientos están estrechamente relacionados a la apertura del Golfo de California y que pudieran ser la continuidad en el continente de fallas transformantes. Las estructuras anulares observadas son generalmente abiertas, con diámetros que varían en un rango de 1 a 20 km; posiblemente están relacionadas a calderas o intrusiones dómicas. Estas estructuras son muy importantes desde el punto de vista minero, ya que gran número de evidencias de mineralización o prospectos se encuentran en sus bordes

Estructuralmente la región está afectada principalmente por un sistema de fallas normales orientadas NW-SE, que constituyen una serie de fosas y pilares en forma escalonada, como se observa en el camino de Tabal a Santa Cruz de Alaya, en general, en el límite de la Planicie Costera y la Sierra Madre Occidental. En algunas zonas ubicadas al oriente y centro de la región, se presenta este mismo fallamiento, pero combinado con desplazamientos laterales, como se observa al sureste de la población de Cosalá y en Guadalupe de los Reyes, Sinaloa. El segundo patrón estructural está definido por un fallamiento con dirección NE-SW, representado por los ríos San Lorenzo, Elota y Verde, provocando desplazamientos de bloques e interrupción de estructuras. Al oriente de la zona se presenta una estructura anular que está relacionada a intrusiones subvolcánicas mineralizadas (Carta Geológico-Minera Culiacán G13-10. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

La interpretación de imágenes de satélite y datos de campo revelan que estructuralmente la región está afectada por un patrón de fallas normales NW-SE, que constituyen una serie de fosas tectónicas en forma escalonada, ocasionalmente con desplazamientos laterales. En menor proporción existe fallamiento inverso, representado al noroeste por la cabalgadura de las rocas paleozoicas sobre las cretácicas; el segundo patrón de fallamiento presenta dirección NE-SW y está evidenciado por los ríos Tamazula, Humaya y Mohinora-Sinaloa, provocando

desplazamientos de bloques e interrupción y formación de estructuras, como el caso del colapso de la caldera que se localiza al sureste (Carta Geológico-Minera “Pericos” G13-7. Escala 1:250 000, SGM, 1999).

Se identificaron 3 tipos de deformación: dúctil, dúctil-frágil y frágil. La dúctil se presenta como foliación y lineación mineral en las rocas intrusivas cretácicas, La foliación tiene rumbo general NW30°SE, con buzamiento al SW. La deformación dúctil-frágil, producto de la Orogenia Laramide, se manifiesta en la unidad de rocas cristalinas como micropliegues en una franja de deformación que se ubica en la porción noroeste, la cual tiene 2 km de ancho aproximadamente, y se extiende al norte hacia Badiraguato.

La deformación frágil se manifiesta en al menos dos sistemas: El primero y más antigua es de edad post-Paleoceno y afecta intensamente a las unidades de rocas intrusivas y volcánicas andesíticas del Paleoceno; presenta rumbo general NW-SE y está relacionado a la fase distensiva de la llamada Orogenia del Terciario Medio. El sistema parece haberse reactivado en el Mioceno cuando ocurrió vulcanismo riolítico y basáltico en el marco de la fase de distensión conocida como Cuencas y Sierras. Algunas de las estructuras identificadas son las fallas Ojo de Agua, El Manguito y La Vainilla. El segundo sistema de fallas tiene un rumbo general al NE y es principalmente de tipo transtensivo, con desplazamiento lateral que afecta y desplaza al sistema de orientación al NW. A este sistema se asocia la formación de cuencas de transtensión o pull-apart, algunas de las cuales se infieren. En otras estructuras se identificó movimiento de tijera como es el caso de las fallas El Aguamal, Chanteco y La Talega. La continuidad de los sistemas NW y NE se interrumpen por la cubierta de basalto. En esa unidad se identificaron las fallas María, Guaco y Los Algodones, con trazas claramente definidas y que seguramente corresponden a un evento estructural tardío activo durante el Cuaternario (Carta Geológico-Minera “Presa Adolfo López Mateos” G13-C42. Escala 1:50 000, SGM, 2013).

### **4.3. Geología del subsuelo**

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos, de pie de monte y lacustres, de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas preexistentes, así como por conglomerados polimícticos que rellenan los valles y constituyen el lecho y llanura de inundación de los ríos Culiacán, Tamazula y Humaya. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las



## **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, fluviales, eólicos, de pie de monte y lacustres, así como por conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar algunas centenas de metros en el centro de la planicie. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que destacan las tobas ácidas, riolitas, ignimbritas y andesitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

### **5.2. Parámetros hidráulicos**

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2010, se ejecutaron 3 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en tapa de abatimiento como de recuperación, 6 en el acuífero vecino Río San Lorenzo y 3 en el acuífero Río Mocorito, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica; y 23 pruebas más realizadas en el acuífero Río San Lorenzo (SARH,1978). De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que los valores promedio de transmisividad varían entre  **$1.0 \times 10^{-3}$**  y  **$5.0 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s**, y la conductividad hidráulica registra valores de  **$1.0 \times 10^{-5}$**  a  **$5.0 \times 10^{-4}$  m/s, (0.9 a 43.2 m/d)**, que se asocian a sedimentos de granulometría fina a media.

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, por correlación geohidrológica con acuíferos vecinos que tienen la misma constitución geológica, para fines del balance se adoptó un valor de **0.1**.

Los valores más bajos de estos parámetros se asocian a los sedimentos clásticos de granulometría más fina y los más altos a los depósitos aluviales de mayor granulometría que conforman el cauce de los ríos, arroyos y sus planicies de inundación.

### **5.3. Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con los registros históricos durante el periodo 2004-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2013-2019 que tiene mayor y mejor

distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2019.

## 5.4. Comportamiento hidráulico

### 5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de algunos centímetros a 8m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona costera y del cauce de ríos y arroyos hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle. Los niveles estáticos más someros, menores de 2 m, se registran en toda la zona costera, desde donde se incrementan gradualmente, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 6 a 8 m, se presentan hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas que delimitan la planicie costera, entre los poblados Caimanero que se localiza en la porción norte, Estación San Rafael y Costa Rica, que se ubican en el extremo suroriental; así como también en las inmediaciones del cauce del Río Culiacán, entre Navolato y El Potrero (figura 4).

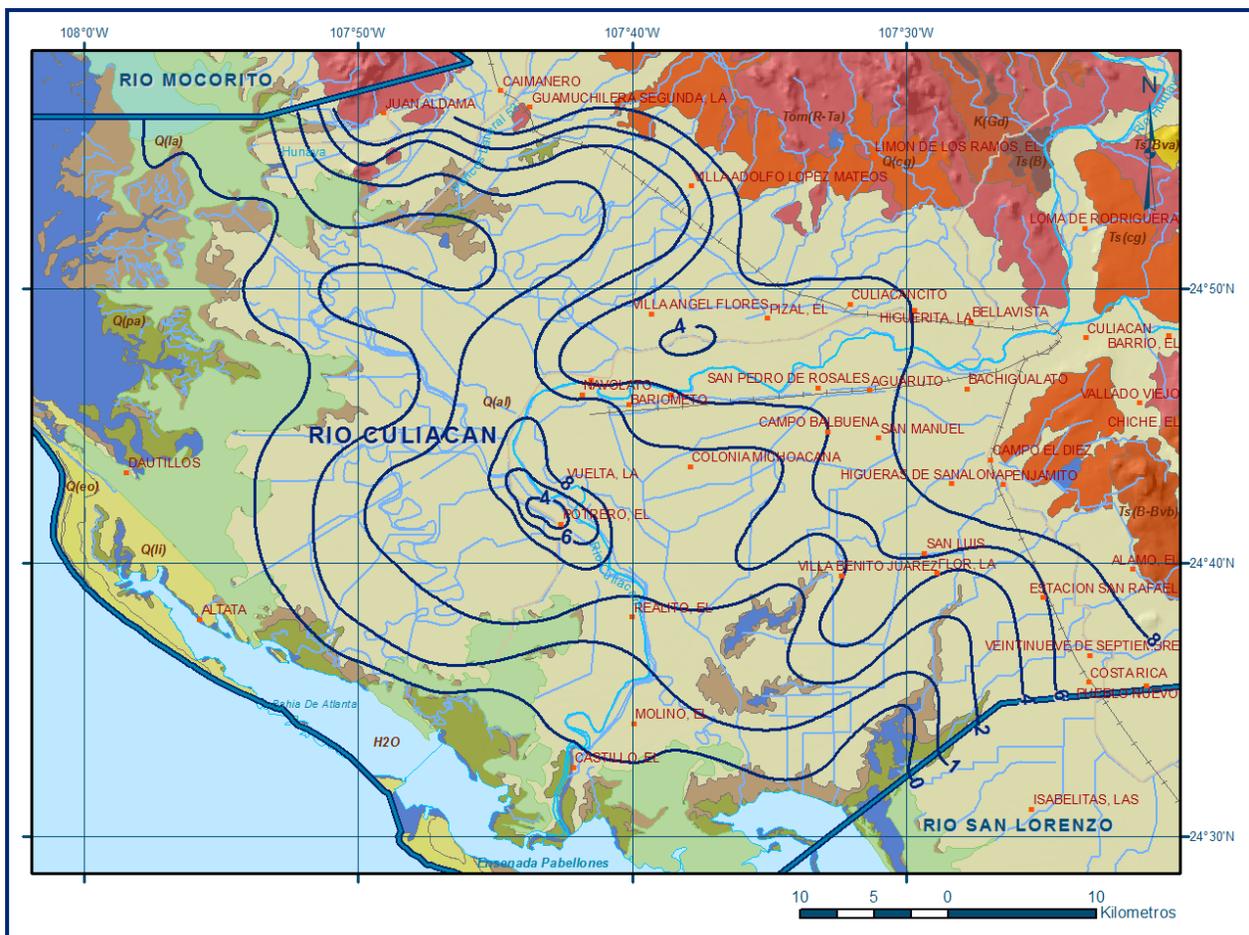


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

### 5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 2 a 30 msnm, que se incrementan de la zona costera hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero y aguas arriba a lo largo del cauce de los ríos Culiacán, Tamazula y Humaya. Los valores más altos, de 20 a 30 msnm, se registran en la porción norte del valle, entre los poblados Caimanero, Culiacancito y Bachigualato, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la zona costera. Los valores más bajos, de 2 a 4 msnm, se presentan en toda la zona costera. La dirección preferencial del flujo subterráneo es noreste-suroeste y norte-sur, paralela a la dirección de escurrimiento del Río Culiacán y de la red de drenaje superficial. No se observan conos de abatimiento causados por la extracción del agua subterránea (figura 5).

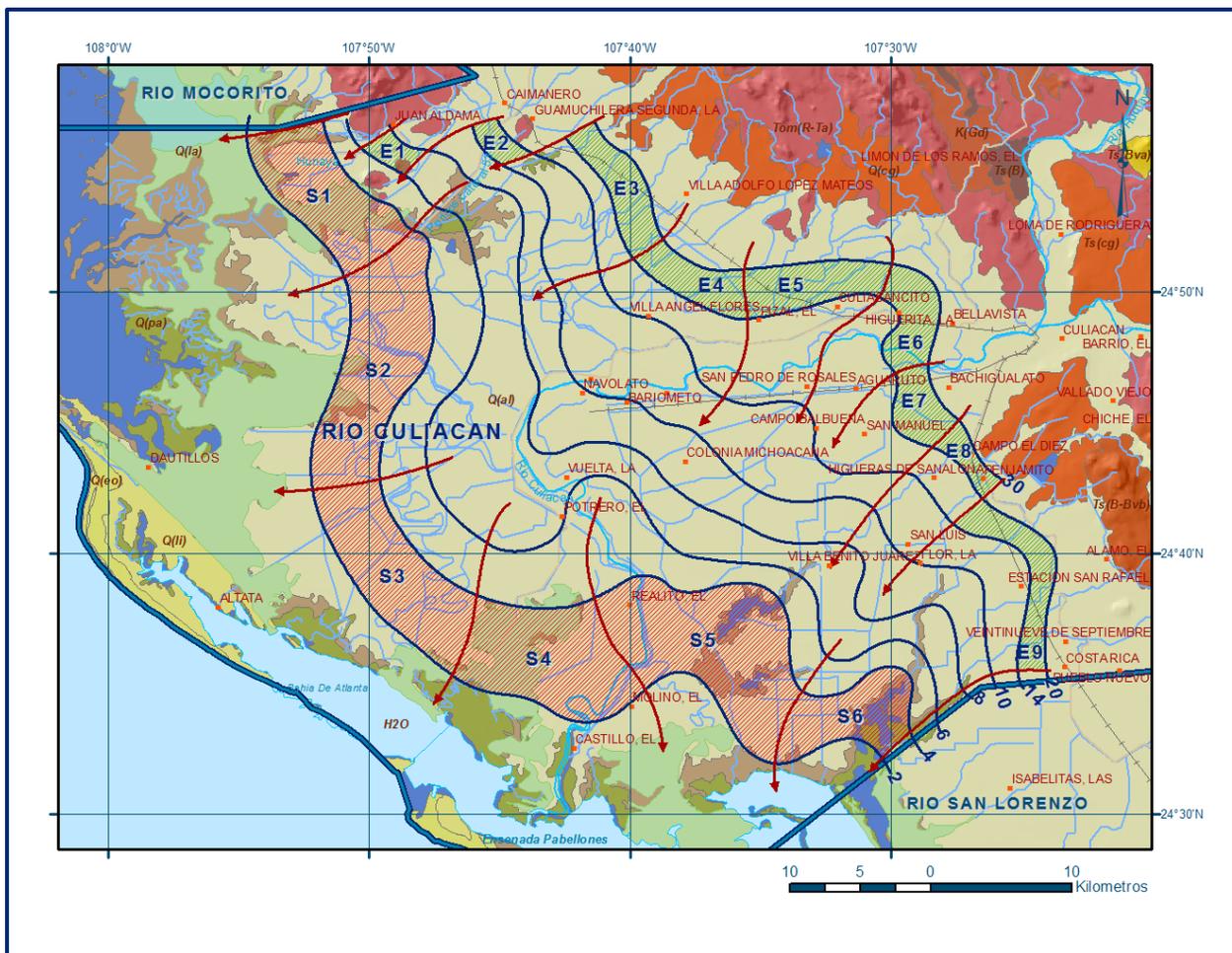


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2013-2019 registró recuperaciones en la posición de los niveles del agua subterránea en la mayor parte de la zona de explotación, debido a que en los últimos años ocurrieron precipitaciones superiores a la media anual y porque el volumen de recarga es superior al de extracción. Sólo se midieron abatimientos locales de 1.0 a 1.5 m, es decir 0.17 a 0.25 m anuales, en la zona comprendida entre los poblados La Vuelta, Colonia Michoacana y El Potrero. Los valores de recuperación varían de 0.5 a 1.5 m, que representan 0.08 a 0.25 m anuales, y se observaron entre las poblaciones La Flor, El Realito, San Pedro de Rosales y Villa Ángel Flores, con valores muy locales de 3 m, es decir 0.5 m anuales, al noreste de Culiacancito. En la zona que se ubica hacia el límite con los acuíferos Río Mocorito y Río San Lorenzo y en la zona costera, no se registran cambios en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

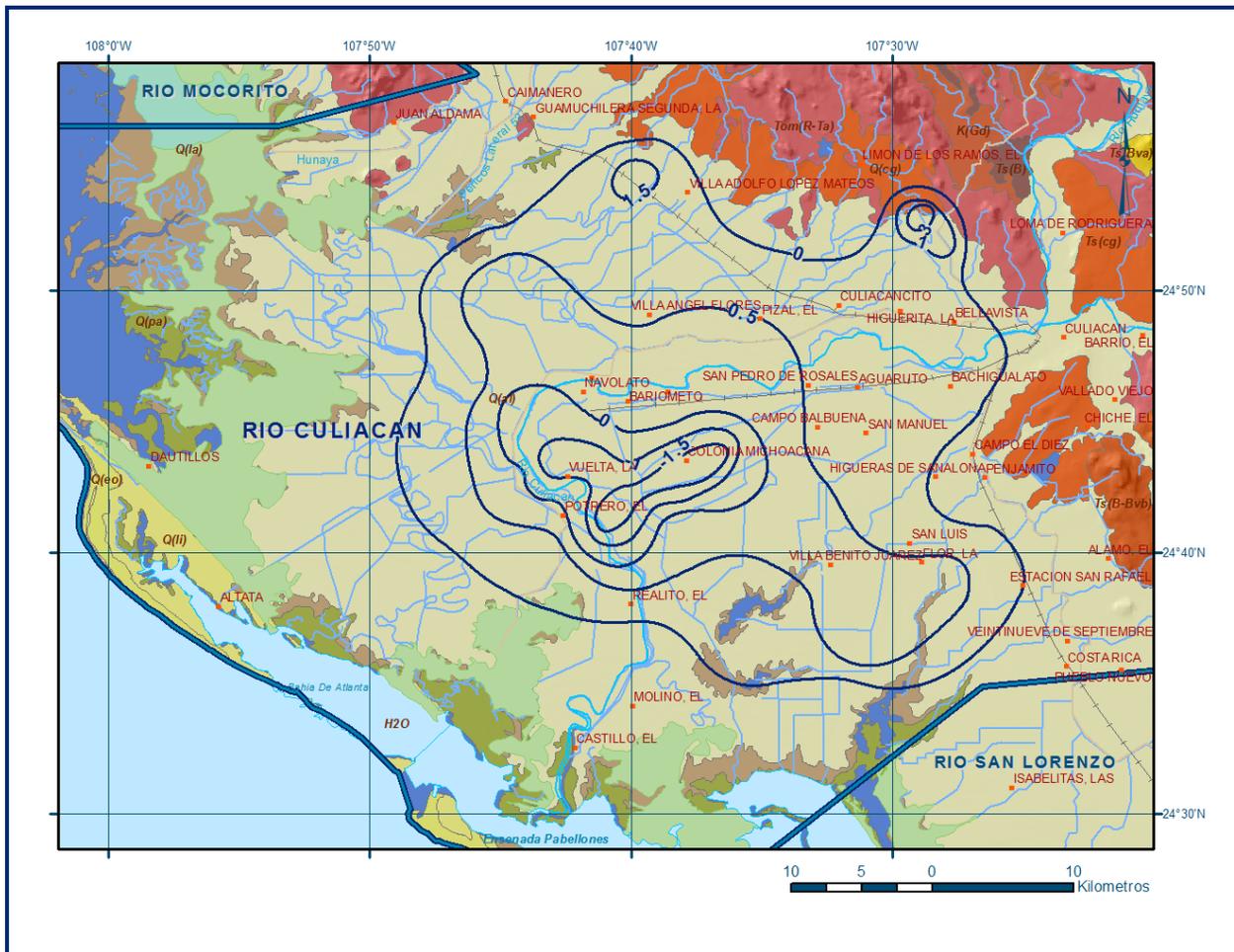


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2013-2019)

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

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron muestras en 5 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, nitratos, fosfatos, coliformes fecales y totales, cadmio, cobre, cromo y hierro. En 700 pozos se realizaron determinaciones in situ de temperatura, conductividad eléctrica y concentración de STD. La temperatura del agua varió de 25.0 a 27.0°C y el pH de 6.6 a 7.3

De acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos, se establece que las concentraciones de los algunos iones y elementos de algunas muestras sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos.

La concentración de STD presenta valores extremos que varían de 400 a 2,800 ppm, algunos de los cuales sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 ppm establecido en la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano. De manera general, predominan las concentraciones de 500 ppm en las inmediaciones del río, mientras que los valores entre 1000 y 2800 ppm se aprecian en las zonas cercanas a la costa. Los parámetros cuyas concentraciones superan el LMP establecido en la norma mencionada son alcalinidad total, sólidos totales disueltos, cloruros, nitratos, sodio, calcio y fluoruros.

Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a salobre, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 700 a 5,000 $\mu$ S/cm. Los valores más bajos de STD y conductividad eléctrica se registran en la región noreste del acuífero, y se incrementan en dirección general hacia el suroeste, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Concentraciones altas de STD son originadas por intercambios iónicos de evaporitas y material predominantemente arcilloso; en la franja costera, la baja resistividad de estratos poco profundos, sugiere la presencia de agua salobre.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), 3 de las muestras analizadas se clasifican como C<sub>2</sub>-S<sub>1</sub>, que representa agua con

salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable, apta para la agricultura sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos, y 2 muestras más como C<sub>3</sub>-S<sub>1</sub>, que representa agua con salinidad alta y bajo contenido de sodio intercambiable cuyo uso se recomienda en suelos con buen drenaje, que pueden requerir lavados periódicos o ser utilizada en cultivos tolerantes a la salinidad. Con respecto a las familias del agua por ion dominante, se presentan las familias bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-sódica que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia que han circulado a través de rocas volcánicas, en las zonas de recarga ubicadas hacia las estribaciones de la sierra. En la zona costera se presenta la familia del agua cálcica-clorurada que muestra la influencia del agua marina.

Se identificó la presencia de contaminación difusa en las zonas agrícolas ocasionada por utilización de fertilizantes, agroquímicos y retornos de riego, así como por la descarga de aguas residuales sin tratamiento de algunos centros de población y de las actividades pecuarias. Las 5 muestras presentan concentraciones de coliformes fecales y totales mayores al límite máximo permisible (LMP) que establece la norma mexicana, asociada a este tipo de contaminación.

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

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2010, se registraron un total de 991 aprovechamientos, de los cuales 725 corresponden a pozos, 258 a norias, 4 manantiales, 3 galerías filtrantes y 1 Jagüey, del total de aprovechamientos, 758 se encuentran activos y 233 inactivos. De las obras activas, se utilizan en la agricultura, para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, para uso doméstico-pecuario y para otros usos.

El volumen de extracción calculado es de **168.9 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 89.9 hm<sup>3</sup> (53.2%) se destinan al uso agrícola, 70.8 hm<sup>3</sup> (41.9%) al uso público-urbano, 3.6 hm<sup>3</sup> (2.1%) para uso industrial, 4.4 hm<sup>3</sup> (2.6%) para satisfacer las necesidades del doméstico-pecuario y 0.2 hm<sup>3</sup> (0.1%) a otros usos.

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

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2013-2019, en una superficie de **1,535 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento

del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

### **7.1. Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri).

#### **7.1.1. Recarga vertical (Rv)**

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V(S)$ ) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

$$\mathbf{Rv + Ri + Eh - B - Sh - ETR = \pm \Delta V(S) (I)}$$

Donde:

**Rv:** Recarga vertical

**Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal

**Ri:** Recarga incidental

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

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

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

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

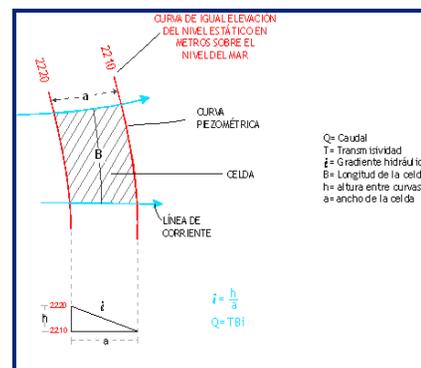
La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella 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:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

- Q:** Caudal (m<sup>3</sup>/s)  
**T:** Transmisividad (m<sup>2</sup>/s)  
**B:** Longitud de la celda (m)  
**i:** Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **48.5 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	3030	1915	2	0.0010	0.0100	0.0316	1.0
E2	3460	1910	4	0.0021	0.0150	0.1087	3.4
E3	9790	2605	10	0.0038	0.0060	0.2255	7.1
E4	7135	2800	10	0.0036	0.0060	0.1529	4.8
E5	9265	3100	10	0.0032	0.0060	0.1793	5.7
E6	7345	3000	10	0.0033	0.0060	0.1469	4.6
E7	5540	3020	10	0.0033	0.0150	0.2752	8.7
E8	4955	1710	10	0.0058	0.0060	0.1739	5.5
E9	13880	1710	6	0.0035	0.0050	0.2435	7.7
<b>TOTAL</b>							<b>48.5</b>

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

### 7.1.3 Recarga incidental(Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, por correlación con acuíferos vecinos, se consideró que un 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo.

De esta manera, tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 847.9 hm<sup>3</sup>, de los cuales 758.0 hm<sup>3</sup> son de agua superficial de las presas y 89.9 hm<sup>3</sup> de agua subterránea, al aplicar el 20% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 169.6 hm<sup>3</sup> anuales.

Por otra parte, las pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varían según la zona y su estado físico, para este caso se consideró también un coeficiente de infiltración de 20%, que aplicado al volumen destinado al uso público-urbano de 70.8 hm<sup>3</sup> resulta un volumen de 14.2 hm<sup>3</sup> anuales. Por lo tanto,  $R_i = 169.6 + 14.2 = 183.8$ . **Ri = 183.8 hm<sup>3</sup>/año.**

## 7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros.

### 7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **168.9 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **12.7 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	11000	4760	2	0.0004	0.0150	0.0693	2.2
S2	16810	5560	2	0.0004	0.0150	0.0907	2.9
S3	13840	4890	2	0.0004	0.0150	0.0849	2.7
S4	9940	7415	2	0.0003	0.0150	0.0402	1.3
S5	14840	7755	2	0.0003	0.0150	0.0574	1.8
S6	8415	4350	2	0.0005	0.0150	0.0580	1.8
<b>TOTAL</b>							<b>12.7</b>

### 7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 24.9 °C y 656.5 mm de la estación Culiacán, representativa del área de balance. Con ellos se

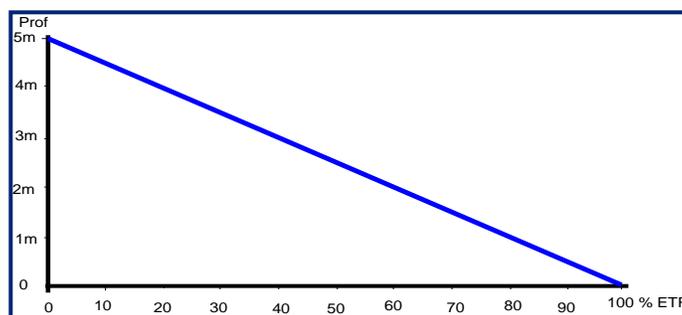
obtiene una lámina de evapotranspiración de 640.6mm anuales, como se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	24.9		
P(mm) =	656.5	P <sup>2</sup> =	430992.25
L =	1694.41245	L <sup>2</sup> =	2871033.55
ETR (mm)	640.6		

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 evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR =241.3 hm<sup>3</sup>/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm <sup>3</sup> /año)
4	4	8.4	0.6406	0.2	1.1
0 a 1	0.5	130.9	0.6406	0.9	75.5
1 a 2	1.5	135.8	0.6406	0.7	60.9
2 a 4	3	405.0	0.6406	0.4	103.8
	<b>Total</b>	<b>680.1</b>			<b>241.3</b>

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

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2013-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y = 0.1$ , se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

**$\Delta VS$ :** Cambio de almacenamiento en el período analizado

**S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

**A:** Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

**h:** Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de 16.4 hm<sup>3</sup>, es decir, un promedio anual de 2.7 hm<sup>3</sup>. Por lo tanto,  **$\Delta V(S) = 2.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$** .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2013-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Sy	ΔV(S) (hm <sup>3</sup> /año)
1.5	1.5	6.2	0.1	0.9
3	3.0	2.3	0.1	0.7
1 a 3	2.0	8.2	0.1	1.6
-1.5	-1.5	16.7	0.1	-2.5
-1 a -1.5	-1.25	37.3	0.1	-4.7
0 a -1	-0.5	74.2	0.1	-3.7
0.5 a 0	0.25	342.2	0.1	8.6
0.5 a 0	0.25	621.4	0.1	15.5
	<b>TOTAL</b>	<b>1108.5</b>	<b>TOTAL</b>	<b>16.4</b>
		<b>Promedio anual</b>		<b>2.7</b>

### Solución de 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:

$$R_v = B + S_h + ETR - E_h - R_i \pm \Delta V_S$$

$$R_v = 168.9 + 12.7 + 241.3 - 48.5 - 183.8 + 2.7$$

$$R_v = 193.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 193.4 + 48.5 + 183.8$$

$$R = 425.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

**DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

**R** = Recarga total media anual

**DNC** = Descarga natural comprometida

**VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

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

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **425.6 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales 241.8 hm<sup>3</sup> son recarga natural y 183.8hm<sup>3</sup> recarga incidental.

### 8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso del acuífero Río Culiacán, su valor es **193.7 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 12.7 hm<sup>3</sup> corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar para mantener la posición de la interface marina, y 181.0 hm<sup>3</sup> al 75% de la ETR para preservar los ecosistemas costeros y ribereños. **DNC = 193.7hm<sup>3</sup> anuales.**

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

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

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **285'346,033 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

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

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 425.6 - 193.7 - 285.346033 \\ \text{DMA} &= - 53.446033 \text{hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible de para otorgar nuevas concesiones; su déficit es de **53'446,033 m<sup>3</sup>**

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 2000. Reactivación de redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos de los valles Río Mocorito, Río Culiacán, Río Presido, Río San Lorenzo y Río Fuerte, Sinaloa. Realizado por Peritos Supervisores y Constructores, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2003. Estudios de actualización hidrogeológica de la zona Río Culiacán-Río San Lorenzo, Sinaloa. Realizado por Diseño e Ingeniería Aplicada, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio geohidrológico de los acuíferos de los ríos Culiacán, Mocorito, Sinaloa y Fuerte, en el estado de Sinaloa. Realizado por SPIC, Servicios y Proyectos de Ingeniería Civil, S.A. de C.V:

Comisión Nacional del Agua, 2013. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Culiacán, estado de Sinaloa.

Comisión Nacional del Agua, 2014. Integración del estudio técnico justificativo de los acuíferos Río Elota clave 2506, Río Piaxtla clave 2507, Río Quelite clave 2508, Río Baluarte clave 2510 y Laguna Agua Grande clave 2512, en el estado de Sinaloa. Realizado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. (SIIDSA)

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Norte, 2017. Información piezométrica del acuífero Río Culiacán, estado de Sinaloa.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1978. Evaluación de acuíferos en la zona Culiacán-San Lorenzo, en el estado de Sinaloa. Realizado por Geohidrológica Mexicana, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Residencia de Geohidrología, 1985. Actualización de condiciones piezométricas en la zona Culiacán-San Lorenzo.

Servicio Geológico Mexicano, 1999, Carta Geológica-Minera G13-7 "Pericos", escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 1999, Carta Geológica-Minera G13-10 "Culiacán", escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2013, Carta Geológica-Minera G13-C42 “Presa Adolfo López Mateos”, escala 1:50,000.