CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO BUENAVISTA DE CUÉLLAR (1204), ESTADO DE GUERRERO

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
1.1 Localización 2
1.2 Situación administrativa del acuífero 4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 5
3. FISIOGRAFÍA 6
3.1. Provincia fisiográfica 6
3.2. Clima 7
3.3. Hidrografía 7
3.4. Geomorfología 8
4. GEOLOGÍA 9
4.1. Estratigrafía 10
4.2. Geología estructural 17
4.3. Geología del subsuelo 18
5. HIDROGEOLOGÍA 19
5.1. Tipo de acuífero 19
5.2. Parámetros hidráulicos 19
5.3. Piezometría 19
5.4. Comportamiento hidráulico 20
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 21
7.1. Entradas 21
7.1.1. Recarga vertical (Rv) 22
7.2. Salidas 27
7.2.1. Bombeo (B) 27
7.2.2. Descarga a través de manantial (Dm) 27
7.2.3. Descarga por flujo base de los ríos (Dfb) 27
8. DISPONIBILIDAD 27
8.1. Recarga total media anual (R) 28
8.2. Descarga natural comprometida (DNC) 28
8.3. Volumen extracción de agua subterránea (VEAS) 28
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-2000 "Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA). Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar. La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobre explotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El acuífero Buenavista Cuéllar, definido con la clave 1204 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción norte del Estado de Guerrero, colindando con el Estado de México y Morelos, entre los paralelos 18^0 27' y 18^0 48' de latitud norte y los meridianos 99^0 47' y 99^0 21' de longitud oeste; abarcando una superficie aproximada de 672 km^2. Limita al norte con el acuífero Tenancingo, perteneciente al Estado de México; al noroeste con los acuíferos Arcelia y Altamirano-Cutzamala, del Estado de Guerrero, al este con el acuífero Zacatepec, perteneciente al estado de Morelos y al sur con los acuíferos Iguala y Poloncingo, del Estado de Guerrero (figura 1).

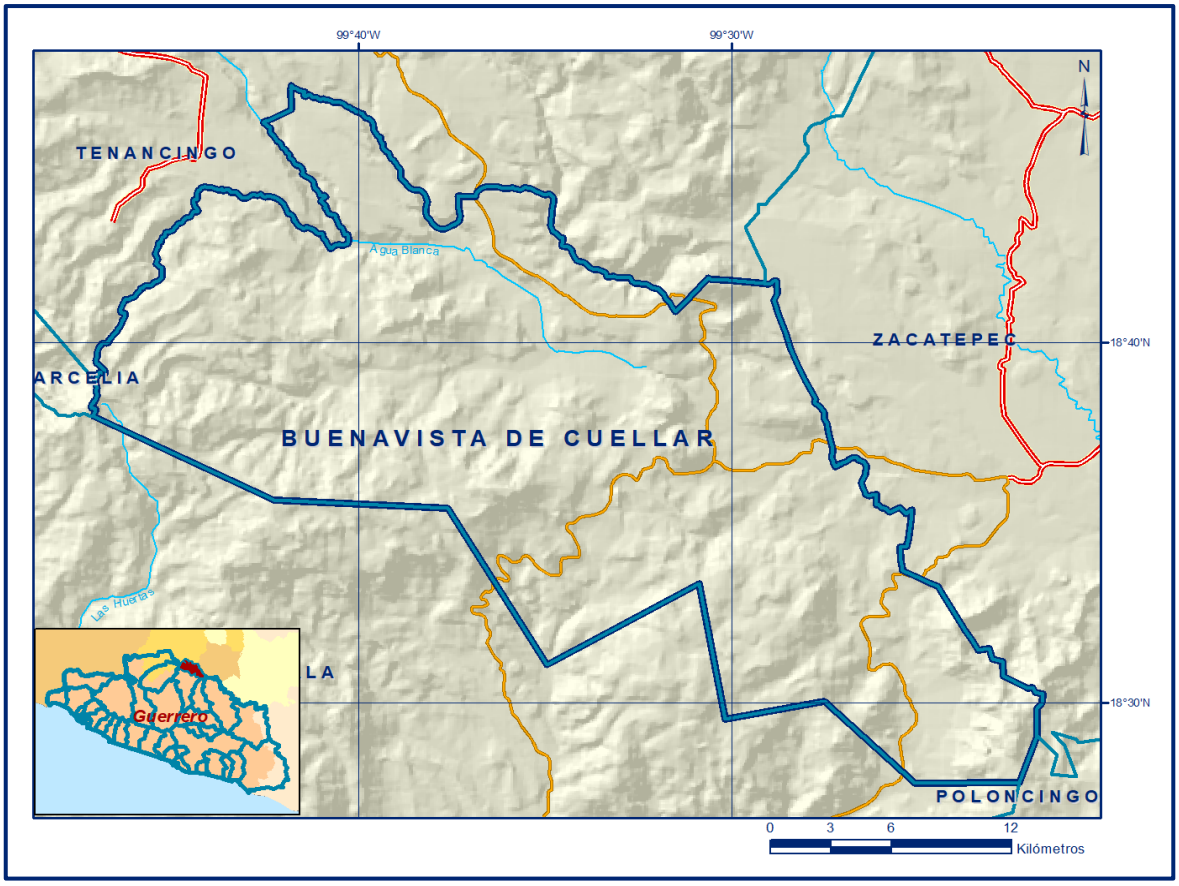


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el área del acuífero abarca en su totalidad el municipio Pilcaya, casi la totalidad de Tetipac y parcialmente los municipios de Taxco de Alarcón y Buenavista de Cuéllar. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

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

ACUIFERO 1204 BUENAVISTA DE CUELLAR							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	21	48.1	18	29	3.7	
2	99	22	17.0	18	27	47.8	
3	99	25	4.6	18	27	45.8	
4	99	27	30.6	18	30	2.6	
5	99	30	10.2	18	29	32.3	
6	99	30	51.5	18	33	17.9	
7	99	34	56.4	18	31	3.9	
8	99	37	35.9	18	35	24.5	
9	99	42	16.8	18	35	37.1	
10	99	47	6.0	18	37	57.1	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE ESTATAL
11	99	47	2.6	18	38	54.7	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	99	29	7.6	18	41	38.1	DEL 12 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	99	21	48.1	18	29	3.7	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Buenavista de Cuéllar pertenece al Organismo de Cuenca IV "Balsas" y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guerrero. Su territorio se encuentra parcialmente vedado; la porción oriental está sujeta a las disposiciones del "*Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en los Municipios de Iguala de la Independencia, Taxco de Alarcón, Huitzuco de los Figueroa, Tepecoacuilco de Trujano y Cocula, Gro.",* publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 20 de febrero de 1978. Esta veda se clasifica como tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones para usos domésticos.

En los extremos norte, oeste y suroriental no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Buenavista de Cuéllar, clave 1204, se encuentra sujeta a las disposiciones del "*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 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, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. El uso principal del agua es el público-urbano. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca "Río Balsas", instalado el 26 de marzo de 1999 y una pequeña porción al este pertenece a la Comisión de Cuenca Río Apatlaco.

En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna ni se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios hidrogeológicos de evaluación a nivel regional. Algunos se enfocaron en la determinación de la disponibilidad media anual de agua subterránea. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE CINCO ZONAS DE GUERRERO, elaborado por GEORAMA, S.A., para la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (S.A.R.H.), en 1978. Su objetivo consistió en la determinación de la existencia de acuíferos económicamente explotables, con particular interés en la evaluación de su potencial y calidad del agua subterránea, para determinar su aprovechamiento para los diferentes usos. Las zonas en donde se realizaron estos estudios fueron: Buenavista de Cuéllar, Iguala, El Naranjito, Ixtapa y San Luis. Se efectuaron estudios geológicos, petrográficos, paleontológicos, estratigráficos, estructurales, geofísica y análisis geoquímicos.

SINOPSIS GEOHIDROLÓGICA DEL ESTADO DE GUERRERO, elaborado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 1989. El objetivo de este trabajo fue dar a conocer la geohidrología general de los principales acuíferos del estado: Huitzuco, Buenavista de Cuéllar, Altamirano-Cutzamala, Arcelia, Coahuayutla, El Naranjito, Bahía de Zihuatanejo, Coyuquilla, Atoyac, Coyuca, Conchero, Bahía de Acapulco, La Sabana, Chilpancingo, Copala y Cuajinicuilapa. Describe la hidrología, geología y plantea el balance hidrológico integral en función de los correspondientes balances de aguas superficiales y subterráneas, así como su proyección a futuro.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS TLAPA-HUAMUXTITLÁN, POLONCINGO, BUENAVISTA DE CUÉLLAR Y TLACOTEPEC, EN EL ESTADO DE GUERRERO. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo S.A DE C.V., para la Comisión Nacional del Agua en 2011. El objetivo general de este estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, nivelación de brocales, sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, Subprovincia Cuenca Balsas-Mezcala, en el límite con la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Raisz E., 1964). Al sur limita con la subprovincia de la Vertiente del Sur, perteneciente a la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur.

La Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja, se encuentra constituida por una serie de montañas y sierras que presentan grandes desniveles. Su representación dentro del área estudiada se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte meridional, donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2,500 msnm.

Es una cadena montañosa localizada en el sur de México que se extiende a lo largo de 1200 km, desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Está orientada de manera paralela a la costa del Océano Pacífico y a la porción occidental del Eje Neovolcánico, del que es separada por la Depresión del Balsas.

El Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur se enlazan en el norte de Oaxaca, en el Escudo Mixteco. Su altitud media es de 2,000 msnm, el punto más alto es el cerro Quie Yelaag que está a una altura de 3,710 msnm, en el sur de Oaxaca.

En el occidente, esta sierra empieza como Sierra del Alo en los municipios de Tecalitlán y Pihuamo en Jalisco, posteriormente atraviesa Michoacán, donde se le conoce como sierra de Coalcomán. Después de cruzar el Río Balsas, entra al occidente de Guerrero donde se le conoce como Cumbres de La Tentación. Atraviesa todo Guerrero y en sus límites con Oaxaca es conocida como Sierra de Coicoyán. Es atravesada por numerosos ríos, los cuales forman profundos cañones, principalmente en Guerrero, donde las partes altas son conocidas como filos.

La Subprovincia Cuenca Balsas-Mezcala está conformada por “profundos y sinuosos valles a lo largo de los cuales los ríos Balsas y Tepalcatepec han ido labrando las sierras en algunas partes de 3,000 m de altura dándole a esta cuenca una topografía muy abrupta” (Raisz, 1964).

En general presenta calizas y conglomerados en sus partes altas que muestran un aspecto redondeado, con drenaje ampliamente espaciado; mientras que, por otro lado, los valles, laderas y partes bajas están constituidas por lutitas, areniscas, limolitas y rocas ígneas que conforman lomeríos con pendientes muy suaves y con un drenaje bien desarrollado.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, en el acuífero Buenavista de Cuéllar predominan tres tipos de clima: en la porción norte el clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano (A C(w_1)); al sur y suroeste el clima es semicálido-húmedo con lluvias en verano (A C(w_2)) y hacia el este el clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw_o).

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 4 estaciones climatológicas: Tetipac, Tepetlapa, Chontalcuatlán y Dos Bocas, y otras más que tienen influencia en el área del acuífero, cuyo registro comprende los últimos 40 años (1970-2010). Con estos datos, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1,044 mm** y **23.3 °C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,950 mm anuales.**

3.3. Hidrografía

De acuerdo a su ubicación geográfica, el área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en la Región Hidrológica No.18 “Río Balsas”, la porción oriental pertenece a cuenca hidrológica Río Grande Amacuzac y la porción occidental a la cuenca Río Balsas-Mezcala. Su territorio está formado por una orografía de grandes elevaciones y fuertes pendientes, poco propicias para el almacenamiento de los escurrimientos superficiales. El patrón de drenaje es de tipo dendrítico con dirección predominantemente al NE-SW, principalmente con régimen intermitente, sólo algunas corrientes tienen flujo base.

El Río Amacuzac es afluente del Río Balsas por su margen derecha; se origina en las faldas del volcán Nevado de Toluca, a una altitud de 2,600 msnm, en las inmediaciones del poblado Tequisquiapan, estado de México se le conoce como Río Texcaltitlán.

En las cercanías de la población de Llano Grande, recibe las aguas del Río Las Flores. Aguas abajo, en territorio del Estado de Guerrero, esta confluencia toma el nombre de Río Chontalcoatlán, posteriormente recibe por su margen izquierda al Río Malinaltenango o Río Salado y después de un desarrollo de 75 km llega a la zona de calizas de la Sierra Cacahuamilpa, en los límites entre Guerrero y Morelos, en donde la corriente desaparece al pie del cerro El Jumil, confluyendo subterráneamente con el río San Jerónimo en las grutas de Cacahuamilpa.

A partir de este punto, la corriente se conoce como Río Amacuzac atravesando el Estado de Morelos, pasando por las poblaciones de Huajintlán, Amacuzac, Miahuatlán, Cajones y Tehuixtla.

El Arroyo San Jerónimo es una de las cuatro corrientes superficiales más importantes del acuífero, se localiza en la porción norte, constituyendo su límite con el Estado de Morelos, tiene sus orígenes fuera del área del acuífero, en la intersección de este con el Arroyo Santa Teresa. El río se conduce subterráneamente para surgir a la superficie en las grutas de Cacahuamilpa. Otros afluentes perennes de importancia conforman el límite del acuífero ya que sus tributarios forman parcialmente su frontera norte, estos son los arroyos Salado y o Apetlahuacán que aguas abajo unen sus caudales al Arroyo San José, para adquirir el nombre de Río Las Dos Bocas.

3.4. Geomorfología

El área del acuífero presenta distintos rasgos geomorfológicos entre los que destacan las sierras, barrancas profundas y valles intermontanos. Las laderas de las barrancas y valles definen pendientes mayores de 35% Las sierras están representadas por elevaciones máximas de poco más de 2,500 msnm que se asocian con las zonas de cabalgaduras, pliegues anticlinales y al emplazamiento de rocas intrusivas y volcánicas. Las cabalgaduras y pliegues fueron originados durante la deformación compresiva de la Orogenia Laramide, evento tectónico que generó el plegamiento de las carpetas sedimentarias mesozoicas.

Por otra parte, de manera menos trascendente, la actividad ígnea extrusiva e intrusiva, ocasionó modificaciones en el relieve asociado al plegamiento, en donde estos procesos exógenos (vulcanismo) y endógenos (intrusiones) rejuvenecieron las características topográficas de la región en donde ocurrió su emplazamiento, configurando la unidad geomorfológica de sierras.

El factor litológico también tiene implicaciones directas con la presencia de los contrastes geomorfológicos: las rocas competentes (calizas, conglomerados, areniscas, andesitas y rocas metamórficas) tienen un comportamiento más resistente a los agentes erosivos y tienden configurar patrones de drenaje de tipo sub-paralelo y paralelo; en tanto que las rocas incompetentes (representadas por las secuencias tipo flysch de lutitas y areniscas, o bien, lutitas y margas), así como por la secuencia de tobas y materiales piroclásticos asociados con un vulcanismo explosivo (flujos de piroclastos, depósitos de caída); se encuentran bien caracterizadas por el desarrollo de un sistema de drenaje dendrítico, derivado de la gran facilidad con que son erosionadas.

Los sistemas de fracturas y fallas ejercen también una influencia dentro de la formación de depresiones, cañadas y barrancas derivados del rompimiento súbito de la continuidad longitudinal de fragmentos homogéneos y su disección lineal.

El paisaje geomorfológico que exhibe la región es consecuencia principalmente de las estructuras plegadas, que ocasionaron el engrosamiento estructural asociado con fallas de cabalgadura y pliegues anticlinales y sinclinales, en donde los altos topográficos (sierras) corresponden con cabalgaduras y anticlinales, y los bajos estructurales conforman valles y lomeríos que se alojan en los anticlinales.

4. GEOLOGÍA

Las diferentes unidades litológicas comprenden rocas metamórficas, sedimentarias marinas tanto de plataforma como de cuenca, rocas ígneas extrusivas y en menor proporción rocas ígneas intrusivas, las cuales en ocasiones se encuentran en contacto ya sea por medio de fallas de cabalgadura o bien por fallas laterales inversas, que le confieren una gran complejidad estructural. En la figura 2 se presenta la geología regional del acuífero. Desde el punto de vista de los Terrenos Tectonoestratigráficos, definidos por Campa y Coney (1983), el acuífero pertenece a los Terrenos Mixteco y Guerrero.

Las rocas vulcanosedimentarias metamorfoseadas, manifiestan características litológicas y estructurales que permiten considerarlas como parte del Terreno Tectonoestratigráfico Guerrero, el cual se divide en tres subterrenos: Zihuatanejo, Huétamo-Arcelia y Teloloapan, cuyos límites estructurales están representados por fallas de cabalgadura (Campa y Coney 1983). El Subterreno Teloloapan manifiesta el evento de acreción de la secuencia de arco volcánico sobre la margen continental, representada por las rocas de la Plataforma Guerrero-Morelos (Terreno Mixteco).

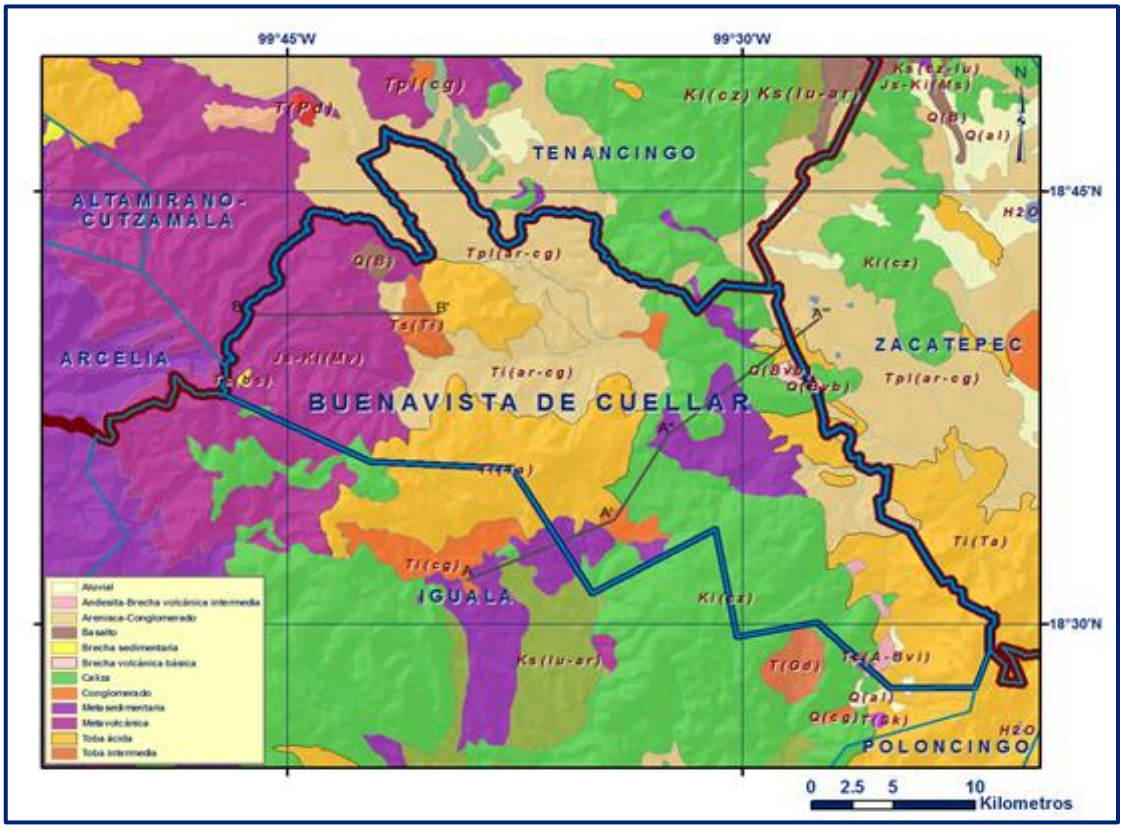


Figura 2. Geología general del acuífero.

4.1. Estratigrafía

La columna estratigráfica que aflora en la región está constituida por rocas cuyas edades varían del Cretácico Inferior al Reciente. A continuación, se describen las distintas unidades, de la más antigua a la más reciente: La unidad más antigua corresponde a la secuencia vulcanosedimentaria metamorfizada de edad Valanginiano-Hauteriviano, que puede ser correlacionada con la Formación Villa Ayala, perteneciente a la secuencia vulcanosedimentaria metamorfizada del Subterreno Teloloapan.

Cretácico

Formación Villa Ayala

De acuerdo con Guerrero (1990) se encuentra constituyendo el macizo del arco volcánico de Teloloapan; consiste de una secuencia compuesta por flujos de lavas andesíticas, intercaladas con capas de espesor medio de areniscas (grauvacas) y estratos delgados de lutitas, materiales líticos que conjuntamente presentan metamorfismo regional de bajo grado en facies esquistos verdes. Su edad se asigna al Valanginiano-Hauteriviano y se encuentran subyaciendo discordantemente a los Esquistos Tejupilco y a la vez están cubiertas concordantemente (?) por las rocas de la Formación Acapetlahuaya.

Formación Chilacachapa

Definida formalmente por Campa (*et. al*. 1976), representan las rocas más antiguas que afloran debajo de la Formación Morelos. Está conformada por calizas arcillosas de estratificación delgada y color oscuro que afloran en el núcleo del Anticlinal de Chilacachapa. Se encuentran fuertemente plegadas y su deformación contrasta con la que muestra las calizas de la Formación Morelos, debido a que esta última es más competente.

Forman lomeríos alineados que en ocasiones muestran pendientes abruptas; ocasionalmente se observan coronadas por crestones que se forman de casquetes calcáreos de la Formación Morelos. En el acuífero se presentan como interestratificaciones de calizas arcillosas, lutitas calcáreas, margas y limolitas, así como algunos horizontes de calizas bioclásticas. La edad de esta formación fue asignada por Ontiveros (1973) como Aptiano Superior, basado en relaciones estratigráficas y en microfauna.

Formación Morelos

Nombre propuesto por Fries (1960) para referirse a una secuencia de calizas de plataforma. De acuerdo con Campa (op. cit.), se caracteriza por estar conformada por calizas en estratos delgados con bandas y lentes de pedernal negro, bancos arrecifales y capas gruesas de calizas de color gris claro, crema y gris oscuro, la cuales en muchos casos tienden a formar biostromas, con predominio de rudistas. Su espesor es desconocido; sin embargo, Tarango, (1973) midió 1,430 m, en tanto que Fries, (1960) reportó un espesor 900 m.

De acuerdo con su contenido faunístico, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano. Subyace por medio de un contacto concordante a las rocas de la Formación Mezcala y se encuentran cabalgadas por las rocas del Subterreno Teloloapan, por medio de un contacto tectónico. Se correlaciona en edad con las formaciones Cipiapa y Orizaba de la porción central de Puebla, con la caliza El Doctor de Querétaro oriental, en el Estado de San Luis Potosí con las formaciones El Abra y Tamaulipas Superior (en la Sierra Madre Oriental).

Formación Amatepec

Esta unidad marca el cambio hacia una sedimentación calcárea, pero en un ambiente de cuenca. Se encuentra distribuida en afloramientos aislados en la porción centro oriental del área. Está constituida por una secuencia de intercalaciones de calizas, calizas arcillosas y lutitas dispuestas en estratos delgados, cuyo espesor se desconoce. Se le asigna una edad Aptiano Superior-Albiano. Esta formación muestra un cambio lateral de facies con la Formación Teloloapan.

Formación Teloloapan

La Formación Amatepec muestra un cambio lateral de facies con esta formación que está constituida por calizas de ambiente marino somero de tipo arrecifal, definidas formalmente por Salinas (1994) como Formación Teloloapan, la cual se manifiesta en afloramientos aislados en forma de “parches” sin continuidad.

Formación Mexcala

Definida por Fries en 1960 quien la describe como una secuencia de intercalaciones de lutitas calcáreas y areniscas. Tiene una amplia distribución, aflora en los valles formando sinclinales o en los flancos de anticlinales. Los sitios donde muestra sus más amplios afloramientos son los valles sinclinales Balsas-Tonalapa. Representa un flysh calcáreo que evidencia la interrupción del patrón de sedimentación de las calizas de plataforma de la Formación Morelos, a la cual sobreyace de manera concordante. En el área del acuífero presenta tres miembros: inferior calcáreo-arcilloso, medio arcilloso y superior areno-arcilloso, en los cuales cambia gradualmente de granulometría fina a gruesa.

Su espesor total se desconoce; sin embargo, en el valle de Iguala, se considera del orden de 200 a 400 m, mientras que, al sur, Bonnenberger (1955) reportó una sección incompleta de 1220 m en su localidad tipo.

Descansa sobre la Formación Cuautla en contacto transicional, aunque hacia el oriente, Pantoja-Alor (in Cserna op. cit.) reporta que descansa con ligera discordancia sobre la Formación Cuautla. Su contacto superior es siempre en discordancia angular y/o erosional con rocas más jóvenes; le cubren indistintamente las formaciones Tetelcingo, Grupo Balsas y Oapan principalmente, así como aluviones y conglomerados recientes. Su edad parece tener límites variables dependiendo de la localidad.

La base varía entre Turoniano Tardío y Coniaciano Temprano. Se ha podido establecer que su alcance estratigráfico superior es más amplio de oriente a poniente, es decir que mientras al poniente se restringe al Coniaciano, en la parte central de la cuenca de depósito la acumulación continuó hasta el Maestrichtiano (Cserna *et. al., op. cit.*). Esta relación puede indicar que la línea costera del Cretácico Tardío migró con el tiempo de oeste a este como consecuencia del levantamiento y la retirada de los mares hacia el oriente. Se correlaciona con la porción superior de la Formación Escamela Superior de la porción centro-oriental del Estado de Puebla; en la porción oriental de Querétaro y centro occidental de Hidalgo, y con la Lutita Méndez; al sureste de San Luis Potosí con la Formación San Felipe.

Cenozoico

Grupo Balsas

Nombre asignado por Fries (1960) para referirse a una secuencia continental constituida principalmente por conglomerados, calizas lacustres, arcosas, areniscas y limolitas, así como brechas volcánicas, tobas y lavas que se presentan en la cuenca del Río Balsas. Más tarde Ortega (*op. cit.*) separa del grupo a una unidad vulcanoclástica constituida por tobas, brechas volcánicas y lavas, que aflora en el área de San Juan Tetelcingo.

En el área está constituido por un conglomerado polimíctico que incluye clastos de caliza, arenisca, rocas metamórficas, rocas volcánicas y cuarzo, incluidos en una matriz limo-arenosa de color rojo. Aflora generalmente en bajos topográficos formando amplios valles en las faldas de las sierras.

Aunque puede dividirse en varios miembros o formaciones, en la zona se presentan dos miembros distintivos: el inferior es conglomerático y compacto; mientras que el superior es de carácter limo-arcilloso, semicompacto y suave.

Representa una sedimentación molasse postorogénica. Los materiales finos se presentan en estratos delgados en tanto que los conglomerados se disponen en capas gruesas y bancos masivos. Campa (*op. cit.*) reporta que dada su naturaleza de relleno de valles-fosa, en algunos lugares se ha calculado un espesor de 500 m. De acuerdo con las relaciones estratigráficas, Fries (*op. cit.*) establece una edad Eoceno Tardío-Oligoceno Medio; sin embargo, Ortega (*op. cit.*) con base en datación radiométrica obtenida en rocas de la Formación Tetelcingo, sugiere que se amplíe su alcance al Paleoceno-Oligoceno.

No se han encontrado fósiles en estas capas rojas; sin embargo, su edad se establece con base en su correlación con el Conglomerado Rojo de Guanajuato, en donde se fecharon los restos de un roedor del Eoceno Tardío-Oligoceno (Edwards,. 1965 y Fries, et. al 1955). Se correlaciona con el Conglomerado El Morro que aflora en el área de Zimapán y con el Conglomerado Guanajuato que aflora en la porción central del país, así como con las Formaciones Huajuapan, Yanhuitlán y Cuicatlán en el Estado de Oaxaca.

Rocas Ígneas Intrusivas

Estos cuerpos de rocas graníticas representan la actividad magmática que se manifestó durante el Cenozoico Inferior, relacionada a la Sierra Madre del Sur. Se encuentran distribuidos de manera aislada en el extremo sureste, en el límite con el acuífero Iguala. Generalmente están asociados con zonas de mineralización, en algunos distritos mineros. En el subsuelo se considera que constituyen cuerpos de dimensiones batolíticas. De acuerdo al SGM (*op. cit*), la edad del emplazamiento de estos cuerpos es de 30 Ma (Eoceno-Oligoceno).

Rocas Ígneas Extrusivas

El vulcanismo en el acuífero se inicia en el Cenozoico (Eoceno) y se manifiesta de manera aislada como coladas de lavas, asociadas con brechas volcánicas también de carácter andesítico (SGM, 2000). Estas rocas son consideradas producto de la actividad de la Sierra Madre Occidental, de tal forma se les ha considerado una edad Eoceno (CRM, 1998). Localmente, se asocian a las formaciones Tepoztlán y Buenavista.

Rocas Volcánicas del Eoceno-Oligoceno

Estas rocas se distribuyen en el área de manera aislada, manifestando la continuidad de la actividad volcánica.

El vulcanismo continúa siendo de tipo andesítico presentándose en forma de derrames y brechas con algunos niveles dacíticos, la secuencia se encuentra cubriendo de forma discordante a la unidad basal de andesitas y simultáneamente se encuentran sobreyacidas por cuerpos tabulares de dacitas y riolitas; hacia su cima varían a Ignimbritas y riolitas. La edad reportada para esta secuencia volcánica es del Oligoceno-Mioceno (SGM, 2000).

Riolita Tilzapotla

Con este nombre Fries se refirió a una secuencia de brechas riolíticas que afloran ampliamente en las cercanías de Tilzapotla, al sur del Lago Tequesquitengo y del Río Amacuzac. Sus afloramientos más extensos se presentan al norte y sur de Huitzuco, así como en las inmediaciones de Coacoyula. Su composición varía de riolita a riodacita. Presenta características que varían de un lugar a otro, siendo notable en todos ellos su carácter masivo. En la zona de Huitzuco se presenta como una toba muy sana de color rosado que muestra ferromagnesianos y cuarzo en una matriz criptocristalina de feldespatos, de espesor masivo; presenta fracturamiento subvertical de orientación oriente-poniente.

En otras localidades se presenta en forma de lavas y tobas de composición dacítica y riodacítica. Su espesor total es variable, pero en su localidad tipo es del orden de 240 m. Descansa sobre el Grupo Balsas en contacto aparentemente paralelo, aunque puede ser discordante. También descansa, en discordancia, sobre formaciones más antiguas (Morelos, Cuautla y Mezcala). A su vez está cubierta en discordancia, por la Formación Oapan y por materiales cuaternarios (aluvión y conglomerados).

Con base en edades radiométricas, Fries le asignó una edad de Oligoceno Tardío. Se correlaciona con la serie volcánica Xochitepec de la Cuenca de México, así como con el Grupo Pachuca y con las rocas volcánicas Las Espinas del Estado de Hidalgo.

Formación Oapan

El nombre fue utilizado informalmente por Nájera (1965) para las capas lacustres de areniscas tobáceas, yesos y arcillas, que afloran en el Valle de San Agustín Oapan, en ambas márgenes del Río Balsas; su localidad tipo es el Cerro Misuehue. Más tarde, Cserna, et al. (op. cit.) las correlaciona con otros afloramientos de la cuenca del Alto Río Balsas y considera que deben ser incorporadas formalmente como formación.

Litológicamente está constituida de areniscas, yesos y calizas lacustres. Las areniscas forman la base de la formación y son de color verde, de textura fina a gruesa, compuestas por fragmentos de toba (lo cual le da un carácter híbrido), cuarzo, feldespatos, ferromagnesianos y calcita, en una matriz cementada; el espesor de sus capas varía de delgado a grueso, en total presenta aproximadamente 40 m de espesor.

Los yesos descansan sobre las areniscas, su coloración característica es roja pero varía verticalmente hacia arriba a tonos gris claro, presentan cantidades variables de arcilla que ocasionalmente llegan a ser lutitas rojizas.

La parte superior de la formación se encuentra coronada por capas de caliza lacustre, cubiertas casi totalmente por caliche que protegen de la erosión a toda la secuencia. Descansa en discordancia angular y erosional sobre los conglomerados del Grupo Balsas y solo está cubierta por materiales recientes como caliche y aluviones cuaternarios.

Por su litología y extensión, así como por sus relaciones estructurales y estratigráficas, se ha interpretado que su depósito tuvo lugar en una cuenca lacustre formada por un fallamiento en bloques que afectó al Grupo Balsas (Nájera, 1965). Por su posición estructural y estratigráfica se le asignó una edad Mioceno Tardío. Se correlaciona con las Margas Sabana Grande que describió Bonnenberger (1955), al sur del poblado Sabana Grande.

Cuaternario

Formaciones Cuernavaca y Chontalcoatlán

El Cuaternario está representado por las formaciones Cuernavaca y Chontalcoatlán del Plioceno-Pleistoceno, respectivamente, ambas depositadas a lo largo de dos fosas tectónicas.

Litológicamente muy similares, son depósitos de lahares provenientes, la primera, de la actividad del Campo Volcánico de Zempoala y la segunda, de la actividad del volcán Nevado de Toluca.

Están cubiertas por derrames basálticos y lahares recientes de la Formación Chichinautzin (Fries, 1960) que se consideran testigos de la actividad del Faja Neovolcánica Transmexicana, cuya edad la asignan al Holoceno.

Depósitos Recientes

Está representado por depósitos de travertino, depósitos de talud y aluvión. Los depósitos aluviales corresponden con sedimentos transportados por las principales corrientes fluviales y están constituidos por gravas y arenas, en menor proporción por limos y arcillas; también incluyen acarreos fluviales. Ocupan sólo las partes topográficamente más bajas, rellenando valles o sobre el cauce de las principales corrientes superficiales

4.2. Geología estructural

La geología estructural de la zona donde se encuentra el acuífero está conformada por estructuras plegadas con direcciones que varían entre NNW a NNE, además de fallas y fracturas que desplazan y cortan a las unidades litológicas.

Existen también discordancias que evidencian los cambios y fases tectónicas que afectaron y dieron origen a las cadenas montañosas de la región.

Como rasgos principales se identificaron cinco fallas regionales Chilacachapa, El Triunfo, Tuxpan, Comaltepec y Xochipala-Tecuaxiapan que separan diferentes sectores, las estructuras plegadas presentan características especiales en cuanto a la orientación de sus ejes o líneas charnelas y morfología, además que definen propiedades geohidrológicas singulares como se indican a continuación.

Entre la Falla Tuxpan y los afloramientos de la Riolita Tilzapotla, las calizas de la Formación Morelos están intensamente afectadas por dolinas y sumideros que evidencian la cercanía de los yesos de la Anhidrita Huitzuco, que también afloran en las cercanías y que corresponderían a las rocas más antiguas de la zona cartografiada (junto con las calizas arcillosas de la Formación Chilacachapa).

La Falla El Triunfo se intersecta con la Falla Tuxpan, al norte de la Ciudad de Iguala, en donde aparentemente la primera termina o es desplazada en sentido izquierdo por la segunda; sin embargo, el efecto que se desarrolla por el desplazamiento transcurrente de estas dos fallas hacia el sur de estas, debe corresponder a una respuesta tensional, provocando un sistema de fallas normales paralelas a las principales que forman un arreglo de Horsts y Grabens, actualmente sepultados por sedimentos de las Formación Balsas y recientes en donde se aloja el valle de Iguala.

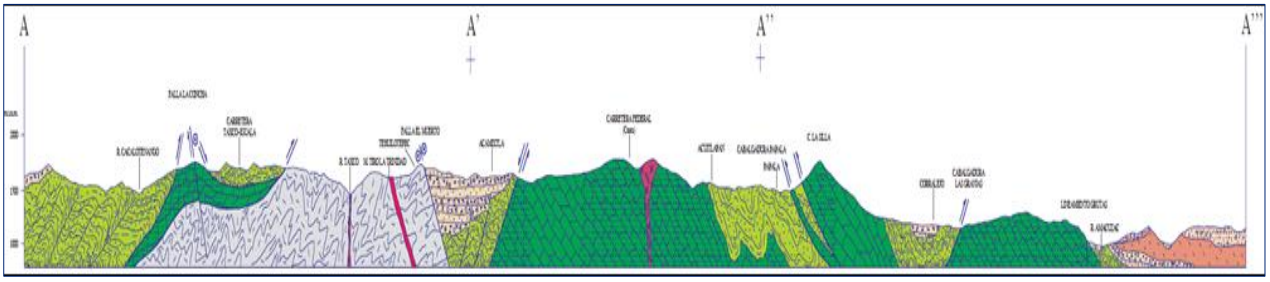
4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que se encuentran restringidos a los cauces de los arroyos, así como en las areniscas, conglomerados polimícticos y tobas, que tienen varios cientos de metros de espesor hacia el centro de los valles.

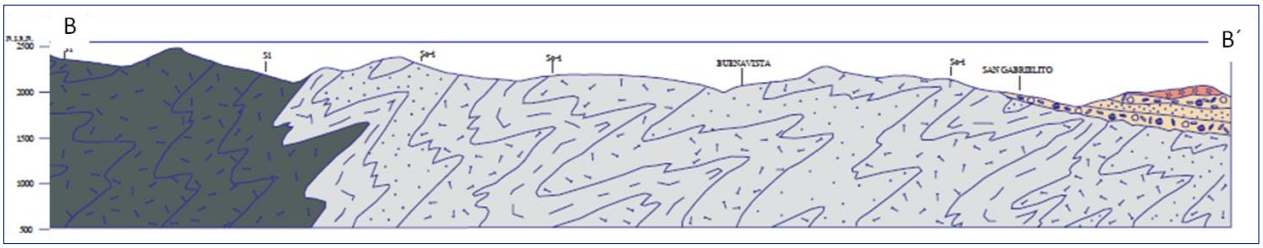
Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, representadas por las calizas y areniscas de las formaciones Morelos y Mezcala, respectivamente, así como rocas volcánicas, con permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución de las calizas.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas, al desaparecer el fracturamiento a profundidad, y por rocas ígneas intrusivas y metamórficas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera “Taxco” E14-A68 Esc. 1:50,000. (SGM, 1999)



Fuente: Carta Geológico-Minera “Pilcaya” E14-A67 Esc. 1:50,000. (SGM, 1998)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como en las areniscas, conglomerados polimícticos y tobas, que tienen varios cientos de metros de espesor hacia el centro de los valles.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, principalmente calizas y areniscas de las formaciones Morelos y Mexcala, respectivamente, y rocas volcánicas; todas ellas con permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas calcáreas.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Debido a que la gran mayoría de los aprovechamientos que existen en el acuífero son manantiales, sólo algunas norias excavadas manualmente y un solo pozo, no fue posible la realización de pruebas de bombeo. Sin embargo, de los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo y slug ejecutadas en otros acuíferos vecinos, como Tenancingo y Zacatepec, con las mismas características geológicas, es posible correlacionar los valores y adaptarlos al espesor saturado de cada zona. De esta manera, las unidades permeables en el acuífero (depósitos aluviales, fluviales y de talud) poseen una conductividad hidráulica de **1.0×10^{-5} a 5.0×10^{-4} m/s (0.9 a 43.2 m/d)**, mientras que las unidades semipermeables (conglomerados de fragmentos de roca volcánica, caliza y granodiorita con matriz arenosa, así como conglomerado calcáreo y areniscas calcáreas) presentan conductividades que varían de **3.0×10^{-6} a 6.0×10^{-6} m/s (0.3 a 0.5 m/d)**.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en el año 2011. La geología no permite identificar zonas importantes con potencial geohidrológico, además, de los 48 aprovechamientos censados, 43 corresponden a manantiales lo que imposibilita realizar las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático.

5.4. Comportamiento hidráulico

No se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución del nivel estático debido a que la gran mayoría de los aprovechamientos son manantiales.

Además de la extensión superficial y las condiciones orográficas del acuífero, existen pequeños valles intermontanos esparcidos en toda la superficie del acuífero, en los que se extrae de manera incipiente el agua subterránea de los niveles freáticos someros. Debido al escaso número de aprovechamientos subterráneos existentes en el área que cubre el acuífero y al incipiente volumen de extracción, 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 2011, se recolectaron 15 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos (principalmente manantiales) en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones principales y menores, conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), nitratos, dureza, sólidos totales disueltos (STD) y dureza total

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la modificación a la 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. de STD. La concentración de STD presenta valores que varían de 50 a 1777 mg/lt, sólo algunas muestras superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l de STD que establece dicha NOM para el agua potable. Los valores de conductividad eléctrica varían de 80 a 2830 µS/cm^2 y los valores de temperatura de 17.8 a 26.9 °C.

Con respecto a la dureza total, se registraron valores que varían de 273 a 470 mg/l, que superan el límite máximo permisible de 200 mg/l que establece la norma mexicana referida. Estas concentraciones se deben al predominio de rocas calcáreas por las que circula el agua subterránea.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó la familia dominante bicarbonatada- cálcica, que representa agua de reciente infiltración que circula por rocas volcánicas y calcáreas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2011, se registró la existencia de 48 aprovechamientos: 43 manantiales, 4 norias y un pozo.

El volumen de extracción por bombeo es despreciable, ya que la mayoría de los aprovechamientos son manantiales, que en conjunto descargan un volumen de **2.1 hm^3/año**, de los cuales 2.06 hm^3/año (98.1 %) se destinan al uso público-urbano y 0.04 hm^3/año (1.9 %) a usos doméstico y pecuario.

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 como sigue:

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 de un acuífero:

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

Las entradas al acuífero están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv). Como se mencionó anteriormente, la gran mayoría de los aprovechamientos son manantiales; además, debido a la extensión superficial y a las condiciones orográficas del acuífero, sólo existen pequeños valles intermontanos esparcidos en toda la superficie del acuífero, en los que se extrae de manera incipiente el agua subterránea de los niveles freáticos someros.

Por todas estas razones, se optó por plantear un balance hidrometeorológico en la superficie total del acuífero que es de **672 km²** para estimar el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para toda la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF} \qquad (1)$$

Donde:

V_{LL}= Volumen de lluvia;

V_{ETR}= Volumen evapotranspirado;

V_{ESC}= Volumen escurrido;

V_{INF}= Volumen infiltrado.

Por lo tanto, despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \qquad (2)$$

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área de balance (672 km^2) por la lámina de precipitación media anual (1044 mm):

$$V_{LL} = 672 \text{ km}^2 \ (1.044 \text{ m}) = \mathbf{701.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando los valores promedio anual de precipitación de 1044 mm y temperatura de 23.3 °C. Coutagne propuso la ecuación siguiente para calcular la evapotranspiración real:

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

Donde:
ETR= Evapotranspiración m/año
P = precipitación en m/año
$\chi = 1/(0.8 + 0.14\ t)$
t = temperatura en ºC

La fórmula solo es aplicable para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre 1/8X y 1/2X, estando ETR y P en metros, y T en °C. Si P es menor que 1/8X la ETR es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento; si la precipitación es mayor que 1/2X la ETR es prácticamente independiente de P y su valor está dado por ETR = 0.20 + 0.035 T.

Aplicando la fórmula de Coutagne se obtiene una lámina de evapotranspiración real de **775.7 mm** anuales. El volumen evapotranspirado está dado por el producto del área y la lámina de evapotranspiración, por lo que el volumen de descarga por efecto de la evapotranspiración será de:

$$\mathbf{V_{ETR}} = 672\ km^2\ (0.7757m) = \mathbf{521.3\ hm^3/año.}$$

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

El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA = **PRECIPITACION ANUAL DE LA CUENCA** * **AREA DE LA CUENCA** * **COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO**

El coeficiente de escurrimiento (Ce) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos:

A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2 y se determina el uso actual del suelo.

Tabla 2. Valores de k en función del tipo y uso del suelo (NOM-011-CONAGUA-2000)

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO A	TIPO DE SUELO B	TIPO DE SUELO C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3

TIPO DE SUELO	CARACTERISTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas

En el caso en que en la cuenca de estudio existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado.

Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si K resulta menor o igual que 0.15, $Ce = K (P-250) / 2000;$

Si K es mayor que 0.15, $Ce = K (P-250) / 2000 + (K - 0.15) / 1.5;$

Donde:
P= Precipitación anual;
Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;
K = Parámetro que depende del tipo, uso y cobertura del suelo.

De acuerdo con la cartografía de CONABIO escala 1:1, 000,000 para el tipo de suelo, predominan los tipos Andosol, Cambisol, Castañozem, Feozem, Litosol, Luvisol, Regosol y Vertisol (figura 4).

En cuanto al uso de suelo (figura 5), de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1,000,000, el 36.7 % de la superficie del acuífero es de área agrícola, en los que el suelo es tipo C, por lo que K=0.30; un 33.7 % tiene una cobertura de bosque del 50 al 75 %, suelo tipo C, por lo que K=0.26; el 26.3 % de la superficie esta cubierta por selva del 25 al 50 %, suelo tipo C, por lo que K=0.28, el 2.8% de la superficie corresponde a pastizal, suelo tipo C, con cobertura del 50 al 75% con un valor de K=0.30 y 0.5 % cubierto por área urbana, suelo tipo C, con un valor de K=0.32.

$$\mathbf{K_{ponderado}} = 0.30\ (0.367) + 0.26\ (0.337) + 0.28\ (0.263) + 0.30\ (0.028) + 0.32\ (0.005) = \mathbf{0.2814}$$

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.2814, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

$$\mathbf{Ce=}\ K\ (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5 = \mathbf{0.1993}$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento:

$$\mathbf{V_{ESC}} = 0.1993\ (701.6\ hm^3) = \mathbf{139.8\ hm^3\ anuales}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$$\mathbf{V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC}}$$
$$\mathbf{V_{INF} = 701.6 - 521.3 - 139.8}$$
$$\mathbf{V_{INF} = 40.5\ hm^3/año}$$

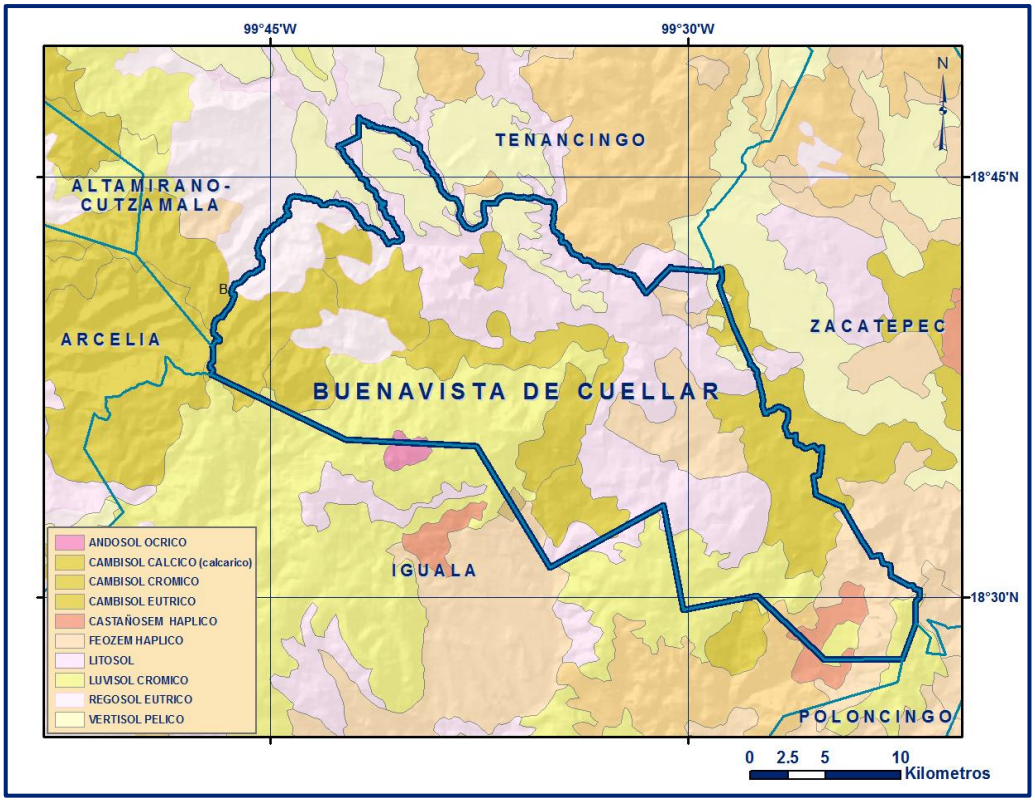


Figura 4. Tipo de suelo

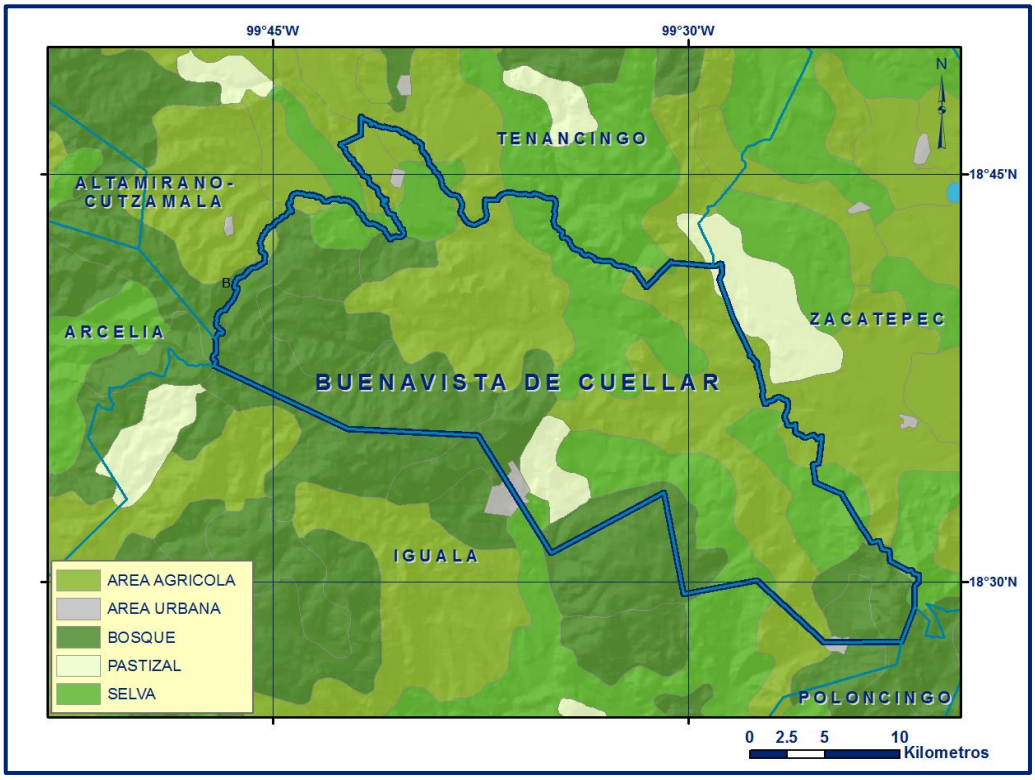


Figura 5. Uso de suelo

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 701.6 hm^3/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.058. De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 40.5 hm^3/año en los 672 km^2 de área de balance del acuífero. Por lo que la **Rv = 40.5 hm^3/año.**

7.2. Salidas

Las descargas ocurren principalmente por descarga de algunos manantiales (Dm) y por flujo base (Dfb).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de extracción por bombeo es nulo. **B= 0.0 hm^3/año.**

7.2.2. Descarga a través de manantial (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificó la existencia de 43 manantiales que en total descargan un caudal de 68 lps, que equivalen a un volumen de **2.1 hm^3 anuales**

7.2.3. Descarga por flujo base de los ríos (Dfb)

De acuerdo con el registro de la estación hidrométrica “Chontalcuatlán”, el gasto promedio que aporta el acuífero al flujo base, una vez descontado el gasto de la estación “El Molino” que registra el volumen generado aguas arriba procedente del deshielo del Nevado de Toluca, es de 370 lps; es decir 11.7 hm^3 anuales. Por lo tanto, **Dfb = 11.7 hm^3 anuales**

8. DISPONIBILIDAD

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

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 inducida. Para este caso, su valor es de **40.5 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso del acuífero Buenavista de Cuéllar, su valor corresponde al flujo base del Río Chontalcuatlán y a la descarga a través de manantiales. **DNC = 13.8 hm³/año.**

8.3. Volumen extracción de agua subterránea (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 (REPDA), 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 **272,857 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) 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.

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 40.5 – 13.8 – 0.272857
DMA = 26.427143 hm³ anuales

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **26,427,143 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2011. Estudio Geohidrológico para Determinar la Disponibilidad de los Acuíferos Tlapa-Huamuxtitlán, Poloncingo, Buenavista de Cuéllar y Tlacotepec, en el Estado de Guerrero. Elaborado por la empresa SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S. A. de C. V. (SIIDSA).