



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CUAUHTÉMOC (0805), ESTADO DE
CHIHUAHUA**

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.....	7
3.1 Provincia fisiográfica.....	7
3.2 Clima.....	8
3.3 Hidrografía	8
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1 Estratigrafía	10
4.2 Geología estructural.....	15
4.3 Geología del subsuelo.....	16
5. HIDROGEOLOGÍA.....	17
5.1 Tipo de acuífero	17
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
5.3 Piezometría	18
5.4 Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	18
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3 Evolución del nivel estático	20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua	21
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
7.1 Entradas.....	24
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	24
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	25
7.2 Salidas	26
7.2.1 Bombeo (B).....	26
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	26
8. DISPONIBILIDAD.....	28
8.1 Recarga total media anual (R)	28
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	29
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	29
9. BIBLIOGRAFÍA.....	30

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 Cuauhtémoc, definido con la clave 0805 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-occidental del estado de Chihuahua, entre los paralelos 28° 14' y 29° 01' de latitud norte y los meridianos 106° 32' y 107° 12' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 3,411 km². Limita al norte con el acuífero Santa Clara, al noroeste con el acuífero El Sauz-Encinillas, al este y sur con Alto Río San Pedro, al suroeste con Laguna de Mexicanos y al oeste con los acuíferos Baja Babícora y Guerrero-Yepómera (figura 1).

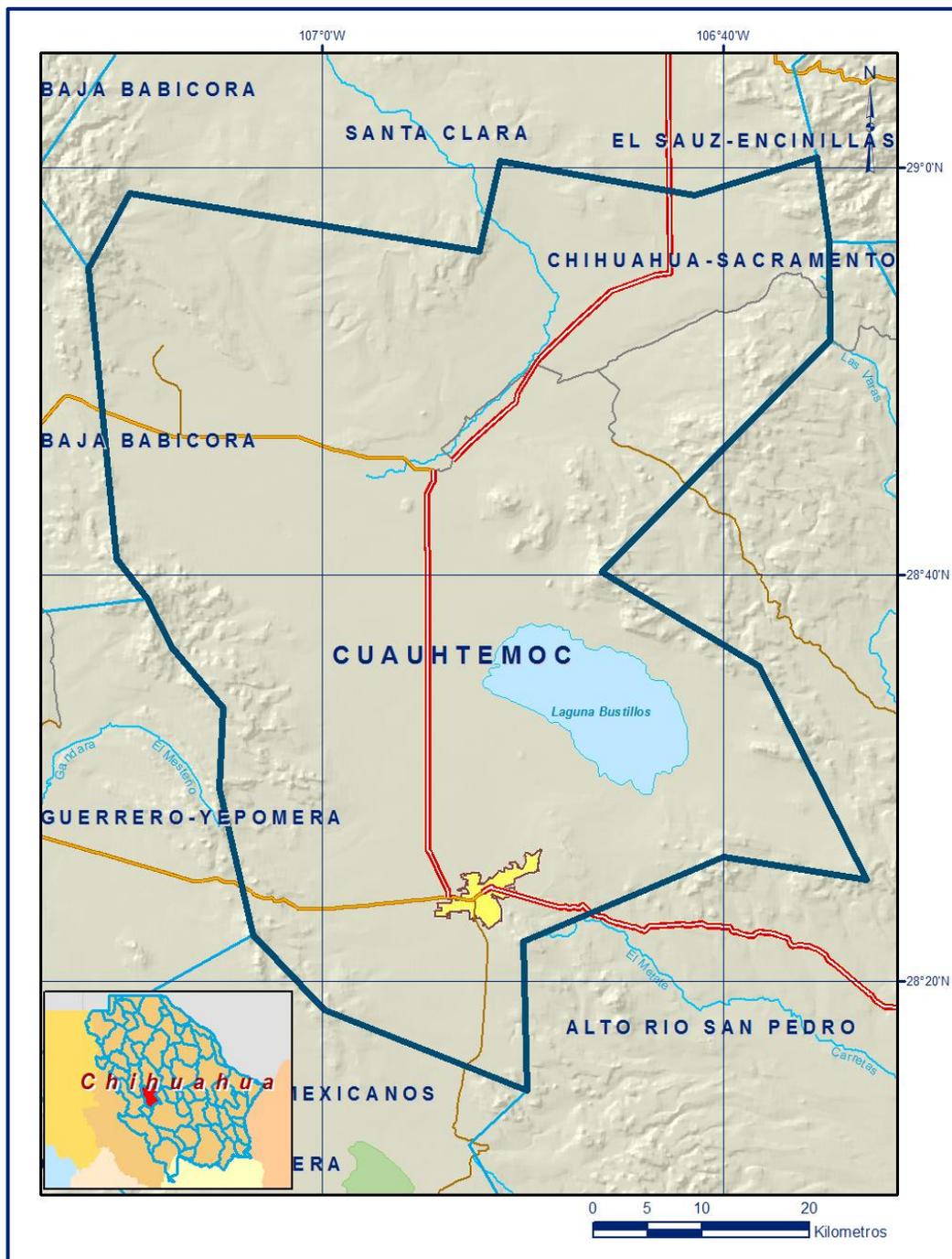


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero comprende la mayor parte de la superficie del municipio Cuauhtémoc y porciones menores de Riva Palacio, Bachiniva, Cusihiuriachi, Guerrero, Chihuahua y Gran Morelos.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0805 CUAUHEMOC						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	107	11	417	28	55	4.8
2	107	9	37.7	28	58	45.4
3	106	52	9.4	28	55	54.4
4	106	51	7.9	29	0	20.7
5	106	41	26.4	28	58	39.2
6	106	35	19.3	29	0	32.4
7	106	34	42.0	28	56	22.2
8	106	34	39.0	28	51	32.4
9	106	46	2.1	28	40	7.3
10	106	38	11.4	28	35	29.2
11	106	32	48.9	28	24	59.0
12	106	40	0.1	28	26	8.1
13	106	49	58.6	28	21	57.9
14	106	49	48.3	28	14	37.1
15	106	59	54.2	28	18	37.2
16	107	3	27.2	28	22	16.4
17	107	5	9.1	28	29	28.2
18	107	4	58.0	28	33	25.9
19	107	7	32.2	28	36	27.1
20	107	8	45.3	28	38	48.1
21	107	10	17.3	28	40	46.1
1	107	11	417	28	55	4.8

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VI “Río Bravo”, al Consejo de Cuenca “Río Bravo”, instalado el 21 de enero de 1999 y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Chihuahua. Su territorio se encuentra parcialmente vedado, sujeto a las disposiciones de dos decretos: El primero rige en la mayor parte de su superficie y es el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido, para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida como región de Cuauhtémoc, del Estado de Chihuahua”, publicado el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 21 de octubre de 1967; el segundo decreto está vigente en una pequeña área del extremo norte y noreste, se trata del “Acuerdo que establece el Distrito de Riego de El Carmen, en San Buenaventura y Villa Ahumada, Chih., y declara de utilidad pública la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas”, publicado en el DOF el 30 de enero de 1957. Ambos decretos se clasifican como tipo III, que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Solo en una pequeña superficie de su extremo nororiental no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeto 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 18 acuíferos que se indican*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, se prohíbe 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, y el incremento de volúmenes autorizados o registrados, 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 su territorio no existe distrito o unidad de riego alguna; los usuarios se encuentran organizados a través del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero de Cuauhtémoc, Chihuahua, A.C., instalado el 30 de agosto de 2002.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

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

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA DE CUAUHTÉMOC, CHIHUAHUA. Realizado en 1973 por Ariel Construcciones, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Su objetivo fue realizar el censo de aprovechamientos de aguas subterráneas y conocer las condiciones de explotación de los acuíferos de la región. Identifica la existencia de 1949 aprovechamientos, la mayoría de ellos pozos, que en total extraían un volumen de 98 hm³ anuales y la presencia de las principales zonas de recarga al acuífero, el flujo subterráneo mostraba una red concéntrica hacia la Laguna Bustillos. Propone incrementar la extracción en 79 hm³ anuales más.

ESTUDIO DE PIEZOMETRÍA EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, ZONA DE ESTUDIO CUAUHTÉMOC, CHIHUAHUA. Realizado en 1989 por GEOFIMEX, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Con las mediciones piezométricas, elabora las configuraciones del nivel estático, la que corresponde a la elevación muestra ya la aparición de conos de abatimiento en las zonas agrícolas de mayor extracción de agua subterránea.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA ANALIZAR LAS POLÍTICAS DE OPERACIÓN Y ELABORAR EL PROYECTO DE MANEJO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE CUAUHTÉMOC, CHIH. Realizado en 1991 por Anáhuac Ingenieros, Consultores y Supervisores, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Sus objetivos estuvieron orientados a conocer las condiciones de explotación del acuífero, entender su comportamiento, evaluar su potencial, simular el comportamiento del sistema para diversas políticas de explotación, proponer el esquema de explotación óptimo y evaluar el impacto económico del proyecto de manejo.

Establece que de continuar el mismo régimen de explotación del acuífero se generarían abatimientos de 15 a 20 m en el periodo 1990-2000 en la mayor parte de la superficie del área agrícola, es decir un promedio anual 1.5 a 2.0 m. Concluye que la sobreexplotación era de 63 hm³ anuales.

ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DE LOS ACUÍFEROS DE CUAUHTÉMOC, CHIHUAHUA Y ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, NUEVO LEÓN. Realizado en 1998 por Consultores en Agua Subterránea, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Entre sus objetivos planteados destacan la actualización del censo de aprovechamientos, conocer el grado de explotación del acuífero, plantear el balance de aguas subterráneas para conocer la magnitud de sus componentes y la construcción de un modelo de flujo hidrodinámico que permitiera predecir el comportamiento de los niveles del agua subterránea ante diferentes escenarios de explotación, para proponer el más adecuado con el propósito de preservar el recurso.

ESTUDIO DE MANEJO INTEGRADO DEL ACUÍFERO DE CUAUHTÉMOC, EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA. Realizado en 2013 por URMO Ingeniería Integral, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Este estudio tuvo como objetivo general conocer la disponibilidad real del agua subterránea y actualizar el conocimiento hidrogeológico del acuífero, utilizando un modelo de simulación de flujo hidrodinámico y con base en ello, diseñar un Plan de Manejo Integral que adecue el desarrollo sustentable de la región a la disponibilidad del agua.

Mediante la realización de actividades que revisión del censo de aprovechamientos, piezometría, cuantificación de las extracciones, nivelación de brocales de pozos, recopilación y análisis de información hidrogeológica de estudios previos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Evalúa la relación costo-beneficio de la sobreexplotación y mediante el modelo de simulación construido plantea diferentes escenarios de explotación del acuífero y establece la alternativa óptima de reducción de la demanda y de manejo de la disponibilidad, analizando su relación costo-beneficio. Formula además la propuesta del Plan de Manejo Integral del Agua.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de E. Raisz (1964), el área que comprende el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental. Por otra parte, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en territorio de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Llanuras Tarahumaras. El extremo sur del acuífero se ubica en la Subprovincia Sierras y Llanuras de Durango.

La Sierra Madre Occidental se extiende en parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco.

Es un gran sistema montañoso que tiene su origen en el Terciario Inferior o Medio, cuando se inició la extrusión de gigantescos volúmenes de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores oscilan entre 1,500 y 1,800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e intermedias.

La Subprovincia Sierras y Llanuras Tarahumaras se caracteriza por una sucesión de llanuras intermontanas, amplias y alargadas, separadas por serranías de rocas volcánicas, basculadas al noreste, y dispuestas en un típico patrón de bloques de falla escalonados; es de carácter transicional y representa el límite difuso, de cambio gradual, con la Provincia de Cuencas y Sierras. La altura media sobre el nivel del mar de las llanuras es de 2,000 metros y de 2,400 msnm en las zonas montañosas.

La Subprovincia de Sierras y Llanuras de Durango es una franja angosta y alargada que forma parte de los costados orientales de la Sierra Madre Occidental, desde Cuauhtémoc en Chihuahua hasta Sombrerete en Zacatecas.

Está representada por llanuras amplias y una manifestación importante de mesetas, constituidas principalmente por riolitas e ignimbritas.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada en 1964 por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor superficie del acuífero prevalece el clima semiseco templado con lluvias en verano. Se presentan dos variantes BSi kw (x´) y BSi kw, cuya diferencia entre ellas es el porcentaje de lluvias invernales, para la primera es mayor de 10.2 % de la precipitación total, y para la segunda varía entre 5 y 10.2%.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 5 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Anáhuac, C.B.T.A., Álvaro Obregón, Cuauhtémoc FIMSA y C.M. de Cuauhtémoc.

Con los registros obtenidos para el periodo 1976-2012 y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **532.3 mm, 13.2 °C y 3,150 mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza en la Región Hidrológica 34 “Cuencas Cerradas del Norte”, Subregión Hidrológica Cuencas Cerradas del Norte, cuenca Laguna Bustillos-Laguna Mexicanos. La red de drenaje de la cuenca de la Laguna Bustillos es tipo radial, concéntrica en la laguna.

El principal escurrimiento que la alimenta es el Arroyo La Quemada, el cual nace en la Sierra de Chuchupate, con un rumbo general sureste hasta llegar a la laguna después de un recorrido total de 65 km aproximadamente. Este arroyo tiene como afluentes los arroyos De Agua y Santa Elena, que escurren en dirección noreste a suroeste; este último tiene dos afluentes que son los arroyos El Gato y La Guajolota.

En la región nororiental de esta cuenca cerrada existe una zona de lagunas pequeñas e intermitentes, que evidencian la existencia de una zona sensiblemente plana y con drenaje pluvial deficiente. La Laguna Bustillos recibe otras alimentaciones, como el Arroyo Bustillos, que escurre hacia el noreste, y pasa por una pequeña presa en el Ejido Bustillos; además de las aportaciones del Arroyo San Antonio que fluye de suroeste a noreste, pasando por ciudad Cuauhtémoc y llega a la laguna.

El último afluente es el Arroyo de Nopabechi, de características similares a las del San Antonio; desciende hacia el sureste hasta Nopabechi y luego continúa hacia al noreste, rumbo a la laguna, donde generalmente se pierde antes de llegar a ella.

La laguna tiene una extensión 16 km², 8 km de largo por 2 km de ancho, y una profundidad media de 2.5 m, con una elevación media en su superficie de 1975.5 msnm. Salvo algunos pequeños bordos de almacenamiento y lagunas, no existe infraestructura hidráulica para aprovechar los escurrimientos superficiales.

3.4 Geomorfología

La geomorfología de la región presenta un relieve volcánico piroclástico de mesetas, originado durante el Terciario que cubre parcialmente a topoformas de montañas cretácicas, que actualmente se presentan modificadas en bloques escalonados y separados por valles de origen tectónico, en los se depositaron posteriormente grandes volúmenes de material aluvial.

Estos valles están disectados y contienen sedimentos lacustres en las zonas topográficamente más bajas.

Las montañas y mesetas dentro del área se caracterizan por numerosos escarpes y profundos cañones labrados por los agentes erosivos, evidenciado por la ruptura de pendiente en los sedimentos clásticos, lo cual le da un aspecto de etapa de rejuvenecimiento desde el punto de vista geomorfológico; sin embargo, en algunas zonas del área, sobre todo en los valles y regiones áridas, se encuentra en una etapa de madurez.

Las sierras están constituidas principalmente por rocas volcánicas de composición ácida (ignimbritas riolíticas, tobas) que representan las mayores elevaciones que delimitan al acuífero; las mesetas constituyen sierras conformadas principalmente de emisiones de ignimbritas; los lomeríos, están constituidos por rocas de diferente tipo, predominando las de origen volcánico, basaltos, gravas, y depósito de talud.

En la unidad de planicie y valles se agrupan los depósitos aluviales y fluviales que actualmente están siendo transportados por los arroyos y ríos, que corresponden exclusivamente a las planicies de inundación y a depósitos alojados en los cauces de los ríos y arroyos. Esta unidad, junto con la que conforman la zona de transición con las sierras, son las más importantes por su extensión.

4. GEOLOGÍA

El basamento sobre el que descansa la secuencia paleozoica está constituido por rocas graníticas y metamórficas del Precámbrico, sometidas a fases compresivas y distensivas que conforman grandes bloques emergidos y/o hundidos que en ocasiones denotan movimientos horizontales de transcurrancia o cabalgamiento, controlando la sedimentación y sus posteriores deformaciones (Figura 2).

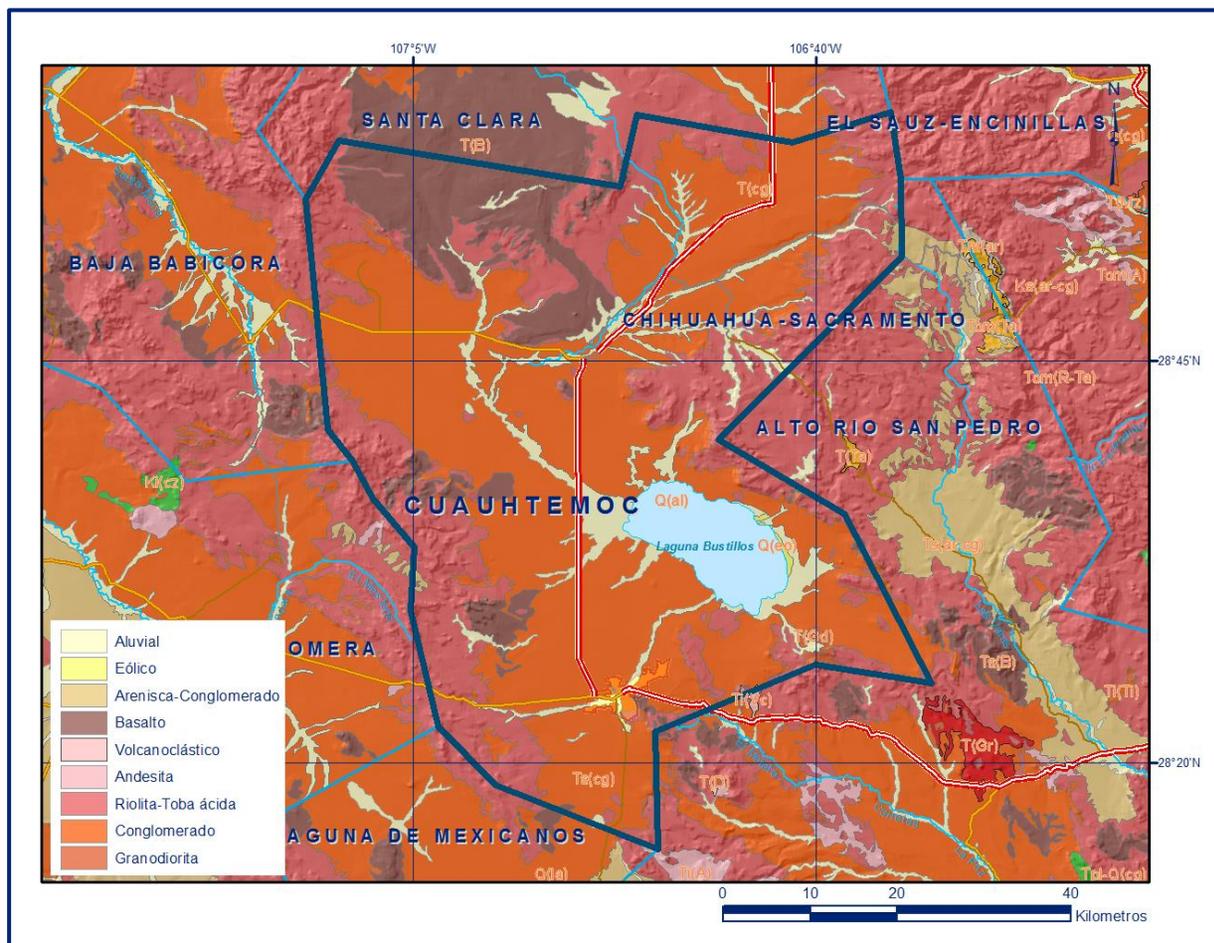


Figura 2. Geología general del acuífero

Las unidades recientes están compuestas por depósitos conglomeráticos y aluviales, al oeste y noreste del acuífero se reporta una serie de pliegues anticlinales y sinclinales en rocas cretácicas ocasionadas por el evento compresivo de la Orogenia Laramide.

4.1 Estratigrafía

La geología regional de la zona en la que se ubica el acuífero está representada por rocas sedimentarias, volcánicas y en menor proporción metamórficas, cuya edad varía del Precámbrico hasta el Reciente.

PRECÁMBRICO

La unidad litológica de esta edad consiste, en su parte basal, de un complejo metamórfico de gneises en facies de anfibolita (Blount, 1982) que aflora en forma de ventana erosional en el rancho de Los Filtros; discordantemente está cubierto por una potente secuencia sedimentaria que abarca desde el Pérmico inferior hasta el Cretácico Superior.

PALEOZOICO

Formación Villa Aldama o Rara

Definida por Ramírez y Acevedo, en 1957, está constituida una secuencia de metalutitas y metareniscas de color gris, laminadas, de edad tentativa Pérmico Inferior-Triásico, que aflora en el extremo noreste de la región y se extiende hasta el Rancho Los Filtros. Presenta abundante plegamiento y fallamiento inverso.

Es notable la presencia de fracturas de tensión rellenas de cuarzo lechoso, principalmente en los estratos de metarenisca, también rellenan planos de fallamiento inverso. Generalmente forma una serie de lomeríos de pendientes suaves y se estima que su espesor alcanza 1,200 m.

CRETÁCICO INFERIOR

Se depositan cinco formaciones en la secuencia siguiente: cubriendo discordantemente a la Formación Villa Aldama.

Formación Navarrete

Nombre formalmente definido por W.T. Haenggi (1966), quien describe la sección tipo ubicada a 2 km al NE del Rancho de La Abuja, Municipio de El Cuervo.

Está compuesta por una secuencia de areniscas verdes con intercalaciones de lutitas de color gris verdoso, asociadas a delgadas capas de evaporitas. Es la unidad más antigua del sistema Cretácico conocida en el estado de Chihuahua.

Formación Las Vigas

Burrows (1910), designa con este nombre a los sedimentos clásticos y calcáreos que subyacen a la Formación Cuchillo y sobreyacen concordantemente sobre la Formación Navarrete. Su litología es muy consistente y está constituida por una secuencia de areniscas de color gris, verde y rojo; en parte calcárea, de grano grueso a fino, dispuestas en capas que varían desde delgadas a gruesas y ocasionalmente masivas, que intemperizan en tonos amarillentos, verdes y rojizos.

Presentan intercalaciones de lutitas y lutitas limolíticas de color rojo a verde, gris y amarillento. Su porción superior tiene mayor contenido de areniscas y presenta abundante estratificación cruzada. Afloran al noreste y sureste de la región.

Formación Cuchillo

Con este nombre tomado de la localidad Cuchillo Parado, Burrows (1910) describe a la localidad tipo en los sedimentos de facie lagunas, que sobreyace a los lechos rojos de la Formación Las Vigas.

Está conformada por una secuencia evaporítica hacia la base, y en la parte superior de calizas y lutitas; que afloran en las sierras del Cuervo y Magistral. Forma dos cadenas montañosas de caliza amarillenta con abundantes fragmentos de conchas, que se encuentran separadas por calcilutitas de color rojizo y verdoso, que en la mayoría de los se encuentran reemplazadas por gruesas capas de yeso.

Formación Aurora

Burrows (1910), establece este término para referirse a las secciones calcáreas en la región de Cuchillo Parada. Se trata de calizas de grano fino tipo mudstone, predominantemente de color gris claro y con cambios textuales a grainstone, de estratificación masiva hasta de 3 m, con abundante macrofauna y vetillas de calcita en diferentes direcciones y nódulos de pedernal oxidados. Su espesor varía de 70 a 250 m, aunque en algunas localidades se ha reportado hasta 1450 m. El ambiente de depósito de esta unidad se considera que corresponde a facies de plataforma somera, lo que facilitó el depósito de estratos gruesos.

Conglomerado Sacramento

A fines del Cretácico inferior se depositó un conglomerado oligomítico de fragmentos calcáreos (Torres, 1991), denominado Sacramento, el cual cubre discordantemente a las unidades anteriores y marca el cambio entre el Cretácico Inferior y el Superior.

CRETÁCICO SUPERIOR

Sobreyaciendo el paquete anterior, se tienen tres unidades correspondientes al Cretácico Superior, que fueron depositadas en el orden siguiente:

Grupo Washita

Está formado por las formaciones Georgetown, Salmon Peak, Del Río y Buda; y constituido por lutitas, calizas, calizas arcillosas y margas.

Formación Ojinaga

Con este nombre Burrows (1909) designó a las lutitas y areniscas con estratos subordinados de caliza, dolomita y limolita, que contienen concreciones calcáreas, amonitas y fósiles de *Inoceramus* sp. Presentan un espesor de 650 m en su localidad tipo situada en el área de Ojinaga, Chihuahua y aflora en el extremo sur de la Sierra Magistral y al norte de la Sierra Chacoñeda.

Formación San Carlos

Definida formalmente por Vaughan (1900), yace concordantemente sobre la Formación Ojinaga. Está constituida por areniscas y lutitas, aflora en la Sierra Magistral.

Rocas Volcánicas

Cubriendo discordantemente a las rocas sedimentarias se depositaron, durante el Cretácico Superior, andesitas y riolitas con ignimbritas pertenecientes al Grupo Volcánico Cañón de Majalca (Mauger, 1979); durante la etapa final del Cretácico se depositaron andesitas basálticas del Grupo Peñas Azules (Spruill, 1976).

TERCIARIO

Paleoceno

Está representado por tres unidades que son: riolitas bandeadas y masivas que afloran en la Sierra de Sacramento, descansando sobre la unidad anterior se tiene a las denominadas Andesitas Viejo (Mauger, 1983); que se distribuyen en la Sierra Sacramento. Por último, se depositaron brechas polimícticas de origen sedimentario, definidas y estudiadas por Mauger (1981), como parte del Grupo Cuevas.

Intrusionando a las rocas mesozoicas se tiene un tronco granodiorítico que aflora en la Sierra Magistral; su edad es de 59 m.a., (Blount, 1982).

Una cuarzomonzonita de edad Paleoceno (K-Ar 57 m.a.) descrita por Mauger (1981), aflora al norte de Punta de Agua o Cuauhtémoc.

En la zona de Calera aflora un granito de edad similar estudiado por Duex (1983), e incluye un enjambre de diques riolíticos, intrusionan y metamorfizan a una serie de derrames y brechas de composición intermedia.

Eoceno

De esta edad son las tobas riolíticas, basaltos, andesitas y derrames riolíticos.

Las primeras corresponden a la Formación Loma del Toro, (Stimac, 1983), su distribución se localiza en la zona minera de Cusihiuriachi, el basalto fue definido por Mauger (1983), como parte de la unidad La Trampa, sus únicos afloramientos son en la región de Majalca; sobreyaciendo discordantemente afloran andesitas pertenecientes a la unidad Picos Gemelos. Intrusionando a derrames andesíticos de la Formación Loma del Toro, aflora un pórfido monzonítico en troncos localizados en las inmediaciones del rancho Buenos Aires, Walk (1983), los dató por el método K-Ar en 37.2 m.a. A finales del Eoceno se depositaron los derrames riolíticos de la unidad Sepúlveda (Mauger, 1990).

Oligoceno

Está caracterizado por depósitos de rocas volcánicas de diferentes composiciones como dacitas, riolitas, tobas riolíticas, un conglomerado polimíctico con toba riolítica, andesitas, basaltos, traquitas y traquiandesitas.

Las dacitas de la unidad Mina afloran en la porción centro-sur en forma de derrames; a esta unidad le sigue la unidad Vista, que contiene derrames de riolitas con estructura de flujo, localmente silicificadas, que en general descansan sobre andesitas del Eoceno; comprenden diferentes unidades descritas por Kempter (1986) y Duex (1983). Afloran en diversas localidades, destacando la Caldera de Tomochic y la zona de Pedernales, ubicada al oeste de la ciudad de Chihuahua.

Las tobas riolíticas de la unidad Abajo, comprenden varias unidades que han sido definidas por diferentes autores entre ellos Kempter (1986), Duex (1983) y Cook (1990); estas rocas son las de mayor distribución; comprende, además tobas líticas y tobas riolíticas, que afloran en el extremo oeste. De esta misma edad es un pórfido tonalítico sumamente alterado que aflora en el municipio de Riva Palacio, en el poblado de Santa Rosa al noreste de la Laguna Bustillos.

Los miembros conglomeráticos y tobáceos de la Formación Tomochic (Megaw, 1979), afloran en el extremo oeste, en los bordes de la caldera de Tomochic. Las andesitas de la unidad Ojo Blanco, estudiadas por Kempter (1986), se distribuyen al oeste y suroeste en las localidades de Tomochic, Tajirachic y Cohaguachic. Sobreyaciendo discordantemente a la unidad anterior afloran basaltos en la Sierra del Tambor. La unidad Pinto (Kempter, 1986) y Swanson (1977), conformada por traquitas sobreyacen discordantemente a los basaltos, muestran vesículas con brechas de flujo y horizontes vítreos, su depósito fue durante el desarrollo de la caldera de Tomochic.

En las inmediaciones del poblado El Aguaje, aflora una granodiorita de edad oligocénica (31.7 m.a. K-Ar) que intrusión a rocas calcáreas, desarrollando una zona de skarn con emplazamiento de mineralización de hierro. A finales del Oligoceno se depositaron rocas traquiandesíticas (Kempter, 1986), que afloran en la localidad El Aguaje (Carta Geológico-Minera "Chihuahua" H13-10. SGM. 1997, escala 1:250,000).

Mioceno

A esta edad pertenece un conglomerado polimíctico compuesto, en su mayor parte, por fragmentos de rocas ígneas, definido por Dumble (1900), como Formación Báucarit.

CUATERNARIO

Pleistoceno

Durante el Pleistoceno se depositaron gravas y arenas semiconsolidadas.

Holoceno

Está representado por depósitos aluviales constituidos por gravas, arenas y arcillas, producto de la erosión de las rocas preexistentes, que rellenan los valles y planicies, así como los cauces de los ríos y arroyos. En esta misma unidad se incluyen los depósitos lacustres que conforman la zona de inundación de la Laguna Bustillos.

4.2 Geología estructural

La deformación en el área se manifiesta en estructuras que se desarrollan durante diferentes eventos tectónicos. Los gneises del Precámbrico presentan superficies de foliación bien definidas, las cuales son interpretadas como producto de la Orogenia Grenvilliana, (Handschy 1986, Ortega et al. 1992), García (1989), definió, en unidades precámbricas y paleozoicas, la presencia de micropliegues con ejes orientados NE-SW, asociándolos a la de formación Apalachiana en el Pérmico Superior.

Sin embargo, las rocas cretácicas desarrollan un plegamiento con ejes orientados NNW-SSE (Sierra del Cuervo, Sierra Azul, Magistral y Cerro Calera), estas estructuras son atribuidas a la compresión de la deformación Laramide durante el Cretácico Superior.

En el área no se observaron patrones de interferencia que puedan confirmar la presencia de dos eventos compresivos sobrepuestos (Apalachiano y Laramide), en las rocas pérmicas.

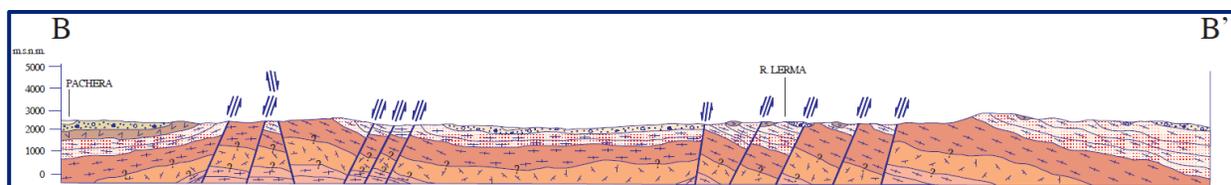
Finalmente, el último régimen tectónico que afectó a la región fue de naturaleza extensional, ocasionando sierras y cuencas que conforman una sucesión de fosas y pilares definidos por fallamiento normal paralelo orientado NW-SE y N-S. Posiblemente asociado a este régimen se desarrolló el episodio volcánico terciario, que produjo emisiones de grandes volúmenes de ignimbritas y derrames que provocaron el colapso de calderas con diámetros de varias decenas de kilómetros, las más reconocidas son la caldera de Tomochic, la caldera de Majalca y la caldera de Pastoras, cuyos diámetros son de 20; 20 y 25 km respectivamente. Acompañando a los procesos de formación de calderas en etapas finales tuvo lugar una actividad de resurgencia que originó arqueamientos sobre las rocas intracaldera (Carta Geológico-Minera "Chihuahua" H13-10. SGM. 1997, escala 1:250,000).

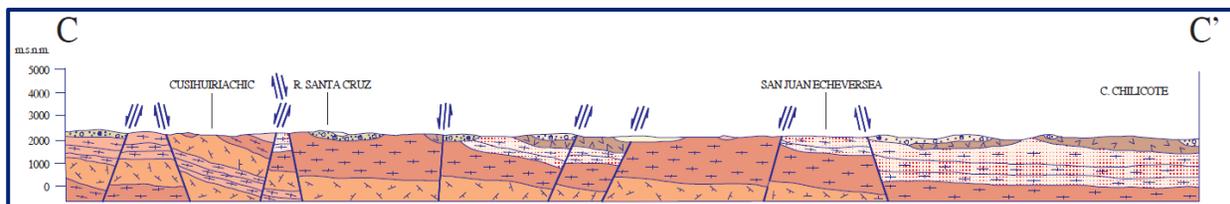
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, geofísica e hidrogeológica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, podemos afirmar que el acuífero se encuentra constituido por dos medios hidráulicamente conectados; en su parte superior, por un medio granular conformado por depósitos lacustres, sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados polimícticos que rellenan el valle tectónico, la porción inferior está constituida por un medio fracturado que se aloja en las rocas volcánicas de composición riolítica, entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas, ignimbritas, así como basaltos, y rocas sedimentarias (calizas, lutitas y areniscas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El medio fracturado aflora en las sierras que rodean el acuífero, en tanto que el medio granular sobreyace al acuífero fracturado en las partes bajas del valle aluvial, donde el espesor del relleno aumenta de la periferia hacia el centro del valle y es superior a 500 m. A mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas por lutitas (figura 3).

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento y localmente por rocas intrusivas sin alteración.





Fuente: Carta Geológica-Minera H13-10 "Chihuahua". Esc. 1:250.000 (SGM, 1997)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, conformado por dos medios: uno de tipo fracturado y otro granular, con interconexión hidráulica entre ellos. La porción superior está constituida por sedimentos aluviales de granulometría variada, sedimentos arcillosos y conglomerados; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El espesor de la unidad superior supera los 350 m y se incrementa hacia el centro del valle. A mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas con lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 1991, se realizaron 16 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación, reinterpretadas en 1998.

Adicionalmente, se cuenta con información de otras 6 pruebas también de corta duración, 3 ejecutadas en 2009 en el acuífero vecino Chihuahua-Sacramento, 3 realizadas en el acuífero Villalba en 2007, cuyos resultados se pueden extrapolar al acuífero Cuauhtémoc por correlación hidrogeológica ya que todos ellos tienen la misma constitución, origen y evolución geológica.

De los resultados de su reinterpretación por métodos analíticos convencionales, se deduce que los valores de transmisividad varían de **6.9×10^{-5} a $15.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , en tanto que la conductividad hidráulica varía de **4.6×10^{-7} a $2.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (0.04 a 1.7 m/d)**.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que se desconoce el valor del cambio de almacenamiento y rendimiento específico.

Sin embargo, para el modelo de simulación, por la constitución geológica del acuífero se le asignaron valores de coeficiente de almacenamiento que varían de 0.00001 a 0.01 y de rendimiento específico que varían de 0.05 a 0.13.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se cuenta con información para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2001-2013, que es el que presenta la mayor cantidad de información con la mejor distribución geográfica.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático en el año 2013 registró valores que variaban de 30 a 210 m.

Las menores profundidades, de 30 a 50 m, se presentan en torno de la Laguna Bustillos, y se incrementan gradualmente conforme se asciende topográficamente hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero.

Los niveles más profundos, de 120 a 210 m, se registran en la porción nororiental del acuífero en la región comprendida entre la Colonia Álvaro Obregón y los Campos Menonitas 61 y 63.

En la principal zona de explotación, ubicada al norte y noroeste de Ciudad Cuauhtémoc, la profundidad al nivel del agua subterránea varía de 60 a 100 m (figura 4).

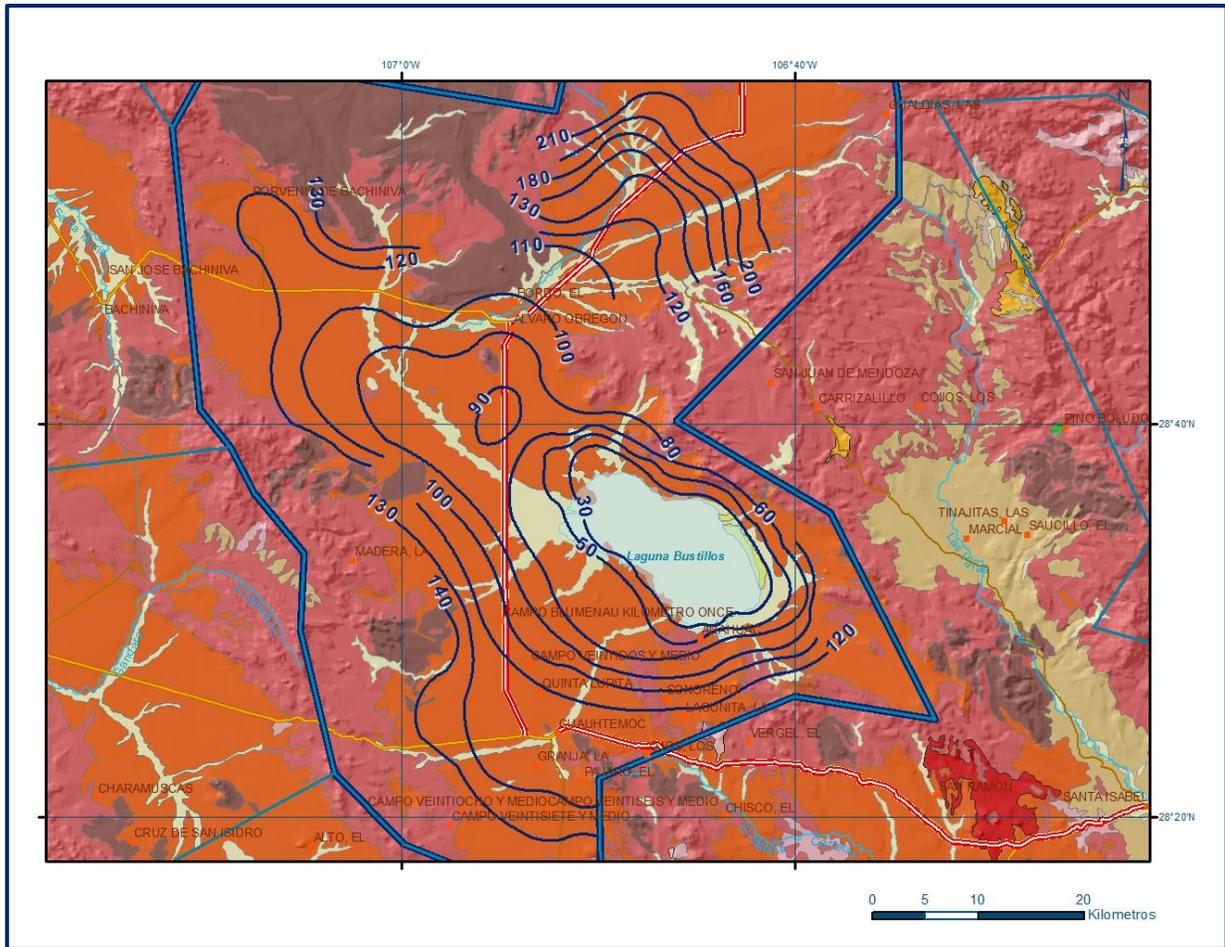


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático para el año 2013 presenta cargas hidráulicas que varían de 2100 a 1910 msnm, que se incrementan de la porción central del acuífero hacia los flancos que las sierras que delimitan el acuífero, conforme se asciende topográficamente, al igual que los valores de profundidad al nivel estático.

La red de flujo subterráneo muestra una configuración concéntrica hacia la porción central y hacia la Laguna Bustillos. En la región central se ha formado un extenso cono de abatimiento, definido por la curva 1910, que se extiende en la principal zona de explotación agrícola, desde la región noroccidental de la Laguna Bustillos hasta los Campos Menonitas II (figura 5).

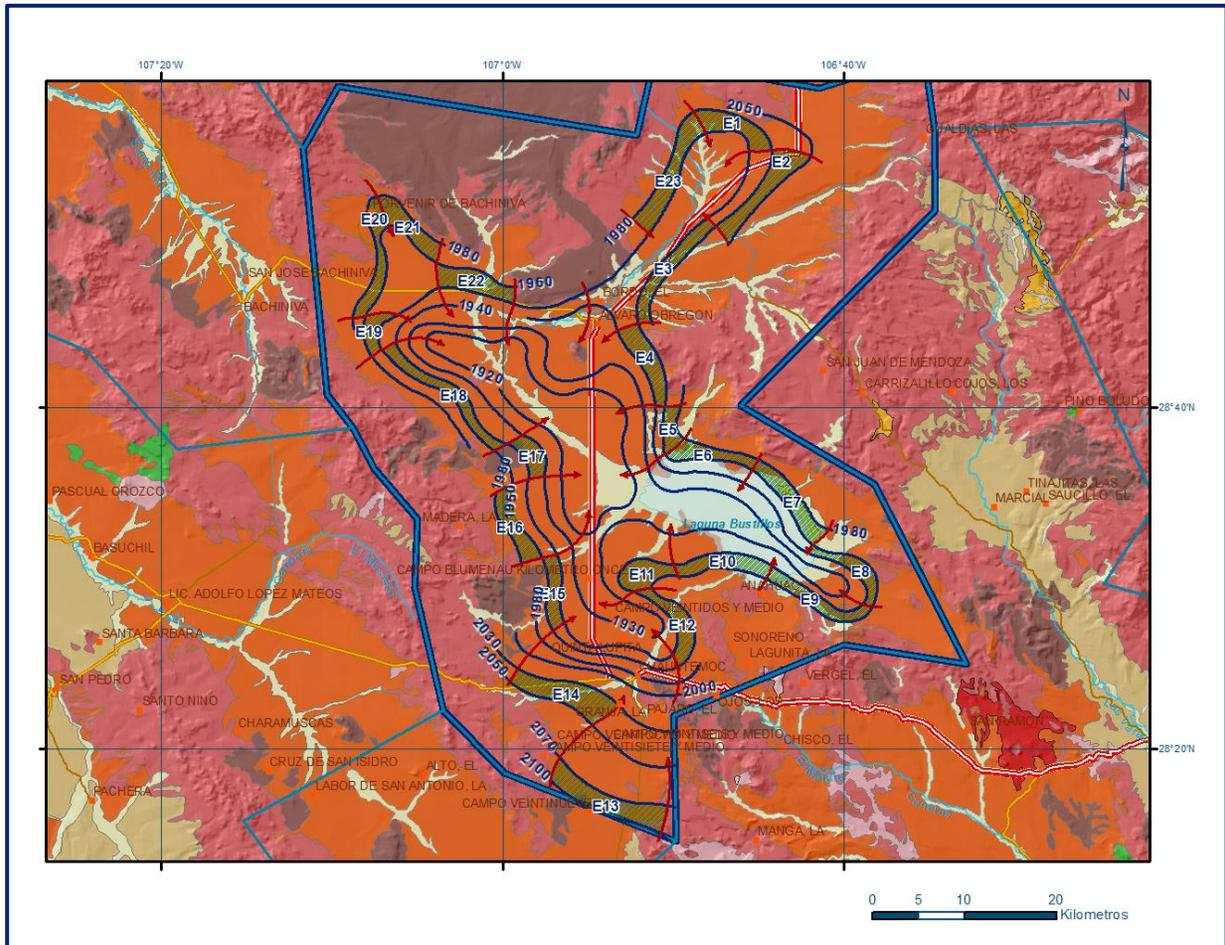


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2001-2013, registra abatimientos que varían de 5.0 a 40.0 m, que representan un ritmo anual que varía de 0.4 a 3.3 m, con un promedio de 1.7 m.

En la zona de explotación intensiva para uso agrícola se registran abatimientos de 20 a 2 m, es decir, un ritmo anual de 1.7 a 2.1 m.

Los mayores abatimientos que son del orden de los 3.3 m anuales, se registran al norte de Ciudad Cuauhtémoc y al sur de Colonia Álvaro Obregón, formando conos de abatimiento que posiblemente son generados por la extracción de agua para abastecimiento de agua potable y para uso agrícola, respectivamente (figura 6).

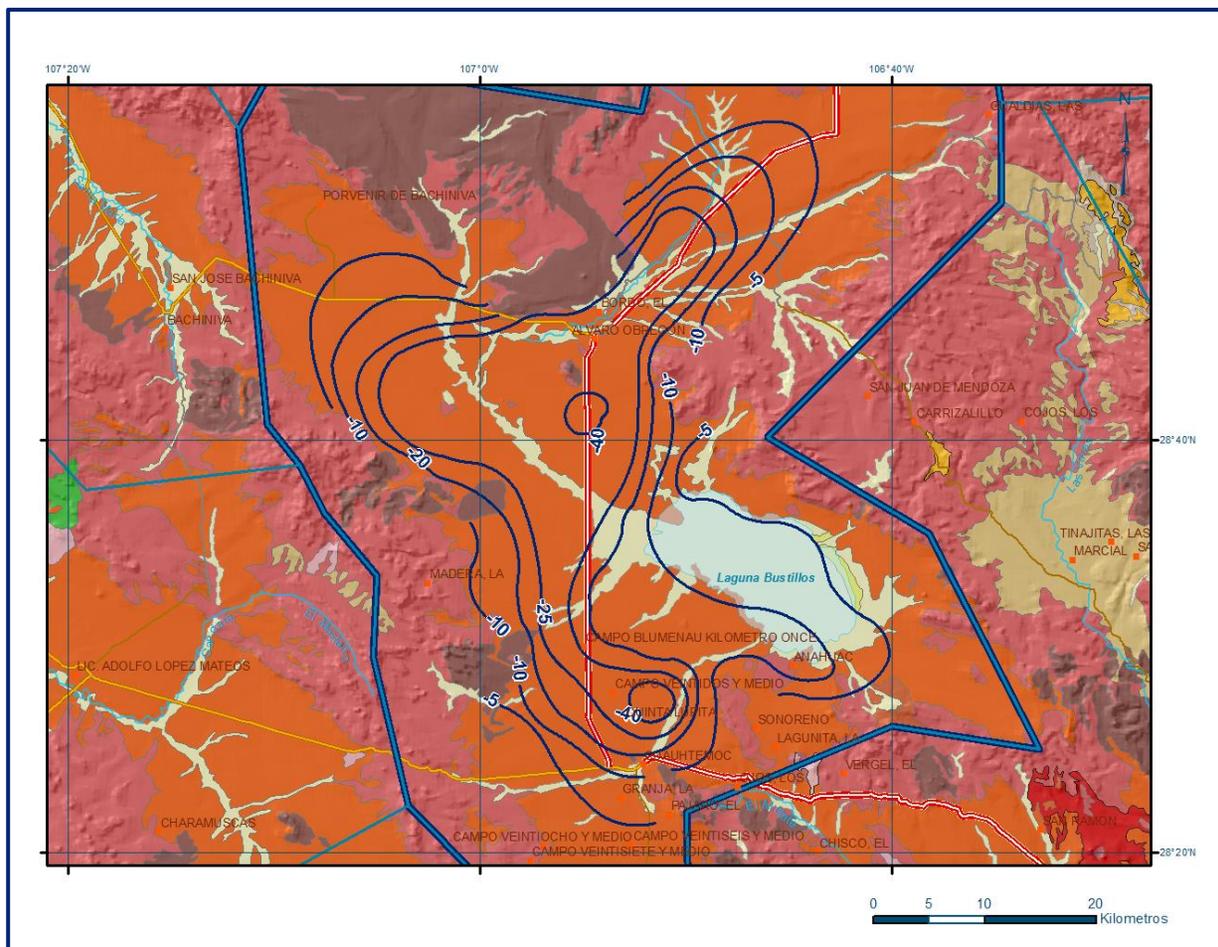


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2001-2013)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2013, se tomaron 10 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, alcalinidad total, dureza total, sólidos totales disueltos, flúor y arsénico, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

Adicionalmente, se cuenta con la información de los análisis de 38 muestras recolectadas y analizadas en 2009 por la Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua, cuyos resultados incluyeron las determinaciones dureza total, sulfatos, sólidos totales disueltos, flúor y arsénico.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, en todos los aprovechamientos no se sobrepasa el límite de sólidos totales disueltos (STD) que es de 1000 mg/l, establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, ya que su concentración varía de 156 a 792 mg/l.

En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 200 a 752 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la zona que rodea a la Laguna Bustillos, y particularmente en las inmediaciones del poblado Anáhuac; en tanto que las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero.

Ambos valores se incrementan gradualmente en la dirección del flujo subterráneo, de manera concéntrica hacia la Laguna Bustillos. La temperatura de las muestras de agua varía de 17.0 a 24.0 °C y el pH de 7.4 a 8.2.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, predomina la familia bicarbonatada-cálcica que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas volcánicas y sedimentarias carbonatadas.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), de las 10 muestras de agua analizadas en 2013, 2 se clasifican como C1S1, que representa bajo contenido de sales y baja concentración de sodio intercambiable, 7 se clasifican como C2S1, que representan contenido medio de sales y concentración media de sodio intercambiable.

Ambas clasificaciones se consideran aptas para uso agrícola. Sólo 1 muestra se clasifica como C3S1, que representa agua con alto contenido de sales y baja concentración de sodio intercambiable, cuya utilización en la agricultura está restringida a suelos con buen drenaje, que requieren lavados y selección de cultivos tolerantes a las sales.

En cuanto a los límites máximos permisibles (LMP) que establece la NOM mencionada, 8 muestras superan ligeramente el establecido de 1.5 mg/l para el flúor.

Otras 6 muestras de las obtenidas en 2009, y 2 muestras de las colectadas en 2013, ya que presentaron concentraciones de que varían de 1.7 a 2.5 mg/l. El arsénico presentó concentraciones menores a 0.025 mg/l que establece la NOM; sólo una muestra, obtenida en 2009, registró una concentración elevada de sulfatos de 546 mg/l, que supera el LMP de 400 mg/l que establece la norma mexicana.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De la revisión y análisis hechos a los censos de aprovechamientos realizados en estudios previos y complementados durante el estudio llevado a cabo en 2013, se registraron un total de 3,663 aprovechamientos, todos ellos pozos; de ellos 3,596 se consideran activos y 67 inactivos.

De los aprovechamientos activos, 1,716 (47.7%) se destinan al uso agrícola, 149 (4.1%) para uso público-urbano, 23 (0.6%) para uso industrial y 1708 (47.5%) para uso pecuario.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **497.9 hm³ anuales**, de los cuales 477.4 hm³ (95.9%) son para uso agrícola, 15.2 hm³ (3.0%) para abastecimiento de agua potable a las poblaciones de la región, 4.5 hm³ (0.9%) para uso industrial y 0.8 hm³ (0.2%) para el uso doméstico-pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2001-2013, en una superficie de **1,850 km²**, 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 la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual 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 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 agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; de la infiltración de las fugas en la red de agua potable y del sistema de alcantarillado en la zona urbana de la ciudad de Cuauhtémoc, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri).

Para este caso, debido a la profundidad al nivel estático en las zonas agrícolas es superior a 80 m, al uso de sistemas eficientes de riego y a que el volumen destinado para abastecimiento de agua potable es de 11.9 hm³ anuales, para fines del balance de aguas subterráneas se considera que no existe recarga incidental. **Por lo tanto, Ri=0 hm³/año.**

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 (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión:

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

Donde:

Rv: Infiltración por lluvia

Eh: Recarga por flujo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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 área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

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

El cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2013 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

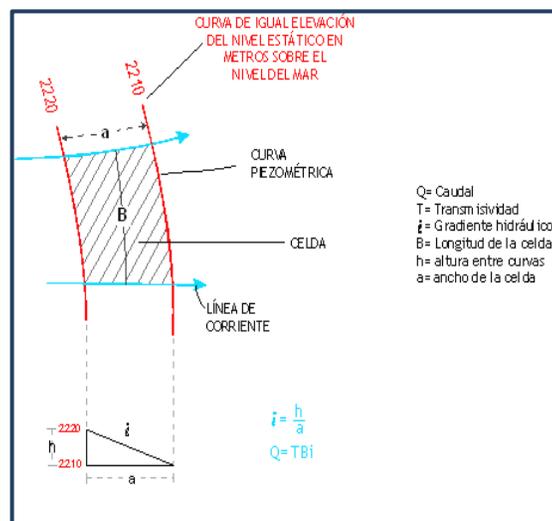
Donde:

Q = Gasto [m^3/s];

T = Transmisividad [m^2/s];

B = Longitud de la celda [m];

i = Gradiente Hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **110.6 hm³/año**.

Los valores de T utilizados corresponden al promedio de los obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos tanto es este acuífero como en otros vecinos que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica, adaptados al espesor saturado de las celdas de flujo.

Tabla 2. Cálculo de entradas horizontales

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	7500	2000	20	0.0100	0.0010	0.0750	2.4
E2	12500	2500	70	0.0280	0.0010	0.3500	11.0
E3	13500	1500	30	0.0200	0.0010	0.2700	8.5
E4	9000	1750	10	0.0057	0.0015	0.0771	2.4
E5	5000	2000	30	0.0150	0.0015	0.1125	3.5
E6	8500	1750	30	0.0171	0.0015	0.2186	6.9
E7	10500	2500	30	0.0120	0.0005	0.0630	2.0
E8	10000	1750	10	0.0057	0.0008	0.0457	1.4
E9	12500	1500	10	0.0067	0.0050	0.4167	13.1
E10	10500	1750	10	0.0057	0.0005	0.0300	0.9
E11	7000	2500	10	0.0040	0.0010	0.0280	0.9
E12	10000	1500	10	0.0067	0.0010	0.0667	2.1
E13	13250	3000	30	0.0100	0.0004	0.0530	1.7
E14	10500	2500	20	0.0080	0.0004	0.0336	1.1
E15	8000	1750	10	0.0057	0.0004	0.0183	0.6
E16	8500	2000	10	0.0050	0.0004	0.0170	0.5
E17	5000	2750	20	0.0073	0.0010	0.0364	1.1
E18	16000	1500	10	0.0067	0.0040	0.4267	13.5
E19	4000	2000	10	0.0050	0.0040	0.0800	2.5
E20	12500	1750	20	0.0114	0.0040	0.5714	18.0
E21	7500	2250	20	0.0089	0.0040	0.2667	8.4
E22	8500	2500	10	0.0040	0.0040	0.1360	4.3
E23	13000	2250	20	0.0089	0.0010	0.1156	3.6
Total entradas							110.6

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial mediante la extracción por bombeo (B).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen calculado de extracción por bombeo es de **497.9 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2001-2013 (figura 6).

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.10, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S :** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A :** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km^2)
- h :** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -2382.5 hm^3 , por lo que el promedio anual es de **-198.5 hm^3** .

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2001-2013)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km^2)	S_y	$\Delta V(S)$ ($\text{hm}^3/\text{año}$)
-40	-40	19.6	0.1	-78.4
-25	-25	418.0	0.1	-1045.0
-20 a -25	-22.5	186.0	0.1	-418.5
-10 a -20	-15	302.4	0.1	-453.6
-5 a -10	-7.5	312.0	0.1	-234.0
0 a -5	-2.5	612.0	0.1	-153.0
Área de balance		1850.0	TOTAL	-2382.5
		Promedio anual		-198.5

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:

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

$$R_v = 497.9 + 0.0 - 198.5 - 110.6$$

$$R_v = 188.8 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, la recarga total (R) es:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h \\ R &= 188.8 + 110.6 \\ R &= 299.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

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 retorno de riego.

Para este caso su valor es **299.4 hm³/año**, todos ellos son 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 el caso de este acuífero no existen descargas naturales comprometidas, por lo que **DNC= 0.0**.

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 **307,150,545 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 299.4 - 0.0 - 307.150545 \\ \text{DMA} &= -7.750545 \text{ m}^3 \text{ anuales.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **7,750,545 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2013 Estudio de Manejo Integrado del Acuífero de Cuauhtémoc, en el estado de Chihuahua. Realizado por URMO Ingeniería Integral, S.A. de C.V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1973. Estudio Geohidrológico de la Zona de Cuauhtémoc, Chihuahua. Realizado por Ariel Construcciones, S.A.