



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO TECORIPA (2639), ESTADO DE
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

CONTENIDO

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	6
3.1. Provincias fisiográficas.....	6
3.2. Clima	6
3.3. Hidrografía.....	6
4. GEOLOGÍA.....	7
4.1. Estratigrafía	8
4.2. Geología estructural.....	11
4.3. Geología del subsuelo.....	11
5. HIDROGEOLOGÍA	12
5.1. Tipo de acuífero.....	12
5.2. Parámetros hidráulicos	13
5.3. Piezometría.....	13
5.4. Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	13
5.4.2. Elevación del nivel estático	14
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	15
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	16
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	16
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	17
7.1. Entradas.....	18
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	18
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	18
7.2. Salidas	20
7.2.1. Bombeo (B)	20
7.2.2. Salida por flujo subterráneo horizontal (Sh)	20
7.2.3. Evapotranspiración (ETR)	20
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)	21
8. DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R)	23
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	23
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	23
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	24
9. BIBLIOGRAFÍA	25

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 del Río Tecoripa, definido con la clave 2639 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro oriental del Estado de Sonora entre los paralelos 28° y 29° de latitud Norte y entre los meridianos 109° 30' y 110° 30' de longitud Oeste, cubriendo una superficie de 2,480 km².

Colinda con los acuíferos Río Mátape y Soyopa, al norte; Ónavas, al este; Cumuripa y Agua Caliente, al sur; y al oeste el acuífero Valle de Guaymas, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora (figura 1).

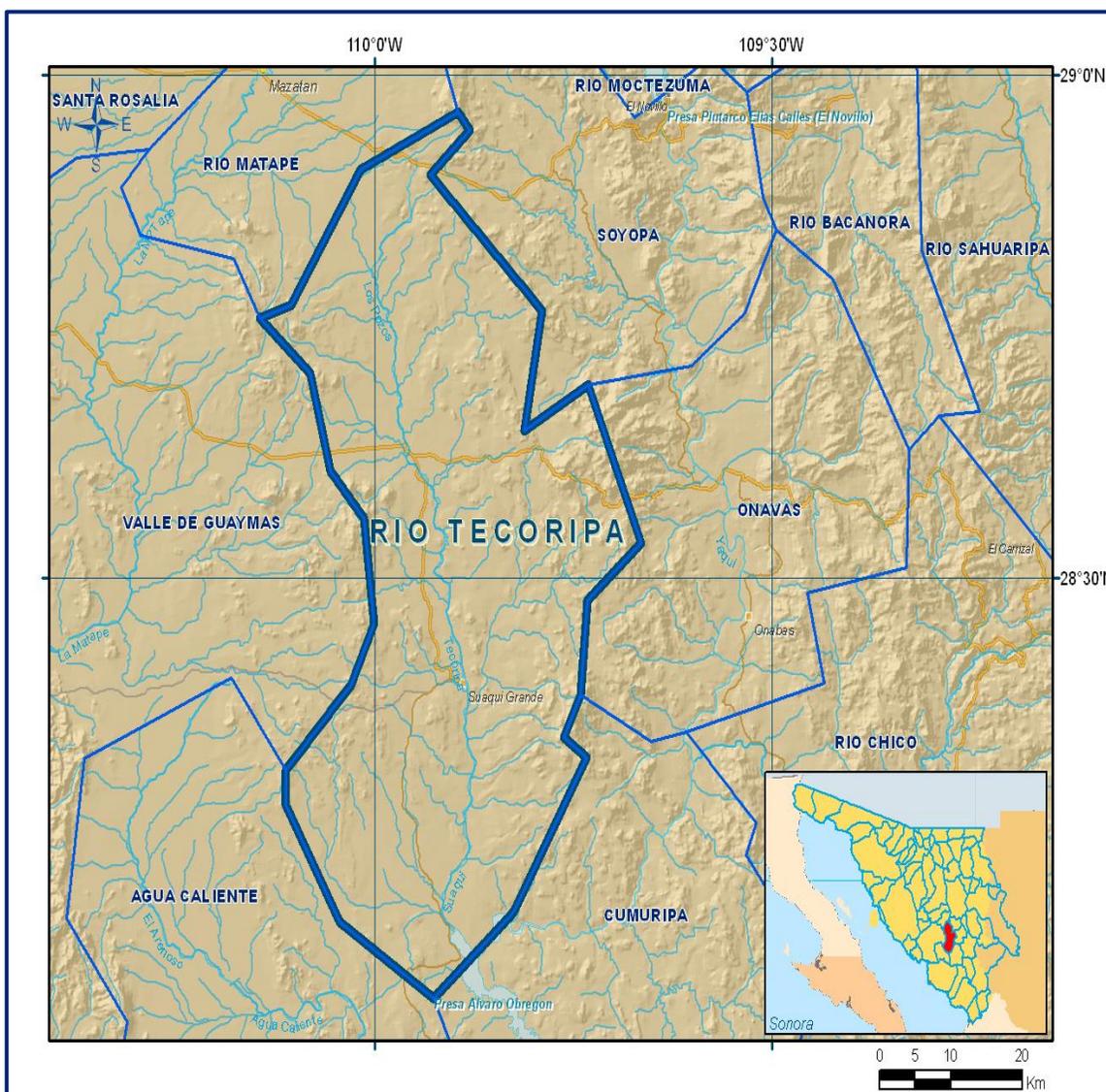


Figura 1. Localización del acuífero.

Geopolíticamente comprende total o parcialmente los siguientes municipios: La Colorada, San Javier, Mazatán, Villa Pesqueira, Suaqui Grande, Cajeme y, en una pequeña proporción de Guaymas. La poligonal simplificada que delimita el acuífero Río Tecoripa se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

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

ACUIFERO 2639 RIO TECORIPA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	109	43	53.6	28	41	319
2	109	39	55.8	28	32	2.3
3	109	43	59.3	28	28	40.5
4	109	44	27.7	28	23	2.1
5	109	45	43.0	28	20	29.4
6	109	44	0.9	28	19	15.5
7	109	49	33.2	28	10	0.6
8	109	55	35.3	28	4	54.5
9	110	2	39.2	28	9	25.8
10	110	6	41.2	28	16	26.3
11	110	6	41.8	28	18	30.3
12	110	1	46.0	28	23	40.1
13	110	0	15	28	27	13.6
14	110	0	49.9	28	33	33.1
15	110	3	21.2	28	36	210
16	110	4	52.6	28	42	14.0
17	110	8	41.3	28	45	28.3
18	110	6	20.4	28	46	14.5
19	110	1	4.1	28	54	22.7
20	109	53	43.3	28	57	45.5
21	109	52	49.1	28	56	43.4
22	109	55	50.0	28	54	3.8
23	109	47	22.8	28	45	57.9
24	109	48	44.4	28	38	48.8
1	109	43	53.6	28	41	319

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Río Tecoripa pertenece al Organismo de Cuenca II Noroeste. La porción occidental de su territorio se encuentra sujeta a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero se denomina “Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Sonora,” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de junio de 1967. El segundo es el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, en la parte oeste del meridiano 110° de Greenwich, del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de la aguas del subsuelo, en dicha zona, que no quedaron incluidos en las vedas impuestas en los ordenamientos señalados en el considerando primero de este Decreto”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de septiembre de 1978.

Estos decretos son de tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. La superficie restante del acuífero no se encuentra vedada.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El usuario principal del agua es el agrícola. En el acuífero no se localiza distrito ni unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la región que comprende la superficie del acuífero, se han llevado cabo algunos estudios hidrogeológicos:

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ESTADO DE SONORA, elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en 2005. El estudio consistió en realizar un compendio de las características generales e hidrogeológicas de los acuíferos el estado de Sonora y la elaboración de planos temáticos de clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, así como las configuraciones del nivel estático. Constituye una buena obra de consulta general de los acuíferos.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA OBTENER LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO RÍO TECORIPA, MUNICIPIO DE SUAQUI GRANDE, SONORA, elaborado por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos para Minera Corum, S. A. de C. V. en 2007. Este estudio se realizó con el propósito de evaluar la recarga media anual que recibe el acuífero. Como parte de las actividades de campo para el planteamiento y estimación de las componentes del balance de aguas subterráneas, se llevaron a cabo el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos, ejecución de sondeos geofísicos y toma de muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente.

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. Provincias fisiográficas

El territorio del Estado de Sonora queda comprendido dentro de cuatro provincias o regiones fisiográficas del país: Llanura Sonorense, en el noroeste y oeste; Sierra Madre Occidental, en la parte oriental; Sierras y Llanuras del Norte, en la porción boreal; y Llanura Costera del Pacífico, en el sur.

De estas cuatro provincias, el acuífero río Tecoripa se encuentra principalmente dentro la provincia Sierra Madre Occidental, subprovincia *Sierras y Valles del Norte*, y en menor proporción en la provincia Llanura Sonorense, subprovincia *Sierras y Llanuras sonorenses*.

3.2. Clima

Las condiciones geomorfológicas de la cuenca del río Yaqui, según Thornthwaite y Köppen, dan lugar a la presencia de climas secos, templados y desérticos, con vegetación xerófita, de bosques y praderas. Las lluvias son irregulares y se manifiestan en cualquier estación del año, aun cuando en algunos sitios son periódicas y con invierno seco. Las temperaturas medias anuales registradas varían entre 12.4° C y 25.8° C, en relación directa a las variaciones topográficas.

Para la cuenca del río Tecoripa se manifiestan dos tipos de climas: el clima semiseco, con régimen de lluvias es de verano y porcentaje de lluvias invernales mayor a 10.2; y el clima seco con régimen de lluvias en verano, cálido, con temperatura media anual mayor de 22° C.

Con los datos de las estaciones climatológicas, mediante el método de los Polígonos de Thiessen, se obtuvo una temperatura media anual de 22.9° C, para el periodo 1989-2005 en la cuenca del río Tecoripa. La temperatura media más baja se registra en la estación climatológica Tecoripa con 22.0° C, mientras que la más cálida se presenta en la presa Álvaro Obregón, al sur de la cuenca analizada, con 26.2° C anuales. De la misma manera, mediante el método de los Polígonos de Thiessen, se determinó que el valor de la precipitación media anual en la cuenca del río Tecoripa es de 554.4 mm.

3.3. Hidrografía

El acuífero Río Tecoripa, se encuentra ubicado en la región hidrológica RH-9 "Sonora Sur", dentro de la cuenca Río Yaqui, la subcuenca llamada Río Tecoripa.

El Río Tecoripa, afluente del Río Yaqui, tiene una cuenca de forma alargada en dirección al norte, cuya extensión superficial es de 2,840 km² hasta su descarga en la presa Álvaro Obregón, conocida como “El Oviachic”.

Su topografía es ligeramente accidentada con algunos valles intermontanos en las porciones central y occidental. La única zona con bosques se localiza en una franja ubicada a lo largo del parteaguas oriental.

Colinda al este con una serie de pequeñas corrientes que descargan directamente al colector general; al oeste y norte con la cuenca del río Mátape y al suroeste con la cuenca del arroyo Agua Caliente o Sahuaral. El río Tecoripa se origina a 32 km al oeste de la cortina de la presa Plutarco Elías Calles, a una altitud de 750 msnm.

Su curso general es hacia el sur y pasa por las inmediaciones de Tecoripa, Suaqui Grande y Cumuripa. Aguas abajo de esta última población descarga por la margen derecha en los orígenes del embalse de la presa Álvaro Obregón.

4. GEOLOGÍA

La geología general está representada por un conjunto de rocas de origen sedimentario e ígneo de complejas relaciones estructurales debido a los eventos de deformación que dieron lugar a extensos plegamientos de dirección este-oeste noroeste-sureste (figura 2).

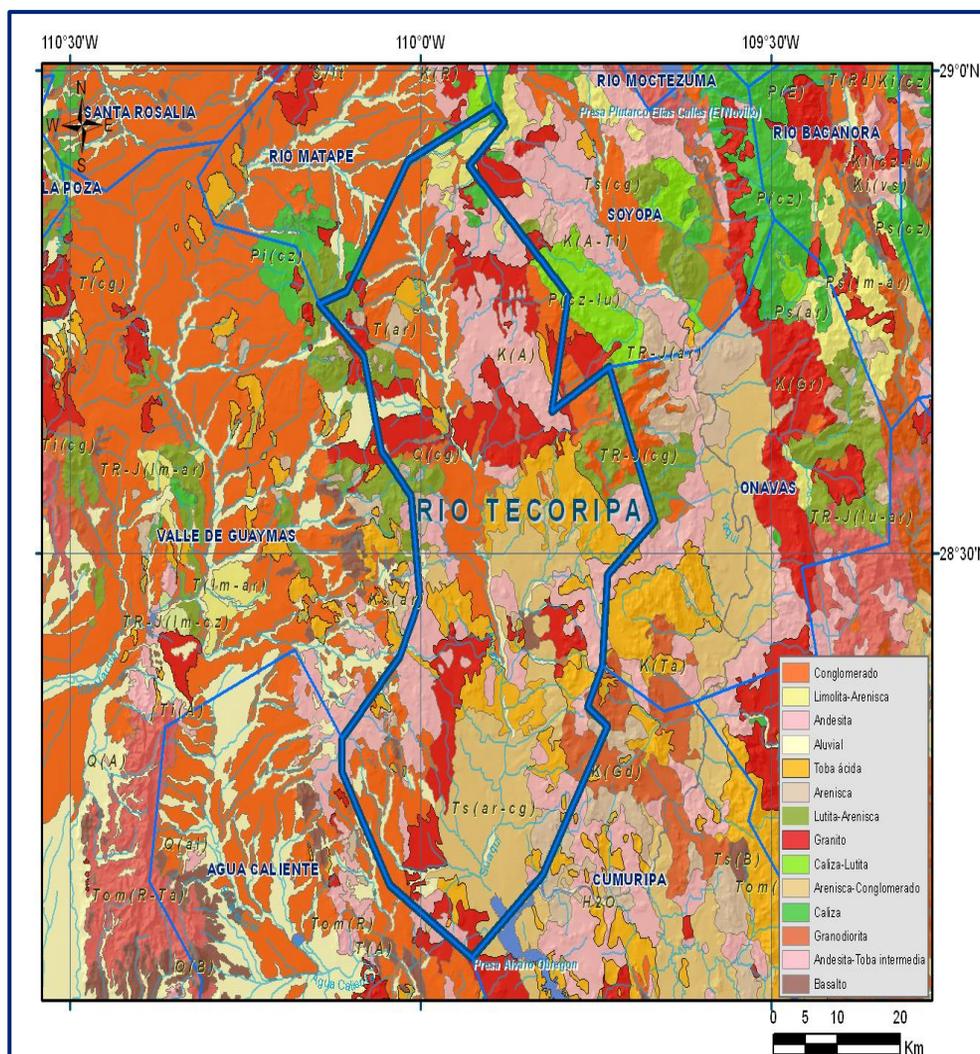


Figura 2. Mapa Geológico

4.1. Estratigrafía

El registro estratigráfico que cubre las rocas que afloran en la región comprende del Triásico al Reciente. A continuación, se describen las diferentes unidades litoestratigráficas, de la más antigua a la más reciente.

TRIÁSICO - JURÁSICO

El Triásico aflora en toda la porción centro-oriental del estado de Sonora; está representado por un conjunto de rocas sedimentarias, a las cuales Dumble (1900) designó con el nombre de División Barranca, dividiéndola en tres miembros: Inferior, Medio y Superior.

Posteriormente, King (1934) le otorga el nombre de Formación Barranca, y finalmente Alencaster en 1961 lo eleva al rango de Grupo y lo divide en tres Formaciones: Arrayanes, Santa Clara y Coyotes, según las tres divisiones de Dumble.

La Formación Arrayanes

Está constituida por una alternancia de conglomerados, areniscas de cuarzo y lutitas. Los conglomerados están constituidos por fragmentos de cuarcitas y pedernal, las areniscas se encuentran intercaladas con los conglomerados y las lutitas presentan estratificación delgada.

Formación Santa Clara

Conforma la parte media del Grupo, es la única en la que se han identificado fósiles, mediante los cuales fue posible asignarle una edad correspondiente al Cárnico, de acuerdo a la datación realizada por Alencaster (1961) con base en varias especies de pelecípodos como *Myophoria mexicana sp.*

Está constituida por una secuencia de lutitas de coloración clara y oscura, intercaladas con horizontes de areniscas de cuarzo.

Las lutitas se presentan en capas laminares delgadas y ocasionales horizontes arenosarcillosos que contienen impresiones de plantas. Es frecuente la presencia de horizontes intercalados de lutitas carbonosas con gran contenido de materia orgánica y restos fósiles de plantas. Esta formación cubre concordantemente a la Formación Arrayanes en contacto transicional.

Formación Coyote

Está constituida principalmente por conglomerados intercalados con horizontes de areniscas y pequeñas capas de lutitas.

El conglomerado contiene fragmentos de cuarcitas, calizas con fusulínidos, pedernal y esporádicas rocas volcánicas.

El depósito de esta formación marca un cambio drástico en la sedimentación del Grupo Barranca, como consecuencia de la reactivación de la distensión que produjo levantamientos relativos y el depósito de esta secuencia conglomerática. Cubre en discordancia a la Formación Santa Clara.

Debido a la litología y disposición de las rocas que integran el Grupo Barranca, se considera que su ambiente de depósito fue en una zona de transición palustre-deltaica, próxima al margen continental o a una zona emergida, dada la abundancia de materia orgánica y la presencia de sedimentos clásticos.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Tarahumara

Esta secuencia forma relieves topográficos en forma de lomeríos suaves, está constituida por un paquete de andesitas, areniscas y traquitas con algunos horizontes de areniscas, lutitas, calizas y tobas andesíticas.

La edad de los emplazamientos varía desde el Maestrichtiano Superior al Paleoceno Inferior. Sin embargo, se pueden establecer edades relativas dentro de estos cuerpos intrusivos; las rocas graníticas son más viejas que las rocas con alto contenido de minerales ferromagnesianos, ya que éstas cortan al intrusivo granítico.

Estos intrusivos han sido observados en el Rancho “El Cajón”, localizado al norte de Tónichi. Las distintas composiciones y variedades texturales que presentan estas rocas, se deben a la diferenciación magmática y fusión parcial de las rocas encajonantes. Estas rocas se generaron a partir de la subducción de la placa Farallón bajo la placa Norteamericana a fines del Cretácico. Este evento tectónico corresponde a la orogenia Laramide.

PALEÓGENO - NEÓGENO

Formación Báucarit

Originalmente Dumble (1900) la llamó División Báucarit. Posteriormente King (1937) la redefinió y la elevó al rango de Formación, como se le conoce actualmente. Está compuesta por conglomerados polimícticos constituidos por fragmentos angulosos a subangulosos de todas las rocas preexistentes: intrusivas, volcánicas, areniscas y pedernal. Tiende a formar mesetas alargadas con una orientación NNW.

El rumbo general de esta secuencia es de 30° hacia el NW con echados de 15 a 30° hacia el NE. Cubre discordantemente a rocas del Grupo Barranca, Formación Tarahumara y rocas volcánicas. El medio ambiente de depósito está asociado a cuencas continentales, formadas a partir del evento distensivo de sierras y valles (Basin and Range).

Cuaternario

Correspondientes al Pleistoceno existen depósitos no consolidados de conglomerados, gravas, arenas y limos, con clastos subangulosos de tamaños y composición heterogénea. Descansan discordantemente sobre toda la columna precuaternaria. Desde el punto de vista hidrogeológico, es la unidad más importante ya que de ella se extrae la mayor cantidad del agua utilizada en la región.

4.2. Geología estructural

A principios del Triásico, ocurre un evento distensivo que ocasionó la formación de cuencas y el posterior depósito del Grupo Barranca.

Después de un evento tectónico del Jurásico Superior (orogenia Nevadiana) que deforma al Grupo Barranca y su sustrato, se depositaron en discordancia rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Tarahumara, asignadas al Cretácico inferior.

Las rocas intrusivas se asignan al evento del Cretácico Superior- Paleógeno. Varían en composición de granito a diorita. Asociados a esta roca intermedia se presentan derrames volcánicos contemporáneos o posteriores que consisten en derrames andesíticos y riolíticos. Este episodio magmático es asignado a la Orogenia Laramide.

El Terciario Superior discordante (Oligoceno-Mioceno), está representado por una secuencia de rocas volcánicas de carácter explosivo constituida de andesitas, riolitas e ignimbritas. Este episodio volcánico es el más representado en el área y constituye el último evento de este tipo asociado a la subducción de la placa Farallón bajo la placa Norteamericana, ya que el magmatismo asociado a subducción había migrado hacia el oeste para el Plioceno, produciendo una incipiente distensión hacia el oriente.

Con el fin de la subducción durante el Plioceno Superior, sucede un fenómeno particular en el noroeste de Norteamérica, cambiando la interacción de las placas a un límite transformante.

Este cambio ocasiona un relajamiento en la placa Norteamericana con la consiguiente distensión, activa desde el Mioceno, provocando el depósito de la Formación Báucarit, constituida básicamente de conglomerado con esporádicas intercalaciones de rocas volcánicas de fisura.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo a la litología representada en el mapa geológico, la información de los sondeos geofísicos realizados y las observaciones de campo, es posible identificar tres unidades hidrogeológicas principales: (1) relleno aluvial, que delimita el cauce principal del Río Tecoripa y de sus tributarios, y forman la unidad de alta permeabilidad; (2) los diferentes tipos de conglomerados y tobas, que representan una unidad de mediana permeabilidad; y (3) la unidad de baja permeabilidad, representada por la roca cristalina de menor fracturamiento y alteración.

Por lo tanto, el acuífero se encuentra constituido en su parte superior por los depósitos aluviales y en su parte inferior por la secuencia de conglomerados y rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. El basamento y barreras al flujo subterráneo están conformados por las rocas ígneas intrusivas de composición granítica.

Dentro de la unidad con alta permeabilidad se incluyen los materiales no consolidados como el aluvión de edad reciente, que sólo se ubica en los angostos cauces y tributarios del Río Tecoripa. Esta unidad se ubica en la zona central del acuífero y se extiende según su ramificación de los patrones tributarios hacia el este y oeste, en ella se encuentran la mayoría de las captaciones de aguas subterráneas.

La unidad con permeabilidad media está representada en su mayor parte por rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias. Sus espesores pueden variar y llegar a constituir grandes grosores, comportándose como acuíferos libres o semiconfinados. El conglomerado de la Formación Báucarit puede representar acuíferos muy productivos, debido a la regolita derivada de la unidad sedimentaria de esta formación y su fracturamiento paralelo.

La tercera unidad hidrogeológica presenta baja permeabilidad presenta alteración causada por el intemperismo, además de deformaciones generadas por fracturamiento y fallamiento.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir que el acuífero es de **tipo libre**, formado por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por gravas y arenas no consolidadas, de alta permeabilidad, que presentan lentes intercalados de arcillas.

Su explotación se localiza principalmente sobre el cauce del río Tecoripa y arroyos tributarios, así como en la planicie de inundación.

Debajo de esta secuencia y fuera de los cauces de los ríos y arroyos, el acuífero está conformado por conglomerados y una secuencia de rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de los trabajos de campo realizados durante el año 2007, se llevaron a cabo dos pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

Los ensayos se realizaron en las localidades Cumuripa y Rancho El Porvenir y para su interpretación se utilizaron los métodos de Theis & Jacob y Boulton, para la etapa de abatimiento y Cooper-Bredhoeft-Papadopoulos para recuperación.

Los valores promedio de transmisividad obtenidos por los diferentes métodos varían **de 1.92×10^{-4} a $4.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$** , en tanto que la conductividad hidráulica varía de 2.40×10^{-6} a $5.48 \times 10^{-7} \text{ m/s}$.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible para 2007.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el acuífero va de 0m a 25 m. De manera general, los valores de profundidad oscilan entre 5 y 10 m, siendo 8 m su valor promedio.

Las mayores profundidades se encuentran en pequeñas zonas en los extremos norte, este y sur del acuífero (figura 3).

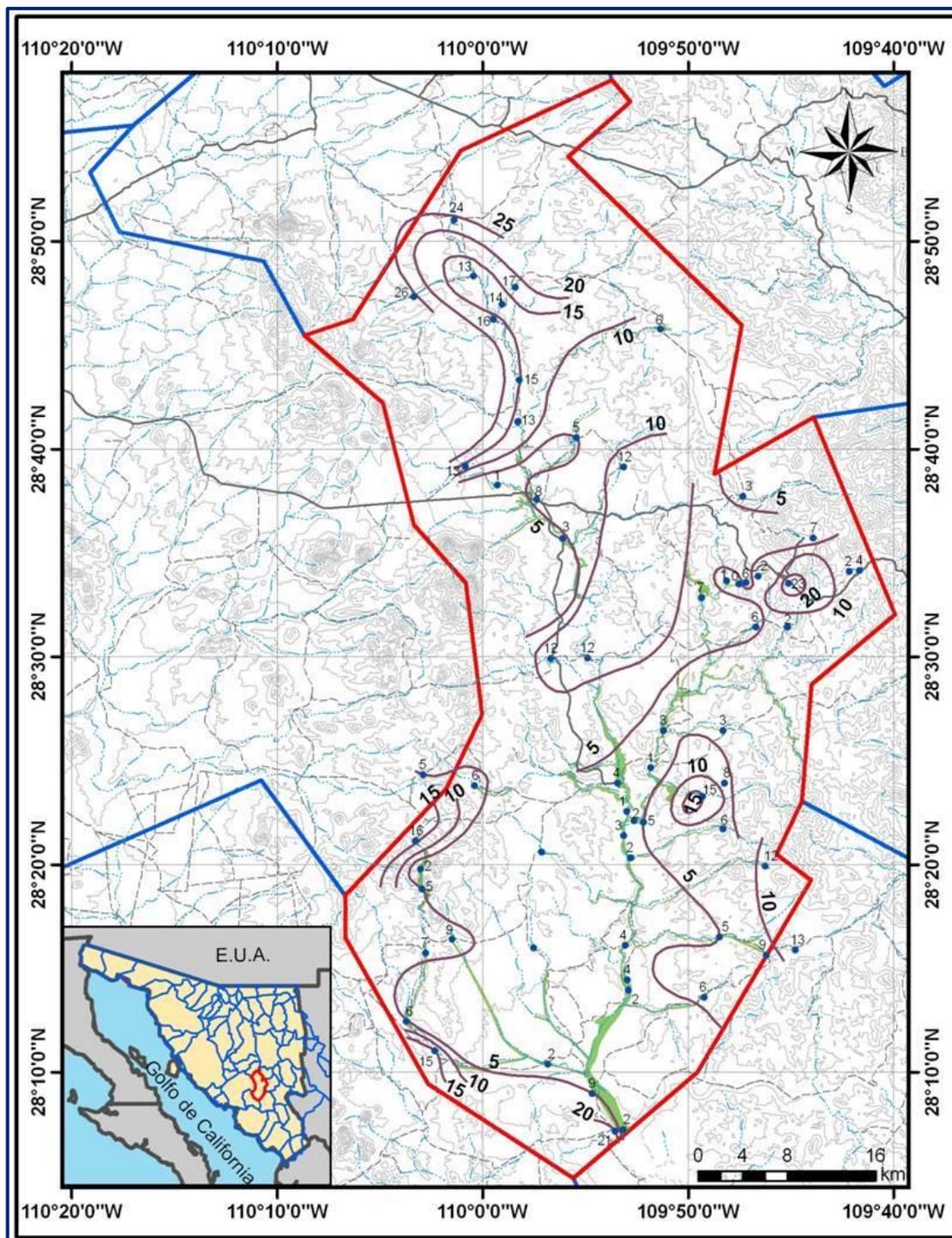


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2006)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático muestra la influencia de la topografía; los valores más altos se localizan hacia las estribaciones de las sierras que delimitan los valles aluviales, donde se ubican las zonas de recarga, y a partir de estas se identifican las direcciones de flujo subterráneo.

La dirección preferencial del flujo subterráneo es norte-sur, paralela al curso del río Tecoripa, con alimentaciones provenientes de los flancos, desde las partes topográficamente más altas o de los cauces de los arroyos tributarios (figura 4).

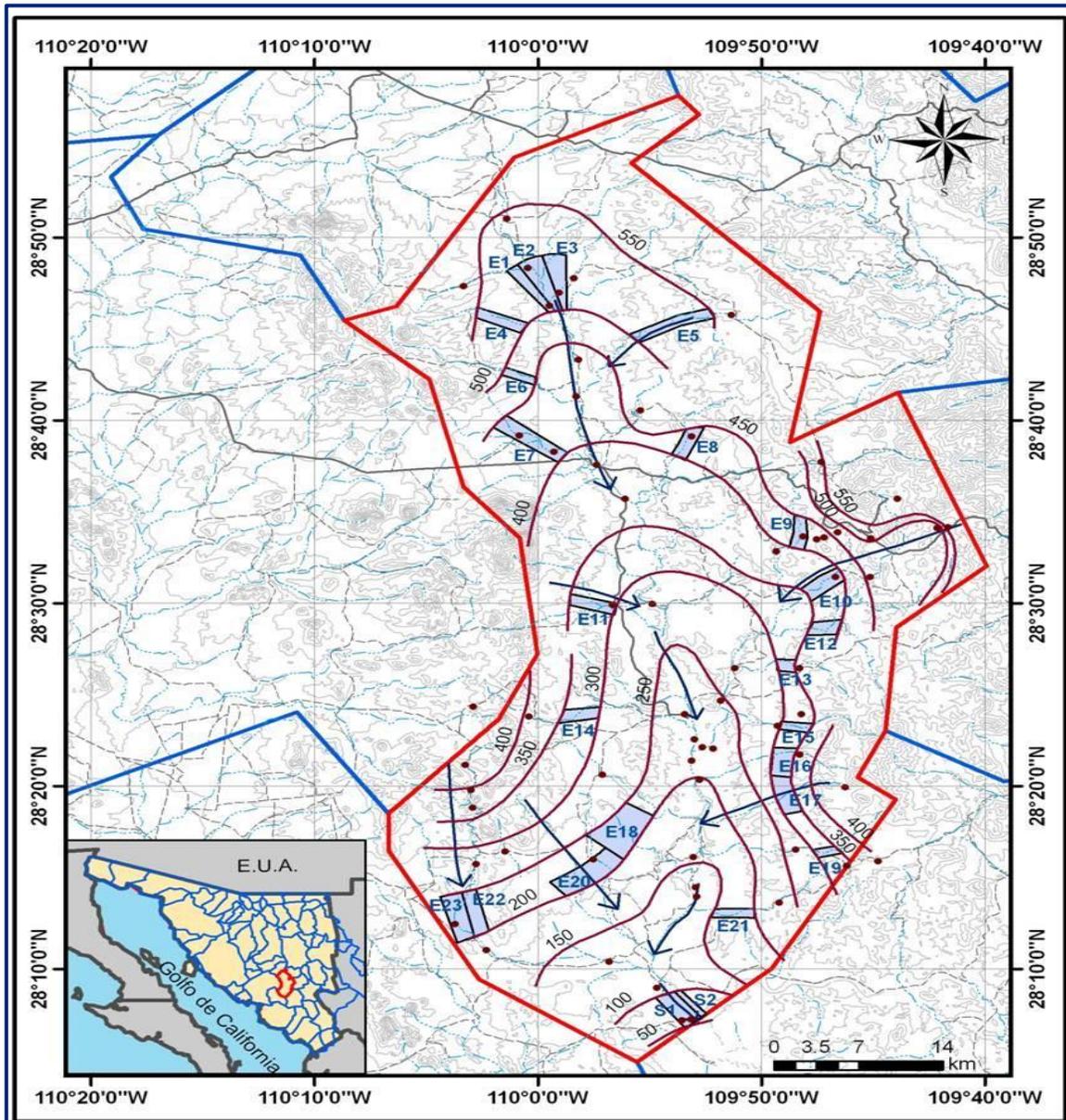


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2006)

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 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. Adicionalmente, el valor de extracción es muy incipiente e inferior a la recarga más conservadora que pudiera estimarse.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se muestrearon 15 aprovechamientos de aguas subterráneas. Los parámetros analizados fueron: calcio, magnesio, sodio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, fierro; y como parámetros de campo, la conductividad eléctrica, la temperatura, y el pH.

Con respecto a la calidad de agua, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 400 a 870 mg/l, por lo que el agua se considera de tipo “dulce”, apta para el consumo humano.

La Conductividad Eléctrica (CE) varía de 533 a 1163 $\mu\text{S/cm}$, los mayores valores se localizan en la porción oriental, entre la zona minera “La Verde” y los poblados de El Guisar y San Javier, disminuyendo gradualmente hacia el oeste, donde se encuentran las menores concentraciones.

Para la caracterización de familias de agua se utilizaron los Diagramas Triangulares de Piper y la Clasificación de Stiff. De acuerdo con ellos, la familia de agua predominante es la bicarbonatada cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), presente en 12 de las 15 muestras, que representa agua meteórica de reciente infiltración (figura 6). Las 3 muestras restantes se clasifican como sulfatada cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$).

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados reportados en el censo realizado en 2007, se registraron un total de 64 obras que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 19 son pozos y 45 norias.

La profundidad de las obras no supera los 15 m, en el caso de las norias y 60 m para el caso de los pozos, a excepción de 3 captaciones que tienen 70, 90, y 100 m.

El mayor número de captaciones se localiza en los subálveos de los ríos y arroyos, en los que el caudal de extracción es mayor. El volumen de extracción conjunto estimado asciende a **2.4 hm³** anuales, de los cuales 0.1 hm³ (4.2%) se utilizan para uso público urbano, 1.8 hm³ (75%) se utilizan para uso agrícola y los 0.5 hm³ (20.8%) para uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de 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:

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

Para el caso del acuífero río Tecoripa, la ecuación de balance propuesta es la siguiente:

$$\text{Rv + Eh – B – Sh – ETR = } \pm \Delta\text{V(S)}$$

Donde:

- Rv** = Recarga vertical
- Eh** = Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B** = Bombeo
- Sh** = Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR** = Evapotranspiración
- $\Delta\text{V(S)}$** = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total (R_t) que recibe el acuífero ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos del río Tecoripa, que en conjunto se consideran como recarga vertical (R_v) y por flujo subterráneo (E_h).

De manera inducida, se produce recarga debido a la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela.

Aunque existe una zona agrícola cuya superficie aproximada es de 218 has, que se localizan a lo largo del cauce del río Tecoripa, se considera que el volumen de los retornos ocasionados por los excedentes del riego es despreciable para los fines del balance de aguas subterráneas. Por lo que $R_i=0$.

7.1.1. Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo.

Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance (1).

De esta manera, despejando la recarga vertical (R_v) se obtiene la siguiente expresión:

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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

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

El cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2006 (figura 4), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

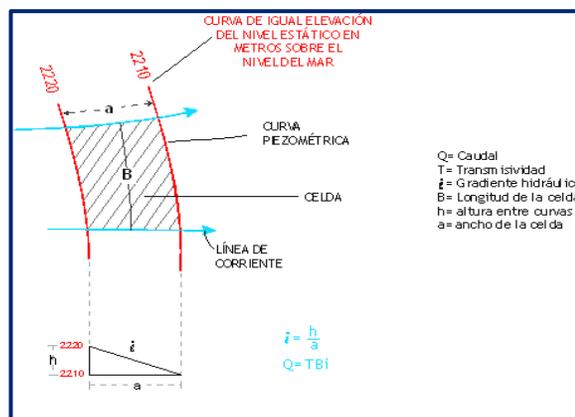
Donde:

Q = Gasto;

T = Transmisividad;

B = Longitud de la celda;

i = Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. El cálculo del flujo en las celdas de entradas se muestra en la tabla 3. Como resultado del análisis de celdas de flujo se obtuvo un valor de entradas horizontales de **13.6 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente i (m)	K (m/s)	Espesor Saturado	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (m ³ /año)
E1	510	9360	25	0.0027	1.47E-06	7	1.03E-05	0.000014	442
E2	960	10680	25	0.0023	6.00E-03	10	6.00E-02	0.134831	4252045
E3	2290	10710	25	0.0023	1.47E-06	7	1.03E-05	0.000055	1735
E4	450	3870	50	0.0129	1.47E-06	3	4.41E-06	0.000026	806
E5	50	6260	50	0.008	6.00E-03	3	1.80E-02	0.007188	226697
E6	70	2570	50	0.0195	6.00E-03	3	1.80E-02	0.024514	773061
E7	60	586	50	0.0853	6.00E-03	3	1.80E-02	0.09215	2906048
E8	50	2980	50	0.0168	6.00E-03	3	1.80E-02	0.015101	476215
E9	50	3280	50	0.0152	6.00E-03	3	1.80E-02	0.01372	432658
E10	1250	3220	50	0.0155	1.47E-06	3	4.41E-06	0.000086	2699
E11	520	3500	50	0.0143	1.47E-06	3	4.41E-06	0.000033	1033
E12	60	2100	50	0.0238	6.00E-03	3	1.80E-02	0.025714	810926
E13	920	1220	50	0.041	1.47E-06	3	4.41E-06	0.000166	5244
E14	70	2620	50	0.0191	6.00E-03	3	1.80E-02	0.024046	758308
E15	940	2350	50	0.0213	1.47E-06	3	4.41E-06	0.000088	2781
E16	2810	1670	50	0.0299	1.47E-06	3	4.41E-06	0.000371	11700
E17	3830	1420	50	0.0352	1.47E-06	3	4.41E-06	0.000595	18755
E18	4640	2950	50	0.0169	1.47E-06	3	4.41E-06	0.000347	10937
E19	50	1790	50	0.0279	6.00E-03	3	1.80E-02	0.02514	792805
E20	5530	2030	25	0.0123	1.47E-06	3	4.41E-06	0.0003	9471
E21	60	2880	50	0.0174	6.00E-03	3	1.80E-02	0.01875	591300
E22	365	427	50	0.1171	1.47E-06	3	4.41E-06	0.000188	5944
E23	250	4620	50	0.0108	6.00E-03	3	1.80E-02	0.048701	1535844
Total entradas								13.6	

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por evapotranspiración (ETR) en niveles someros, por bombeo (B) y por flujo subterráneo horizontal (Sh). No existen salidas por flujo base en el río ni manantiales.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de hidrometría, el valor de la extracción de agua subterránea asciende a los **2.4 hm³ anuales**.

7.2.2. Salida por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de las salidas subterráneas se realizó de la misma manera que las entradas subterráneas, utilizando el plano de elevación del nivel estático y aplicando la Ley de Darcy para las celdas de flujo identificadas. El detalle del cálculo se muestra en la tabla 4. Los resultados indican que el volumen total de salidas subterráneas asciende a **3.8 hm³ anuales**.

Tabla 4. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	K (m/s)	Espesor Saturado	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (m ³ /año)
S1	1520	3470	50	0.0144	1.47E-06	5	7.35E-06	0.000161	5077
S2	280	3470	50	0.0144	6.00E-03	5	3.00E-02	0.121037	3817037
Total salidas									3.8

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).

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m y con cobertura vegetal nativa, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc. (figura 5).

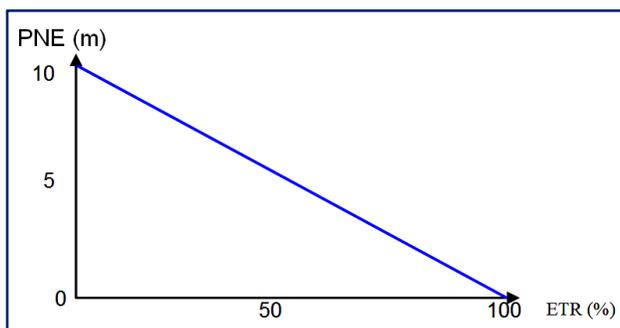


Figura 5. Comportamiento de la evapotranspiración real contra la profundidad

En toda el área de balance los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración.

Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real es de 543.2 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 22.9° C y precipitación de 554.4 mm.

Fórmula de Turc:	$EIR (mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$		$L = 300 + 25T + 0.05T^3$
T (°C) =	22.9		
P(mm) =	554.4	P ² =	307359.36
L =	1472.94945	L ² =	2169580.08
ETR (mm)	543.2		

La tabla 5 muestra el cálculo de la evapotranspiración, en la que se puede observar que el valor de esta componente del balance se estima en **15.1 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no existe información piezométrica histórica para elaborar las configuraciones de evolución; las escasas mediciones se encuentran dispersas en tiempo y espacio, no cubren en su totalidad la extensión del acuífero.

Tabla 5. Cálculo de la evapotranspiración

Intervalo curvas (m)	Profundidad Considerada (m)	Area (m ²)	%	ETR (m)	Vol ETR (m ³ /año)
0 a 1	0.5	468554.2	0.95	0.5432	241792.7
1 a 2	1.5	852196.5	0.85	0.5432	393476.2
2 a 3	2.5	13323418.8	0.75	0.5432	5427960.8
3 a 4	3.5	8814870.6	0.65	0.5432	3112354.5
4 a 5	4.5	8712255.1	0.55	0.5432	2602873.3
5 a 6	5.5	6277567.7	0.45	0.5432	1534488.6
6 a 7	6.5	5149741.2	0.35	0.5432	979068.8
7 a 8	7.5	3581197.8	0.25	0.5432	486326.7
8 a 9	8.5	3367675.8	0.15	0.5432	274398.2
9 a 10	9.5	1530607.7	0.05	0.5432	41571.3
ETR (m³ /año) =					15.1

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, por lo tanto, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes.

Por lo anterior, se considera que para fines del balance, el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. $\Delta V(S) = 0$.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración por lluvia (Rv), por lo que despejando este término de la ecuación (2), se tiene:

$$\begin{aligned}
 Rv &= Sh + B + ETR - Eh + \otimes V(S) \quad (2) \\
 Rv &= 3.8 + 2.4 + 15.1 - 13.6 + 0.0 \\
 Rv &= 7.7 \text{ hm}^3/\text{año}
 \end{aligned}$$

De esta manera la recarga total media anual (Rt) es igual a la suma de las entradas:

$$\begin{aligned}
 Rt &= Rv + Eh \\
 Rt &= 7.7 + 13.6 \\
 Rt &= 21.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}
 \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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:

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

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. Para este caso, su valor es de **21.3 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **3.8 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

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 (REPD), 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 **9,796,343 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 21.3 - 3.8 - 9.796343 \\ \text{DMA} &= 7.703657 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **7,703,657 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA