



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

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO COLIMA (0601), ESTADO DE COLIMA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. GENERALIDADES.....</b>                                  | <b>2</b>  |
| Antecedentes.....   | 2         |
| 1.1 Localización .....  | 2         |
| 1.2 Situación administrativa del acuífero.....                | 4         |
| <b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b> | <b>5</b>  |
| <b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>                                    | <b>7</b>  |
| 3.1 Provincia fisiográfica .....                              | 7         |
| 3.2 Clima .....   | 9         |
| 3.3 Hidrografía.....  | 10        |
| 3.4 Geomorfología.....  | 11        |
| <b>4. GEOLOGÍA .....</b>                                      | <b>12</b> |
| 4.1 Estratigrafía .....                                       | 14        |
| 4.2 Geología estructural.....                                 | 18        |
| 4.3 Geología del subsuelo.....                                | 19        |
| <b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>                                  | <b>21</b> |
| 5.1 Tipo de acuífero.....                                     | 21        |
| 5.2 Parámetros hidráulicos .....                              | 21        |
| 5.3 Piezometría.....  | 21        |
| 5.4 Comportamiento hidráulico.....                            | 22        |
| 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....      | 25        |
| <b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>       | <b>26</b> |
| <b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....</b>                 | <b>26</b> |
| 7.1 Entradas.....   | 27        |
| 7.2 Salidas .....   | 30        |
| 7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....              | 32        |
| <b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>                                | <b>33</b> |
| 8.1 Recarga total media anual (R).....                        | 34        |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....                  | 34        |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....   | 34        |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 35        |
| <b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                  | <b>36</b> |

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

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

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA. La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

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

### **1.1 Localización**

El acuífero Colima, definido con la clave 0601 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de Colima, entre los paralelos 19° 04' y 19° 30' de latitud norte y los meridianos 103° 34' y 104° 01' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,298 km<sup>2</sup> (figura 1).

Limita al este con el acuífero Alzada-Tepames, al sur con los acuíferos Valle de Ixtlahuacán y Armería-Tecomán-Periquillos; al oeste con el acuífero Minatitlán, todos ellos del estado de Colima, al norte con el acuífero Autlán, perteneciente al estado de Jalisco.

Geopolíticamente abarca totalmente los municipios Comala y Villa de Álvarez y parcialmente los municipios Minatitlán, Cuauhtémoc, Colima y Coquimatlán.

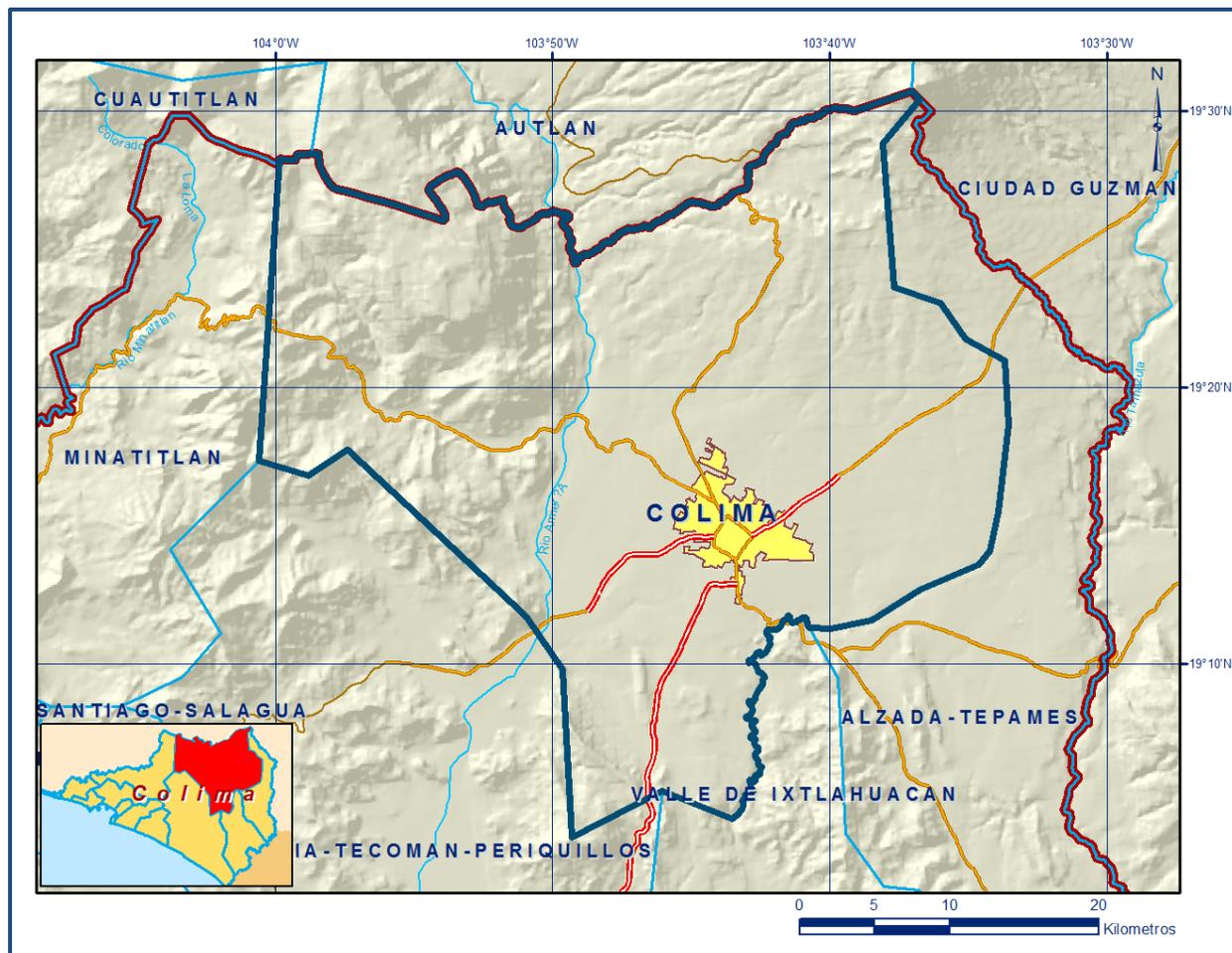


Figura 1. Localización del acuífero

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 0601 COLIMA |                |         |          |               |         |          |   |
|----------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|---|
| VERTICE              | LONGITUD OESTE |         |          | LATITUD NORTE |         |          | OBSERVACIONES                               |
|                      | GRADOS         | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS        | MINUTOS | SEGUNDOS |   |
| 1                    | 103            | 37      | 2.7      | 19            | 30      | 43.4     | DEL 1AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL             |
| 2                    | 103            | 36      | 45.9     | 19            | 30      | 25.6     |   |
| 3                    | 103            | 38      | 5.9      | 19            | 28      | 50.4     |   |
| 4                    | 103            | 37      | 40.7     | 19            | 23      | 36.7     |   |
| 5                    | 103            | 36      | 0.0      | 19            | 23      | 4.0      |   |
| 6                    | 103            | 36      | 0.0      | 19            | 21      | 45.1     |   |
| 7                    | 103            | 33      | 41.4     | 19            | 20      | 59.0     |   |
| 8                    | 103            | 33      | 32.9     | 19            | 18      | 38.8     |   |
| 9                    | 103            | 33      | 55.2     | 19            | 15      | 30.5     |   |
| 10                   | 103            | 34      | 14.8     | 19            | 14      | 4.8      |   |
| 11                   | 103            | 34      | 37.6     | 19            | 13      | 34.9     |   |
| 12                   | 103            | 36      | 44.5     | 19            | 12      | 41.4     |   |
| 13                   | 103            | 38      | 30.8     | 19            | 11      | 35.1     |   |
| 14                   | 103            | 39      | 58.8     | 19            | 11      | 16.8     |   |
| 15                   | 103            | 40      | 44.2     | 19            | 11      | 17.4     | DEL 15 AL 16 POR EL CAUCE DEL RIO EL SALADO |
| 16                   | 103            | 43      | 31.4     | 19            | 4       | 23.8     |   |
| 17                   | 103            | 46      | 3.1      | 19            | 5       | 22.9     |   |
| 18                   | 103            | 49      | 18.7     | 19            | 3       | 42.7     |   |
| 19                   | 103            | 49      | 39.7     | 19            | 9       | 47.2     |   |
| 20                   | 103            | 50      | 57.9     | 19            | 11      | 41.8     |   |
| 21                   | 103            | 57      | 25.0     | 19            | 17      | 45.2     |   |
| 22                   | 103            | 58      | 49.8     | 19            | 16      | 48.6     |   |
| 23                   | 104            | 0       | 35.5     | 19            | 17      | 21.5     |   |
| 24                   | 103            | 59      | 51.1     | 19            | 28      | 15.5     |   |
| 25                   | 103            | 58      | 42.1     | 19            | 28      | 27.6     | DEL 25 AL 1POR EL LIMITE ESTATAL            |
| 1                    | 103            | 37      | 2.7      | 19            | 30      | 43.4     |   |

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Colima pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”, al Consejo de Cuenca “Costa Pacífico Centro”, y es jurisdicción de la Dirección Local en el estado de Colima. Su territorio completo se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la parte que corresponde a los límites geopolíticos del Estado de Colima”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 21 de septiembre de 1984; esta veda se clasifica como tipo II en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos de Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El uso principal es el público-urbano. En la porción sur de su territorio se localiza parte del Distrito de Riego 053 “Estado de Colima”; a la fecha, no se ha instalado el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

En su territorio existen cuatro áreas naturales protegidas; 3 se localizan en la porción norte y una más en la región central. En el norte se ubican porciones de las áreas naturales protegidas Parque Nacional “Nevado de Colima”, decretada el 06 de diciembre de 1940; la zona de protección forestal y refugio de la fauna silvestre conocida como “El Jabalí”, establecida el 07 de junio de 2000 y la reserva de la biosfera “Sierra de Manantlán”, decretada el 23 de marzo de 1987; en la región central se localiza el área de protección de recursos naturales denominada “Las Huertas”, decretada el 23 de junio de 1988

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

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos y de otros tipos, algunos de cobertura regional. A continuación se mencionan los estudios más importantes:

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DEL VALLE DE COLIMA, COLIMA, elaborado por HIDROTEC, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en 1974.** El objetivo de este estudio fue obtener un primer conocimiento del funcionamiento del acuífero de la región central del estado de Colima, incluyendo una evaluación preliminar de sus recursos, y establecer las recomendaciones para la exploración y explotación de las unidades hidrogeológicas en la región de estudio.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE EVALUACIÓN Y CENSO EN EL ESTADO DE COLIMA, elaborado por INGENIERÍA Y GEOTECNIA, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en 1978.** El objetivo principal de este trabajo fue estudiar la estructura de los acuíferos del valle de Colima, ubicar sitios que presentan condiciones geohidrológicas favorables para la construcción de perforaciones de exploración, explotación y complementar el estudio geohidrológico preliminar del valle de Colima realizado en 1974, mediante la ejecución de sondeos eléctricos verticales.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO, SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN EL ESTADO DE COLIMA, elaborado por GEOFIAP, S.A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) en 1980.** Su objetivo fue definir las características físico-estructurales que presentan las unidades litológicas en el subsuelo, determinar la permeabilidad y compacidad de las rocas, conocer el poder

resolutivo de la técnica denominada Análisis de Espectro de Fase y, por último, el más importante, fue la identificación de sitios más adecuados para la perforación de pozos. Mediante sondeos eléctricos verticales identifica en el valle de Colima una serie de fallas escalonadas que forman un sistema de pilares y cuencas tectónicas; en el que se acumularon depósitos aluviales cuyo espesor varía de 100 a 500 m.

**SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES EN LAS ZONAS DE IXTLAHUACÁN, ARMERÍA Y COQUIMATLÁN, COLIMA, elaborado por GEOFIAP, S.A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) en 1980.** Con la ejecución de 50 SEV's, el estudio tuvo como objetivo definir las características físico-estructurales que presentan las unidades litológicas en el subsuelo; determinar la permeabilidad y compacidad de las rocas y localizar áreas favorables para la perforación de pozos de explotación, que constituía un interés prioritario de la época, tanto para las autoridades de gobierno como para los usuarios.

**ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN EL VALLE DE COLIMA, COLIMA. Realizado en 1987 por la Secretaría de Recursos Hídricos (SRH).** A través de la medición de los niveles del agua subterránea se analizaron los niveles estáticos y los abatimientos causados por la extracción, con el propósito de determinar la factibilidad de localización de nuevos aprovechamientos, adecuadamente construidos y diseñados, o bien su restricción para preservar el acuífero.

**ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUÍFEROS DE COLIMA, EL COLOMO, SANTIAGO-SALAGUA Y MARABASCO, EN EL ESTADO DE COLIMA. Realizado en 2007 por SANX INGENIERÍA INTEGRAL Y DESARROLLO, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua.** Su objetivo fue actualizar el conocimiento de la posición de los niveles de agua subterránea y establecer redes de medición en el acuífero Colima, con el objeto de contar con información de piezometría que permita evaluar su situación hidrodinámica actual, para la toma de decisiones más adecuadas para su futura explotación.

Además de las mediciones piezométricas, se obtuvieron 55 muestras de agua subterránea para la determinación del pH, conductividad eléctrica, temperatura y concentración de sólidos totales disueltos.

**REACTIVACIÓN DE LA RED PIEZOMÉTRICA DE LOS ACUÍFEROS ARMERÍA-TECOMÁN-PERIQUELLOS, VENUSTIANO CARRANZA, IXTLAHUACÁN Y ALZADA-TEPAMES, EN EL ESTADO DE COLIMA. Realizado en 2008 por GEOPSA, S. A. de C.V.,**

**para la Comisión Nacional del Agua.** Define el modelo geológico de funcionamiento de las zonas de estudio por medio de la descripción detallada del marco geológico que incluye la conformación del subsuelo, geología superficial, análisis e interpretación de registros, perfiles geofísicos y descripciones litológicas.

Mediante las mediciones piezométricas define la evolución de los niveles del agua subterránea.

**ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO COLIMA, EN EL ESTADO DE COLIMA. Realizado en 2013 por la Universidad Autónoma del Estado de México para la Comisión Nacional del Agua.** El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica 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, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos, toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este trabajo 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), el área que cubre el acuífero se encuentra en el límite de dos Provincias Fisiográficas, la porción occidental se localiza en la Sierra Madre del Sur y la región oriental en el Eje Neovolcánico. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en territorio de las Provincias Fisiográficas Sierra Madre del Sur, Subprovincia Sierras de la Costa de Jalisco y Colima, y en el Eje Neovolcánico, Subprovincia Volcanes de Colima.

La Sierra Madre del Sur se caracteriza por ser un sistema montañoso complejo disectado por corrientes fluviales que en su trayectoria labran valles y llanuras con cañadas. Se localiza al sur de México y se extiende a lo largo de 1,200 km, desde el sur

de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec con una dirección preferencial de noroeste a sureste; en ella nacen varias corrientes que desembocan en el Océano Pacífico.

Es la provincia de mayor complejidad geológica, en ella se encuentran rocas ígneas, sedimentarias y en mayor abundancia rocas metamórficas.

La Subprovincia Sierras de la Costa de Jalisco y Colima se caracteriza por estar conformada por rocas ígneas intrusivas que definen un gran batolito de composición granítica, que a diferencia de otras subprovincias, carece de lineamientos estructurales de este a oeste.

En su estado actual, el batolito integra una sierra de mediana altitud en la que se han abierto amplios valles intermontanos de excavación, todavía con muy escaso relleno aluvial y casi siempre con un drenaje hacia el sur que desemboca en el Océano Pacífico. Se levanta más o menos abruptamente del mar y presenta un desarrollo incipiente de valles y llanuras costeras.

El Eje Neovolcánico comprende parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y Veracruz, así como todo el estado de Tlaxcala y el Distrito Federal. Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario hasta el presente.

La integran grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas.

Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico", integrado por los volcanes de Colima, Tancítaro, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19, que representan el trazo de la gran Falla Clarión.

La Subprovincia Volcanes de Colima recibe el nombre debido a sus dos geoformas más representativas que son El Nevado de Colima y el Volcán del Fuego o de Colima, de tal manera que su fisiografía se caracteriza por estos aparatos volcánicos que tienen una elevación de 4240 y 3820 msnm, respectivamente, constituidos por rocas andesíticas.

### **3.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor superficie del acuífero prevalece el clima cálido subhúmedo con lluvias en verano ( $Aw_0$  y  $Aw_1$ ), con una temperatura media anual de 23°C, en el mes de enero, a 26°C, en el mes de junio y precipitación media anual que varía de 800 a 1,200 mm.

Hacia la porción norte, el clima es templado y de mayor humedad,  $(A)C(w_0)$ ,  $(A)C(w_1)$  y  $(A)C(w_2)$ , en los que la temperatura media anual es de 24 °C y la precipitación varía de 1000 a 1300 mm anuales. Hacia los extremos noreste y noroeste, donde la elevación topográfica es mayor, el clima cambia a templado, subhúmedo  $C(w_2)$  y semifrío, subhúmedo  $Cb'(w_2)$ , con lluvias en verano, de aproximadamente de 900 mm anuales.

En esta zona en donde se ubican los volcanes y en ella la variación climatológica intermedia varía del semiseco y semicálido, al húmedo, con invierno y primavera secos, sin estación invernal definida. La temperatura mínima es de 16.8° C mientras que la máxima es aproximadamente de 33.5° C. La precipitación pluvial media anual de 1,085 mm ocurre en un régimen de lluvias que abarca los meses de mayo a septiembre.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 11 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero, 9 ubicadas en territorio del estado de Colima: Buenavista, Coquimatlán, Cuauhtémoc, La Salada, Peñitas, Los Ortices, Madrid, Minatitlán y La Esperanza; y 2 en el estado de Jalisco: San Marcos y Canoas.

Con los registros obtenidos para el periodo 1990-2007 y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anual de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **758 mm, 24.0 °C y 1721 mm**, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia, uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de noviembre a enero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 16 “Armería-Coahuayana”, Subregión Hidrológica Río Armería, en las cuencas de los ríos Coahuayana y Armería, que comprende parcialmente los estados de Jalisco, Colima y Michoacán. En este sistema hidrográfico, el drenaje es subparalelo dendrítico, conformado por corrientes intermitentes y perennes, cuyo escurrimiento desemboca en el Océano Pacífico. A su vez, el sistema se divide en 10 subcuencas: Tacotán, Corcovado, Las Piedras, El Rosario, Canoas, Armería, Quito, Coahuayana-Jalisco, Coahuayana-Colima y Coahuayana-Michoacán. El acuífero se ubica en la subcuenca Armería, en donde las corrientes superficiales se originan en el estado de Jalisco y tienen un aporte importante en el estado de Colima.

El Río Armería se localiza al suroeste de la región hidrológica y comprende parte de los estados de Jalisco y Colima. El acuífero Colima se localiza al sur de la subcuenca Armería, con una superficie total de 2,208.7 km<sup>2</sup>, que equivalen al 40% del territorio estatal. Sus principales afluentes en el área de estudio, son los ríos Colima, Comala y San Palmar. El Río Colima se origina por manantiales en las faldas del Volcán de Fuego, escurre de noreste a suroeste atravesando la ciudad de Colima y confluye al Río Armería en el borde superior de la planicie costera. Por su parte, el Río Comala, también formado por manantiales en la misma área, escurre hacia el suroeste y confluye con el Río Colima aguas abajo de la ciudad de mismo nombre.

En cambio, el Río San Palmar tiene su origen en las descargas de un manantial que brota en las faldas de la sierra Perote, ubicada en la porción noroccidental del estado, se dirige hacia el sureste y confluye con el Río Armería en el borde sur del valle de Colima.

El río Colima a su vez recibe la descarga para uso agrícola del manantial “Los Ameales”, el arroyo “El Chino” que descarga hasta 2 m<sup>3</sup>/s durante el estiaje, así como del arroyo Charco Verde, que le aporta un caudal medio de 1 m<sup>3</sup>/s. En su tramo inferior, aguas abajo de la estación “Colimán”, el río recibe además descargas del acuífero y retornos de riego.

El Río Coahuayana, desde se origina al noreste del acuífero, a la altura de la población de Cuauhtémoc, hasta su desembocadura en Boca de Apiza, al norte de la Bahía de San Telmo, recorre una distancia aproximada de 152 km. Es el límite entre Jalisco y Colima, desde el punto de unión del arroyo El Muerto, al sur de la estación de Tonilita, hasta el Paso del Naranjo.

De este lugar hasta Apiza, representa el límite con el estado de Michoacán; recibe también el nombre de Tuxpan; sin embargo, en el límite entre el estado de Jalisco y Colima se conoce con el nombre de Río El Naranjo. Así al final, entre su confluencia con el río Salado hasta su desembocadura, recibe el nombre de río Coahuayana. Por la ubicación y extensión, el río Coahuayana es de gran interés en la región, ya que constituye el recurso hidrológico superficial más importante de la zona.

No existe infraestructura hidráulica para aprovechar los escurrimientos superficiales, sólo acueductos para conducir agua de manantiales y de ríos, destinada principalmente a la agricultura.

### **3.4 Geomorfología**

Las distintas formas de relieve en la zona son reflejo y consecuencia de la historia geológica de la región. Las formas del relieve en torno al complejo volcánico de Colima se agrupan en tres unidades principales: el cono de los volcanes compuestos, las laderas, el piedemonte volcánico y la planicie de nivel de base y, además, el sistema de valles fluviales. La fase de deformación Laramídica ocurrida hacia finales del Cretácico y comienzos del Terciario dio origen a la elevación y plegamiento de las unidades geológicas. Simultáneamente ocurrió el emplazamiento de grandes cuerpos graníticos que conforman sierras altas en la porción noroccidental, con formas irregulares a semicirculares, y elevaciones de hasta 3960 msnm en el volcán de Colima.

El análisis de pendientes muestra que la región de estudio en el norte tiene condiciones morfológicas más abruptas y escarpadas, que la región sur con topografía más suave y plana.

El volcán de Colima, actualmente activo, en sus vertientes presenta una fuerte actividad erosiva producto de una densa red de drenaje, inestable debido a la actividad volcánica.

Estas topoformas se observan muy disectadas por barrancas labradas por arroyos y forman pendientes abruptas. Durante el Terciario Medio y Superior se manifiestan periodos de deformación distensivos, que dieron origen a fallamientos de tipo normal, con orientación preferencial noreste-suroeste y norte-sur.

Estas etapas están asociadas al desarrollo de fosas tectónicas y vulcanismo de tipo calcoalcalino y afinidad alcalina, que fue el responsable del emplazamiento de grandes depósitos de conglomerados. En esta región montañosa la litología predominante es de rocas sedimentarias marinas, cuyos espesores alcanzan más o menos 1,500 m.

Los valles semiplanos y sus rellenos sedimentarios son el resultado de procesos de intemperismo, erosión y depósito a través de un corto período geológico. Los lomeríos tienen pendiente suave y están constituidos principalmente de sedimentos aluviales y fluviales, de origen volcánico, en menor proporción de sedimentos marinos. El valle presenta un drenaje de tipo dendrítico bien definido, con una pendiente pronunciada en dirección norte-sur, que inicia en las partes altas de las proximidades del Volcán de Fuego hacia la ciudad de Colima.

El acuífero Colima combina estas dos condiciones morfológicas bien diferenciadas, al norte y noroeste predomina la región montañosa constituida por zonas abruptas y escarpadas, mientras que, en la parte central y en dirección al sur, una topografía suave de rasgos morfológicos bien definidos y redes de drenaje poco desarrolladas formando valles semiplanos con lomeríos, en los que se observan algunos depósitos conglomeráticos de origen volcánico.

#### **4. GEOLOGÍA**

El acuífero de se encuentra situado en dos provincias fisiográficas del país: la provincia Sierra Madre del Sur (SMS) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVT). La SMS constituye una gran estructura morfológica formada por un conjunto de bloques montañosos discontinuos y valles de diferentes dimensiones, cuya composición litológica con un basamento de rocas metamórficas fueron desplazadas durante el Jurásico.

Así mismo, en esta región existen rocas volcánicas y vulcanoclásticas del Cretácico Temprano y del Terciario, así como formaciones impermeables compuestas de dolomías, calizas recristalizadas y lechos de arcilla, arena y limo del Paleozoico, Triásico y Jurásico. En cambio, los derrames basálticos y la mayoría de las rocas que se extienden en toda la FVT se caracterizan por su alta permeabilidad que varía en un amplio rango, controlado principalmente por su grado de fracturamiento, la presencia de tubificaciones en los derrames y la intercalación de material escoriáceo (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

Por su extensión, características y con base en su geología y tectónica, esta provincia se suele dividir en tres sectores: occidental, central y oriental (Ferrari, 2000; Pasquaré *et al.*, 1988).

En la subprovincia Volcanes de Colima se aprecia una extensión de derrames basálticos y rocas de alta permeabilidad que depende de su grado de fracturamiento, así como derrames de rocas no fracturadas intercaladas con relleno aluvial en diferentes profundidades que forman acuíferos locales independientes (figura 2).

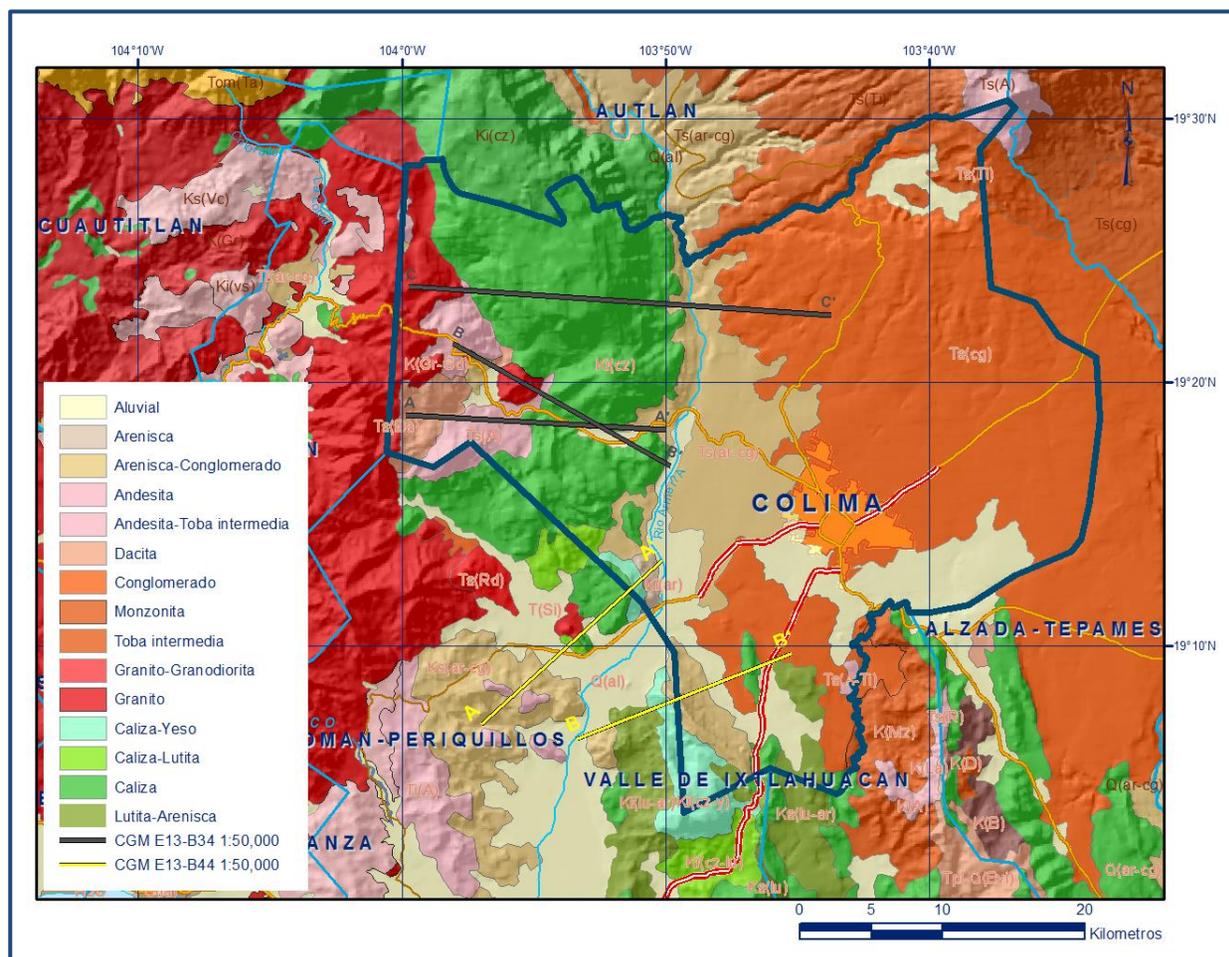


Figura 2. Geología general del acuífero

En el subsuelo de los valles, los derrames andesíticos funcionan como basamento geohidrológico, sobre el cual se intercalan derrames de rocas no fracturadas con rellenos aluviales en diferentes profundidades, formando acuíferos locales independientes, mientras que la composición riolítica, extendida dentro de las cuencas aluviales, forma acuíferos de gran densidad y moderada permeabilidad debido a su fracturamiento.

La zona de sierras volcánicas y valles intermontanos, está constituida por una serie de mesetas y valles altos de rocas sedimentarias continentales del Terciario, aluvión del Holoceno y grandes depósitos de sedimentos piroclásticos del Cuaternario. La geología del área de estudio está representada principalmente por secuencias vulcanosedimentarias, cuerpos batolíticos del Cretácico y Paleógeno, así como depósitos volcánicos y aluviales del Reciente. En algunos sitios, las rocas calcáreas están cubiertas por material terrígeno impermeable del Terciario.

#### **4.1 Estratigrafía**

La estratigrafía de la región en la que se ubica el acuífero está conformada por rocas metamórficas, sedimentarias, volcánicas, vulcanosedimentarias e intrusivas, cuyas edades varían del Jurásico Superior al Reciente.

#### **JURÁSICO SUPERIOR**

##### **Cuarcita Tamazula**

Se trata de una unidad clasificada como cuarcita micácea, producto de metamorfismo regional; tiene un aspecto gris con tonos oscuros, textura compacta de tipo granoblástica, de aspecto sacaroide y granulometría variada.

Sus afloramientos son muy restringidos, cubriendo principalmente las partes topográficamente más altas. Del Jurásico Superior al Cretácico Inferior es la Brecha Jalisco, cuyo significado geológico es todavía un enigma.

#### **CRETÁCICO INFERIOR**

##### **Formación Alberca**

Secuencia vulcanoclástica cubierta por calizas que evidentemente representan un arco volcánico que existió durante el Cretácico Inferior.

Descansa discordantemente sobre la Brecha Jalisco y corresponde a una unidad constituida por areniscas calcáreas, lutitas negras, tobas de color claro y calizas negras arcillosas, dispuestas en estratos delgados.

Se reconoció un miembro superior sin macrofauna, constituido por calizas y lutitas negras, tobas de color blanco y verde, escasos derrames andesíticos y areniscas de grano fino a medio de color café oscuro, y otro inferior conformado por lutitas negras, calizas arcillosas, tobas y areniscas con abundante macrofauna.

### **Formación Tecalitlán**

Secuencia piroclástica de composición que varía de andesítica a riolítica, que incluye brechas, aglomerados, ignimbritas y en ocasiones lavas andesíticas, dispuestas en forma de intercalaciones entre la secuencia vulcanoclástica, que representa la evidencia de un arco volcánico durante el Cretácico Inferior. Su espesor es variable, los reportes de PEMEX indican 177, 420 y 2,300 m, en los pozos Colima-1, Jalisco-1 y Tonaya-1, respectivamente.

La secuencia vulcanoclástica incluye a las formaciones Tepalcatepec (Pimentel, 1980), Encino y Vallecillos (Pantoja y Estrada, 1983). Por ello su definición varía en función de la localidad tipo de cada formación. De esta manera, en la región de Tepalcatepec la secuencia está constituida por calizas con rudistas y microfauna bentónica dispuestas en capas gruesas a masivas, alternando con capas gruesas de tobas andesíticas y brechas volcánicas. En tanto que en El Encino se trata de una serie de rocas vulcanoclásticas marinas que consiste de conglomerados, tobas epiclásticas de color gris verdoso, que granulométricamente representan areniscas, limolitas y lodolitas, con intercalaciones lenticulares de caliza, que sobreyacen en discordancia angular a una secuencia de más de 350 m de derrames volcánicos, tobas, ignimbritas, calizas arrecifales y rocas vulcanoclásticas de ambiente marino.

### **Formación Tepalcatepec**

Unidad constituida por una secuencia vulcanosedimentaria de areniscas, tobas andesíticas, conglomerados, lutitas y lodolitas calcáreas y lentes de caliza, cuya edad determinada por su contenido fosilífero es Aptiano-Cenomaniano.

### **Formación Madrid**

Se considera un cambio de facies lateral de la formación anterior, está constituida por calizas arcillosas de color gris claro y lutitas ligeramente carbonosas de color gris oscuro a negro, con una estratificación delgada a mediana, que cambia de facies a yesos; cuya edad corresponde al Aptiano Superior-Albiano.

Cubriendo indistintamente a estas unidades, se tiene un paquete constituido por yesos en la base y calizas de plataforma hacia la cima, de edad Albiano-Cenomaniano.

### **Formación Cerro de La Vieja**

Secuencia detrítica de conglomerados de composición calcárea que ha sido subdividida en 4 miembros de la base a la cima: conglomerados calcáreos con matriz limolítica, conglomerados calcáreos con matriz lodo calcáreo, limolitas, areniscas y limolitas.

Los conglomerados están constituidos por fragmentos subangulosos a semirredondeados de calizas y andesitas, en una matriz areno-arcillosa. La edad asignada corresponde al Turoniano-Coniaciano, debido a que localmente se observa en concordancia estructural con las rocas subyacentes.

## **CRETÁCICO SUPERIOR**

### **Rocas vulcanoclásticas**

Están constituidas por tobas andesíticas a intermedias, intercaladas con ignimbritas, brechas ácidas, derrames andesíticos, dacíticos y latíticos, que se caracterizan por presentar gradación, estructura lenticular y capas bien definidas con espesor de 0.1 a 0.6 m. Fueron depositadas en un medio ambiente somero, atribuido al desarrollo de un arco volcánico insular a partir del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, cuya declinación ocurrió en el Cretácico Superior (Ferrusquía 1978; Campa 1979). Sobreyacen discordantemente a depósitos calcáreos marinos.

### **Conjunto Batolítico de Jalisco**

Cuerpo intrusivo de dimensiones batolíticas, de composición granodiorítica, cuya edad se asigna al Cretácico Superior (Grajales, et al., 1993), el cual durante un evento posterior fue intrusionado por un cuerpo granítico de la misma edad que afectó a las rocas metamórficas del Paleozoico Superior y a unidades del Cretácico.

Contemporáneamente y como un segundo evento del Cretácico Superior, surgió un cuerpo intrusivo de composición tonalítica que intrusionó a las rocas metamórficas, cretácicas y a la misma masa granodiorítica. A partir de los análisis de los elementos traza, es posible establecer que este batolito tiene una afinidad tectónica correspondiente a los granitos desarrollados en un arco volcánico, de tal manera que representa las raíces de un arco volcánico Cretácico. Aflora en la porción occidental del acuífero del acuífero, principalmente bordeando pequeñas zonas de valle, y está cubierto por las rocas andesíticas de edad Cretácico. Por su estructura compacta constituye barreras naturales y basamento hidrogeológico del acuífero.

## **TERCIARIO**

### **Rocas volcánicas**

Los eventos volcánicos terciarios de la Sierra Madre Occidental se sobreponen discordantemente a las unidades antes descritas y están representados por aglomerados rojizos en su base y derrames andesíticos hacia la cima, su edad es Eoceno-Oligoceno.

Incluye también tobas y brechas intermedias, tobas andesíticas, tobas y brechas ácidas, andesitas y latitas, que fueron emitidas durante una primera fase de vulcanismo terciario. Megascópicamente presentan textura afanítica a porfirítica, color gris claro a violáceo y una estructura semicomcompacta a masiva en pseudoestratos. Sobreyacen en discordancia a rocas vulcanoclásticas del Cretácico Superior. Por su posición estratigráfica se le considera de edad Paleógeno.

### **Grupo del Volcán de Colima**

El Terciario-Superior-Pleistoceno tardío está representado por este grupo, constituido predominantemente por un conjunto de unidades litoestratigráficas principalmente de composición andesítica, formado por derrames de lava y material piroclástico, originados por las diversas emisiones del Volcán de Colima.

Aflora principalmente en la porción norte del acuífero, donde las unidades litoestratigráficas que lo integran son: Andesita La Calle, Formación Atenquique, Toba Los Mazos, Dacita Loma Alta, Andesita La Membrillera, Avalancha Los Lobos, Avalancha San Antonio, Andesita La Lumbre y Grava Cordobán.

### **Rocas intrusivas**

Representadas por rocas de composición monzonítica y diorítica, originadas durante el evento magmático del Paleógeno; afloran en forma de troncos y diques que intrusionan a rocas metamórficas, a la secuencia cretácica y a las rocas volcánicas del Paleógeno. Durante el mismo evento la monzonita intrusionó a la masa granítica, y la diorita a la granodiorita, granito y tonalita.

## **CUATERNARIO**

### **Conglomerado**

Representado por conglomerados polimícticos producto de la erosión y relleno de las partes bajas, que forman terrazas aluviales en las márgenes del Río Armería. Están constituidos por fragmentos subredondeados y mal clasificados de rocas sedimentarias calcáreas, metamórficas, volcánicas e intrusivas, semiconsolidados, de textura clástica en fragmentos de, cuya edad se asigna al Pleistoceno.

### **Depósitos piroclásticos**

Representados por los materiales piroclásticos recientes expulsados en las últimas erupciones de los volcanes Nevado de Colima y de Fuego de Colima.

### **Depósitos aluviales recientes**

Constituidos por materiales no consolidados derivados del intemperismo y erosión de las rocas que afloran en el área, depositados en los lechos de los ríos y arroyos, están constituidos por arenas, gravas y limos.

### **4.2 Geología estructural**

Los rasgos estructurales de la región están relacionados con las placas de Cocos y Rivera y su cercanía con los límites entre diferentes bloques estructurales. De esta manera, el marco tectónico-estructural que se observa se originó con las primeras fases tectónicas de la Orogenia Laramide durante el Cretácico Superior, la cual provocó plegamiento y levantamiento de las rocas sedimentarias marinas. Durante el Cenozoico Inferior y Medio tuvieron lugar los derrames volcánicos formando montañas; estos eventos de deformacionales se presentaron en estrecha relación con el emplazamiento de cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas. Probablemente los movimientos tectónicos del Terciario Superior sean los responsables de la formación de la fosa de Colima; ya que estos movimientos dieron lugar a bloques de la corteza, los cuales debido a la actividad tectónica formaron los grabens que caracterizan al sector occidental del Eje Neovolcánico. La actividad efusiva del Cenozoico Superior fue la causante de la división de la fosa de Colima en dos sectores, uno de ellos el del Valle de Zapotlán y el otro corresponde con el Llano Grande. Finalmente en el Pleistoceno y Holoceno tienen lugar la formación de los cerros La Calera y Apaxtepec, constituidos por brechas volcánicas.

Los cuerpos intrusivos provocaron en las rocas sedimentarias calcáreas, al igual que en las secuencias vulcanosedimentarias y metamórficas, la formación de bloques colgados de diversas dimensiones. Dichos cuerpos intrusivos se han denominado Conjunto batolítico de Jalisco, cuyo ambiente geotectónico es de raíz de arco (Ortega, 1992); tiene una migración temporal del Cretácico al Terciario Inferior y espacial de la región costera a las zonas internas continentales; los del Terciario Inferior se muestran en el noreste y centro del estado en forma de troncos y diques. En el área del valle de Colima afloran rocas de edad cretácica que fueron afectadas por la Revolución Laramídica, dando origen a fallas, pliegues y cabalgaduras, que forman sierras en forma de herradura y una morfología abrupta compleja.

Los pliegues evidentes en las unidades sedimentarias como las formaciones calcáreas; desde el punto de vista estructural existen estructuras compresivas, entre las que sobresalen algunas estructuras plegadas tales como los anticlinales Manantlán, Jala y El Naranjo, localizados en la porción suroeste de Colima.

Los sistemas de fallas, están relacionados a la porción norte del Graben de Colima y al sistema Chapala-Oaxaca, así como a un intenso fracturamiento que afecta al Batolito. La porción norte del Graben de Colima está formada por un sistema, donde la falla Techaluta con dirección N-NE, tiene 2,500 m de desplazamiento vertical y 53 km de longitud. Hacia el sur la falla cambia progresivamente a una dirección N-S, donde su prolongación se infiere la alienación de los volcanes El Cántaro, Nevado de Colima y Colima.

### **4.3 Geología del subsuelo**

De acuerdo con la información geológica y geofísica 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 porción superior, por un medio granular conformado por depósitos lacustres y vulcanoclásticos, sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados polimícticos que rellenan el valle tectónico; la porción inferior está conformada por un medio fracturado que se aloja en las rocas volcánicas de composición riolítica, entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, y rocas sedimentarias (calizas, lutitas y areniscas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. 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).

El medio fracturado aflora principalmente en las laderas del Volcán de Colima y en conjuntos volcánicos terciarios que están dispuestos en los estratos inferiores. El medio granular sobreyace al acuífero fracturado en las partes bajas de la cuenca aluvial, donde el espesor del relleno aumenta de la periferia hacia el centro del valle y es superior a 300 m, dado que los pozos perforados en esta zona no llegaron a las rocas cristalinas y sedimentarias que forman el basamento y las fronteras laterales del acuífero al sur, al oriente y al poniente.

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.



## **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 el otro de tipo granular, con interconexión hidráulica entre ellos.

La porción superior está constituida por sedimentos aluviales de granulometría variada, depósitos vulcanoclásticos 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 300 m y se incrementa aumenta 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 el 2014, se realizaron 5 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Adicionalmente, se cuenta con información de otras 5 pruebas ejecutadas en el acuífero vecino Alzada-Tepames, y algunas más en los acuíferos Ixtlahuacán y Armería-Tecomán Periquillos, todos ellos con la misma constitución, origen y evolución geológica. De los resultados de su interpretación por los métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad que varían de  **$1.7 \times 10^{-4}$  a  $2.9 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  (14.7 a 2505.6  $\text{m}^2/\text{d}$ )**. En las 5 pruebas realizadas en el acuífero los valores varían de **0.54 a  $5.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (46.6 a 492.5  $\text{m}^2/\text{d}$ )**. Los valores de conductividad hidráulica varían de  **$3.6 \times 10^{-6}$  a  $3.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  (0.3 a 3.3  $\text{m/d}$ )**. 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, por la constitución geológica del acuífero se le asigna valores promedio de coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico de **0.05 y 0.15**, respectivamente.

### **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información piezométrica para los años 1997, 2006, 2007 y 2013.

## 5.4 Comportamiento hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático en el año 2013 muestra valores que variaban de 5 a 70 m. Las menores profundidades, de 5 a 10 m, se registraron en la porción central del acuífero, en el área que se encuentra entre las poblaciones Villa de Álvarez, Coquimatlán y Colima; así como en las inmediaciones del poblado Cuauhtémoc y al norte de Colima, a lo largo del arroyo entre los poblados El Chanal y El Chivato. Los niveles más profundos, de 60 a 70 m, se presentan en las inmediaciones de Comala y al suroeste de El Trapiche.

De manera general, la profundidad al nivel del agua subterránea se incrementa gradualmente, por efecto de la topografía, de la porción central del acuífero, donde se ubica la ciudad de Colima, hacia el norte en dirección al Volcán de Colima (figura 4).

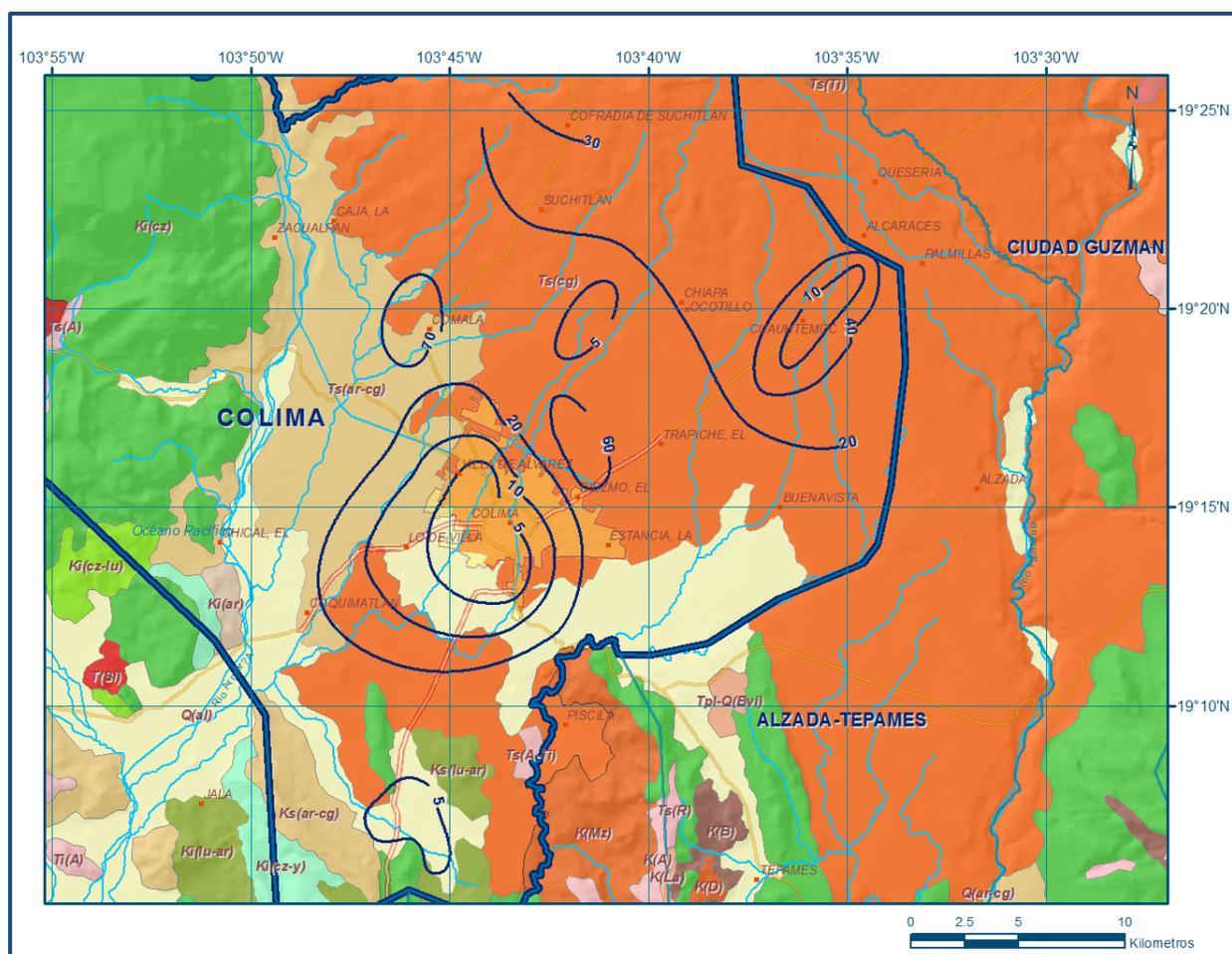


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2013 mostró valores que variaron de 1250 a 300 msnm, los valores, de 1050 a 1250 msnm, se registran hacia las estribaciones del Volcán de Colima, desde donde descienden con gradiente hidráulico alto hacia el sur, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur, hacia los ríos Salado y Armería. Los valores menores de elevación, de 300 a 350 msnm, se presentan en la porción sur del acuífero: al sur de Coquimatlán, a lo largo del Río Armería, hacia el acuífero Armería-Tecomán-Periquillos; y entre los poblados La Lomita y El Gallo, a lo largo del arroyo que confluye al Río Armería.

En esta misma región, pero al norte de Los Ortices, se observa una salida subterránea hacia el Río Salado, que representa el límite entre los acuíferos Colima y Alzada-Tepames (figura 5).

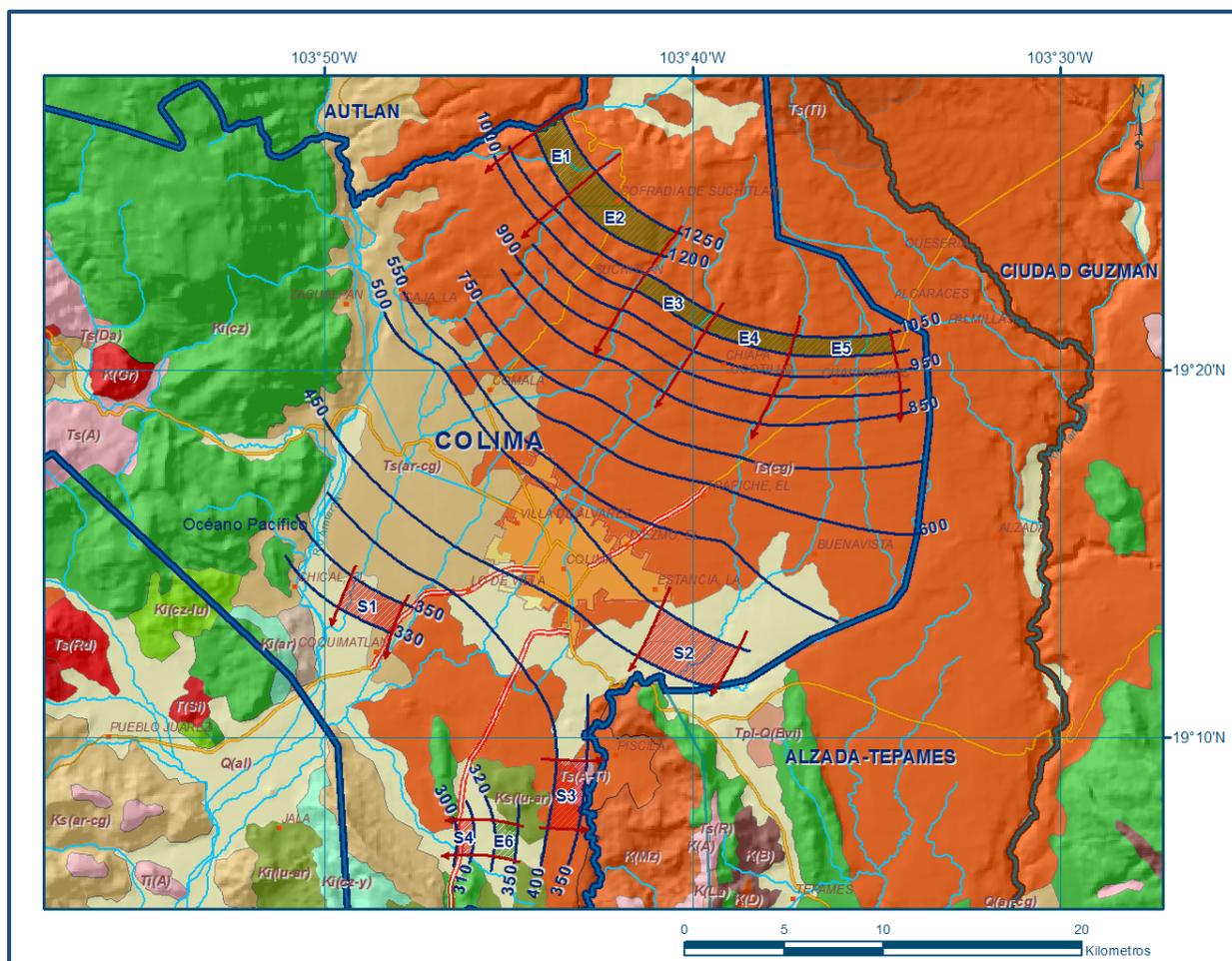


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

La evolución del nivel estático en el periodo 1997-2013 muestra abatimientos generalizados en la mayor parte de la superficie del acuífero, cuyos valores extremos varían de 2 a 30 m. Los mayores abatimientos, de 10 a 30 m, se registran en la zona comprendida entre el norte de Villa de Álvarez y Comala, donde el promedio anual es de 1.0 m.

En la zona urbana de la Ciudad de Colima y sus inmediaciones, el abatimiento promedio anual es de 0.2 m. En la zona norte, topográficamente más alta, se observaron recuperaciones de 2 m y localmente de hasta 10 m, con un promedio anual de 0.3 m.

En la superficie restante del acuífero no se registran variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

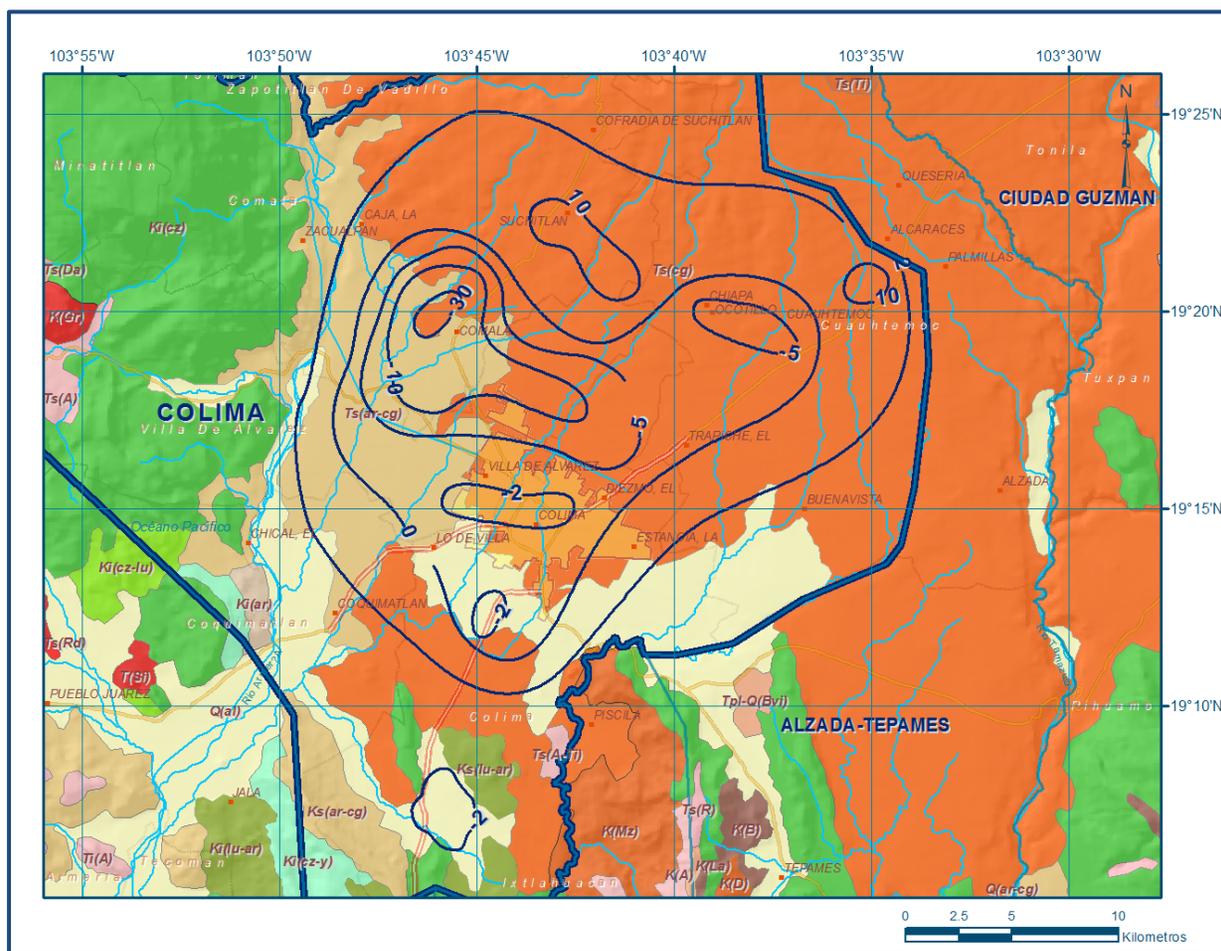


Figura 6. Evolución del nivel estático en msnm (1997-2013)

## 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2013, se tomaron 15 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, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, calcio, magnesio, sodio y potasio; además de los elementos traza arsénico, flúor y boro. De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, en todos los aprovechamientos no se sobrepasa el límite máximo permisible (LMP) de sólidos totales disueltos (STD) que es de 1000 mg/l, establecido por la modificación a 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 68 a 639 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 106 a 999  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la porción central del acuífero; en tanto que las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican al norte. Ambos valores se incrementan gradualmente de norte a sur en la dirección del flujo subterráneo. La temperatura varía de 23.4 a 28.2 °C y el pH de 6.6 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. Se observa una evolución a bicarbonatada-cálcica-clorurada y bicarbonatada-sódica-clorurada en la dirección del flujo subterráneo de norte a sur.

La concentración de arsénico inorgánico disuelto ( $i\text{As}$ ) es un parámetro importante para la evaluación de la contaminación de los acuíferos, la cual puede ser provocada por la incorporación de contaminantes de origen antropogénico desde la superficie y/o por los procesos naturales de interacción agua-roca en medios geológicos específicos. La norma define concentraciones límite que varían de 0.025 mg/l para uso doméstico (NOM, 2021) a 0.100 mg/l para uso agrícola (SEDUE, 1989).

La normatividad mexicana establece el LMP de concentración de 1.5 mg/l de flúor en el agua de abastecimiento público. Para el boro la norma mexicana no establece un LMP, sin embargo los criterios ecológicos de calidad del agua (SEDUE, 1989) indican un máximo permisible de 1 mg/l, aunque la OMS lo sitúa en 500 µg/l (WHO, 2004), mientras que para uso agrícola y pecuario se han definido límites entre 0.7 y 5 mg/l (SEDUE, 1989), respectivamente.

En todas las muestras de agua analizadas no se excedieron los LMP de concentración de arsénico, flúor y boro que establece las normas mexicanas y la OMS. El arsénico presenta concentración que varía de 5 a 12.6 µg/l, con un promedio de 5.5 µg/l. El flúor presenta concentraciones de 0.13 a 0.969 mg /l, con un promedio de 0.33 mg/l; en tanto que para el boro se registraron concentraciones de 0.13 a 0.7 mg/L, con un promedio de 0.38 mg/l.

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

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2013, se registraron un total de 862 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 354 son pozos, 505 norias y 3 manantiales; de ellos 717 se consideran activos y 145 inactivos. De las obras activas, 216 (30.1%) se destinan al uso agrícola, 90 (12.6%) para uso público-urbano, 7 (1.0%) para uso industrial y 404 (56.3%) para usos múltiples.

El volumen de extracción calculado es de **34.5 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 18.6 hm<sup>3</sup> (53.9 %) son para uso público-urbano, 9.9 hm<sup>3</sup> (28.7 %) para uso agrícola, 0.6 hm<sup>3</sup> (1.7 %) para uso industrial y 5.4 hm<sup>3</sup> (15.7 %) para otros usos.

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

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 1997-2013, en una superficie de **495 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

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

$$\text{RV} + \text{Eh} + \text{RI} - \text{B} - \text{Sh} - \text{Dm} - \text{ETR} - \text{Dfb} = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

**Rv** = Recarga vertical;

**Eh** = Recarga por flujo subterráneo horizontal;

**Ri** = Recarga incidental;

**B** = Bombeo;

**Sh** = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

**Dm** = Descarga por manantiales;

**ETR** = Evapotranspiración;

**Dfb** = Descarga por flujo base de ríos

**$\Delta V(S)$**  = Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$RV = B + Sh + Dm + ETR + Dfb \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \quad (2)$$

### **7.1.2 Recarga incidental (Ri)**

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró conservadoramente que un 10% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a los 20 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo.

El volumen total de agua destinada a la agricultura es de 254.5 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 9.9 hm<sup>3</sup> corresponden a la extracción de agua subterránea y 244.6 hm<sup>3</sup> al volumen promedio anual de agua superficial procedente del Río Armería que se utiliza en los módulos Peñitas y Juárez del Distrito de Riego 053. Si consideramos que el 10 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna como recarga efectiva al acuífero, su valor es de 25.4 hm<sup>3</sup>/año.

Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varía según la zona, para este caso se consideró también un promedio de 10 %, que aplicado al volumen destinado al uso público-urbano de 18.6 hm<sup>3</sup>/año, arroja un valor de infiltración de 1.9 hm<sup>3</sup>/año. Por lo tanto,  $Ri = 25.4 + 1.9 = 27.3$   
**Ri = 27.3 hm<sup>3</sup>/año.**

### **7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)**

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

Las entradas al acuífero, tienen su origen en las zonas de recarga localizadas en las sierras que rodean al valle.

Para el cálculo de entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

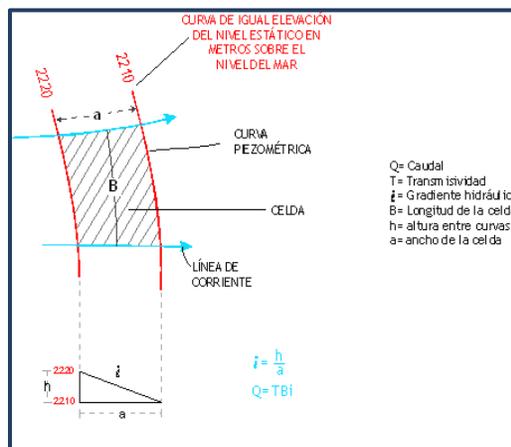
Donde:

**Q** = Gasto;

**T** = Transmisividad;

**B** = Longitud de la celda;

**i** = Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **49.6 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2013)

| CELDA                 | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m) | Gradiente i | T (m <sup>2</sup> /s) | CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año) |
|-----------------------|----------------|-------------|------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| E1                    | 3820           | 1320        | 50                                 | 0.03788     | 0.0010                | 0.1447                       | 4.6                            |
| E2                    | 4410           | 1410        | 50                                 | 0.03546     | 0.0010                | 0.1564                       | 4.9                            |
| E3                    | 4115           | 1175        | 50                                 | 0.04255     | 0.0030                | 0.5253                       | 16.6                           |
| E4                    | 4705           | 1200        | 50                                 | 0.04167     | 0.0008                | 0.1568                       | 4.9                            |
| E5                    | 5880           | 1320        | 50                                 | 0.03788     | 0.0020                | 0.4455                       | 14.0                           |
| E6                    | 2350           | 1470        | 30                                 | 0.02041     | 0.0030                | 0.1439                       | 4.5                            |
| <b>Total entradas</b> |                |             |                                    |             |                       |                              | <b>49.6</b>                    |

Los valores de T utilizados corresponden al promedio de los obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas tanto en este acuífero como en otros acuíferos vecinos, adaptados al espesor saturado de las celdas de flujo.

## 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las zonas de niveles freáticos someros, a través de manantiales (Dm) y por flujo base de los ríos (Dfb).

### 7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **34.5 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2013, mostrada en la figura 5. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **5.6 hm<sup>3</sup>/año**. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2013)

| CELDA                 | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | $h_2-h_1$ (m) | Gradiente i | T (m <sup>2</sup> /s) | CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año) |
|-----------------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| S1                    | 3235           | 1470        | 20            | 0.01361     | 0.0010                | 0.0440                       | 1.4                            |
| S2                    | 4705           | 2350        | 50            | 0.02128     | 0.0005                | 0.0501                       | 1.6                            |
| S3                    | 3235           | 1765        | 50            | 0.02833     | 0.0007                | 0.0642                       | 2.0                            |
| S4                    | 2060           | 1030        | 10            | 0.00971     | 0.0010                | 0.0200                       | 0.6                            |
| <b>Total entradas</b> |                |             |               |             |                       |                              | <b>5.6</b>                     |

### 7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

El caudal conjunto que descargan los principales manantiales: Los Ameales, Zacualpan, El Cahuite, Agua Dulce y Tampumachay es de 28.5 lps, que representan un volumen anual de 0.9 hm<sup>3</sup>. **Dm = 0.9 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.4 Evapotranspiración (ETR)

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

Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

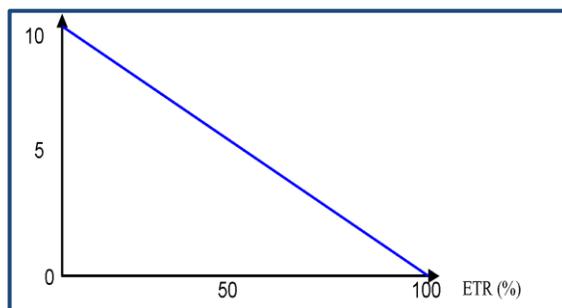
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 24 °C y precipitación = 758 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 714 mm.

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

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

|          |        |                  |            |
|----------|--------|------------------|------------|
| T (°C) = | 24     |                  |            |
| P(mm) =  | 758    | P <sup>2</sup> = | 574564     |
| L =      | 1591.2 | L <sup>2</sup> = | 2531917.44 |
| ETR (mm) | 714.0  |                  |            |

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, a las diferentes profundidades consideradas. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 14.4 hm<sup>3</sup>/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración real

| Intervalo entre curvas (m) | Profundidad media (m) | Área (km <sup>2</sup> ) | %    | Lámina de ETR (m) | Volumen de ETR (hm <sup>3</sup> /año) |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------|------|-------------------|---------------------------------------|
| 10                         | 10.0                  | 7                       | 0.3  | 0.714             | 1.5                                   |
| 5 a 10                     | 7.5                   | 26                      | 0.25 | 0.714             | 4.6                                   |
| 5                          | 5.0                   | 23                      | 0.5  | 0.714             | 8.2                                   |
|                            | <b>TOTAL</b>          | <b>56.0</b>             |      | <b>TOTAL</b>      | <b>14.4</b>                           |

### 7.2.5 Descarga por flujo base de los ríos (Dfb)

El valor de esta variable, que representa la descarga del acuífero durante la temporada de estiaje, se estimó en 1.2 m<sup>3</sup>/s en el Río Colima, durante el periodo 2003-2013 en la estación Peñitas, que representa un volumen de 37.8 hm<sup>3</sup> anuales. No se considera flujo base en el Río Armería porque su régimen de escurrimiento está controlado la presa Basilio Badillo "Las Piedras", ubicada aguas arriba, en el estado de Jalisco. Por lo tanto, **Dfb = 37.8 hm<sup>3</sup> anuales.**

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 1997-2013 (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<sup>2</sup>)

**h:** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -104.9 hm<sup>3</sup>, por lo que el promedio anual es de **-6.6 hm<sup>3</sup>**

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (1997- 2013)

| Evolución (m) | Evolución media (m) | Área (km <sup>2</sup> ) | Sy           | ΔV(S) (hm <sup>3</sup> /año) |
|---------------|---------------------|-------------------------|--------------|------------------------------|
| -2            | -2.0                | 18.0                    | 0.1          | -3.6                         |
| -30           | -30.0               | 3.0                     | 0.1          | -9.0                         |
| -5            | -5.0                | 7.0                     | 0.1          | -3.5                         |
| 10            | 10.0                | 14.0                    | 0.1          | 14.0                         |
| -10 a -30     | -20.0               | 31.0                    | 0.1          | -62.0                        |
| -5 a -10      | -7.5                | 40.0                    | 0.1          | -30.0                        |
| 0 a -5        | -2.5                | 140.0                   | 0.1          | -35.0                        |
| 0 a 2         | 1.0                 | 242.0                   | 0.1          | 24.2                         |
|               | <b>TOTAL</b>        | <b>495.0</b>            | <b>TOTAL</b> | <b>-104.9</b>                |
|               |                     | <b>Promedio anual</b>   |              | <b>-6.6</b>                  |

### Solución de la ecuación de balance

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

$$R_v = B + Sh + D_m + ETR + D_{fb} \pm \Delta V(S) - E_h - R_i$$

$$R_v = 34.5 + 5.6 + 0.9 + 14.4 + 37.8 - 6.6 - 49.6 - 27.3$$

$$R_v = 9.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual (R) está definida por la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 9.8 + 49.6 + 27.3$$

$$R = 86.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

$$\text{DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL} = \text{RECARGA TOTAL} - \text{DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA} - \text{EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS}$$



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 **73,911,766 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 86.7 - 12.2 - 73.911766 \\ \text{DMA} &= 0.588234 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **588,234 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua en 2007. Actualización de Mediciones Piezométricas en los Acuíferos de Colima, El Colomo, Santiago-Salagua y Marabasco, en el estado de Colima. Realizado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua en 2008. Reactivación de la Red Piezométrica de los Acuíferos Armería-Tecomán-Periquillos, Venustiano Carranza, Ixtlahuacán y Alzada-Tepames, en el estado de Colima. Realizado por GEOPSA, S. A. de C.V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1974. Estudio Geohidrológico Preliminar del Valle de Colima. Realizado por HIDROTEC, S.A

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1978. Estudios Geohidrológico de Evaluación y Censo en el estado de Colima. Realizado por INGENIERÍA Y GEOTECNIA, S.A.,

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1980. Estudio Geohidrológico, Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en el estado de Colima. Elaborado por GEOFIAP, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1987. Actualización de Mediciones Piezométricas en el Valle de Colima, Colima.