

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO JUXTLAHUACA (2017), ESTADO DE
OAXACA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1.	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1.	Localización.....	2
1.2.	Situación administrativa del acuífero.....	4
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3.	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia fisiográfica.....	6
3.2	Clima.....	7
3.3	Hidrografía.....	8
3.4	Geomorfología.....	8
4	GEOLOGÍA.....	9
4.1.	Estratigrafía.....	10
4.2.	Geología estructural.....	18
4.3.	Geología del subsuelo.....	19
5	HIDROGEOLOGÍA.....	20
5.1.	Tipo de acuífero.....	20
5.2.	Parámetros hidráulicos.....	20
5.3.	Piezometría.....	20
5.4.	Comportamiento hidráulico.....	20
5.4.1.	Profundidad al nivel estático.....	20
5.4.2.	Elevación del nivel estático.....	21
5.4.3.	Evolución del nivel estático.....	22
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	23
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	24
7.1.	Entradas.....	24
7.1.1.	Recarga vertical (Rv).....	25
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	25
7.2.	Salidas.....	26
7.2.1.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	26
7.2.2.	Evapotranspiración (ETR).....	27
7.2.3.	Extracción por bombeo (B).....	28
7.2.4.	Descargas por flujo base (Dfb).....	28
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	28
8	DISPONIBILIDAD	29
8.1	Recarga total media anual (R).....	29
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	29
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	30
9	BIBLIOGRAFÍA.....	31

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 Juxtlahuaca, definido con la clave 2017 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción occidental del estado de Oaxaca, entre los paralelos 17° 04' y 17° 38' de latitud norte y los meridianos 97° 34' y 98° 10' de longitud oeste; abarcando una superficie de 1,946 km²(figura 1).

Limita al norte con los acuíferos Huajuapán de León y Tamazulapán, al este y sur con el acuífero Jamiltepec y al oeste con los acuíferos Mariscal y Cuajinicuilapa, este último el estado de Guerrero.



Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente se encuentra ubicado completamente o en gran parte de los municipios San Juan Ñumi, Santiago Nundiche, Heroica Ciudad de Tlaxiaco, Santa Cruz Nundaco, Santos Reyes Tepejillo, San Miguel Tlacotepec y San Sebastián Tecomaxtlahuac; en parte de los municipios Tezoatlán de Segura y Luna, Ixpantepec Nieves, San Martín Huamelulpam, Santa María del Rosario, San Cristóbal Amoltepec, Santo Tomás Ocotepec, San Martín Itunyoso y Santiago Juxtlahuaca y en pequeñas porciones de los municipios Santo Domingo Tonalá, San Agustín Atenango, San Antonino Monteverde, San Sebastián Nacananduta, San Pedro Mártir Yucoxoco, Magdalena Peñasco, San Miguel El Grande, San Esteban Atlatlahuaca y Putla Villa de Guerrero.

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 del acuífero

ACUÍFERO 2017 JUXTLAHUACA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	97	57	6.0	17	36	56.3
2	97	55	42.3	17	37	15.1
3	97	54	26.6	17	33	49.0
4	97	50	44.0	17	32	57.3
5	97	51	24.7	17	31	5.3
6	97	50	15.7	17	29	34.4
7	97	47	50.2	17	29	57.0
8	97	46	14.7	17	28	1.7
9	97	43	20.8	17	28	28.7
10	97	41	8.4	17	30	0.1
11	97	40	51.2	17	26	14.5
12	97	39	32.8	17	26	34.7
13	97	39	38.7	17	24	15.7
14	97	35	33.2	17	22	56.0
15	97	35	54.7	17	20	47.0
16	97	34	37.6	17	17	22.0
17	97	35	52.3	17	13	41.5
18	97	36	59.6	17	8	4.6
19	97	41	8.9	17	6	27.9
20	97	45	5.1	17	4	15.0
21	97	48	27.3	17	6	51.0
22	97	50	29.2	17	11	16.8
23	97	52	59.7	17	13	31.9
24	97	56	45.0	17	13	31.9
25	98	0	38.1	17	12	23.1
26	98	8	10.7	17	15	44.7
27	98	10	0.3	17	18	0.7
28	98	4	13.7	17	23	56.0
29	98	2	43.8	17	27	13.4
30	97	59	48.5	17	29	3.6
31	97	58	2.6	17	35	16.4
1	97	57	6.0	17	36	56.3

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Juxtlahuaca pertenece al Organismo de Cuenca IV “Balsas”. El territorio completo del acuífero no se encuentra sujeto a las disposiciones de ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

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 subterránea es el múltiple. En el acuífero no existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero Juxtlahuaca se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación y otros en acuíferos vecinos para determinar su recarga media anual, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LA UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE: HUAJUAPAN DE LEÓN, JUXTLAHUACA, TAMAZULAPAN Y MARISCALA, ESTADO DE OAXACA. Realizado por la empresa Laramide Ingenieros, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2003. Las principales conclusiones fueron: La Unidad Hidrogeológica Juxtlahuaca se localiza en la Alta Mixteca, municipios colindantes al Municipio de la Heroica Ciudad de Tlaxiaco, a excepción de su extremo centro-poniente, donde se ubica el Poblado de Santiago Juxtlahuaca y se origina la corriente de igual nombre, el cual se desarrolla en una longitud de aproximadamente 23 km, antes de confluir al Río Mixteco por su margen izquierda.

El Estudio considera dos zonas acuíferas; la primera se vacía por medio de un manantial en la zona del poblado de Juxtlahuaca, considerando que su zona de recarga y almacenamiento se ubica en las calizas de la Formación Teposcolula.

La segunda zona acuífera se aloja en el subálveo del Río Tlaxiaco, estando ubicada el área de extracción cercana al Poblado de Tlaxiaco donde confluyen varias corrientes, estando constituido el subálveo por arenas, gravas y conglomerados.

Se encuentran 2 manantiales de importancia, el manantial denominado “Ojo de Agua” cercano a la Heroica Ciudad de Tlaxiaco, alumbrando un caudal de 100 l/s de uso múltiple, Público Urbano y Agrícola. El segundo manantial, se le conoce como “Laguna Encantada” alumbrando un gasto aproximado de 40 L/s, cercano a la población de Juxtlahuaca, su uso es servicios, para actividades recreativas.

Los resultados de calidad del agua determinaron que el agua es de buena calidad y apta para el consumo humano y que únicamente el manantial de la Laguna Encantada rebasa el límite permitido en lo que a los sólidos totales se refiere, por lo que solo se le da uso recreativo.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ACUÍFEROS DEL ESTADO DE OAXACA, ACUÍFERO JUXTLAHUACA. Elaborado por la Universidad Autónoma Chapingo, para el Organismo de Cuenca Pacífico Sur de la CONAGUA, en 2010. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el análisis de la evolución de los niveles del agua; obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas. Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas del INEGI (1997), la superficie cubierta por el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica XII Sierra Madre del Sur, dentro de las Subprovincias Mixteca alta al este y Cordillera Costera del Sur.

Está considerada como la más completa y menos conocida del país, y debe muchos de sus rasgos particulares a su relación con la placa de cocos. Esta es una de las placas móviles que integran la litósfera o corteza exterior terrestre; emerge a la superficie del fondo del Océano Pacífico al suroeste y oeste de las costas, hacia las que se desplaza lentamente dos o tres centímetros al año para encontrar a lo largo de las mismas el sitio llamado "de subducción" donde buza nuevamente hacia el interior de la Tierra.

A ello se debe la fuerte sismicidad que se manifiesta en esta provincia, en particular sobre las costas guerrerenses y oaxaquenses, siendo la trinchera de Acapulco una de las zonas más activas.

Esta relación es la que seguramente ha determinado que alguno de los principales ejes estructurales de la provincia -depresión del Balsas cordilleras costeras, línea de costa, etc.- tengan estricta orientación este-oeste, condición que tiene importantes antecedentes en la provincia del Eje Neovolcánico, y que contrasta con la predominante orientación estructural noroeste-sureste del norte del país.

La provincia tiene una litología muy completa en la que las rocas intrusivas cristalinas, especialmente los granitos y las metamórficas, tienen más importancia que en la mayoría de las provincias del norte.

Los climas subhúmedos, cálidos y semicálidos imperan en gran parte de la provincia, pero en ciertas regiones elevadas, incluyendo algunas con extensos terrenos planos como los Valles Centrales de Oaxaca, los climas son semisecos, templados y semifríos, en tanto que al oriente, en los límites con la Llanura Costera del Golfo Sur, hay importantes áreas montañosas húmedas cálidas y semicálidas. La Subprovincia Mixteca Alta, presenta un núcleo constituido por una sierra baja compleja de aluviones continentales antiguos y rocas metamórficas (gneis).

Alcanza altitudes superiores a los 2 400 m y se encuentra rodeada al este, oeste y norte por lomeríos escarpados, también de litología compleja, que incluye materiales metamórficos (gneis), ígneos intrusivos ácidos y sedimentarios continentales antiguos. Al occidente tiene una franja, orientada norte-sur, de llanura con lomeríos; y al norte, un valle de laderas tendidas; además, hay otros sistemas de topoformas: lomerío con cañadas y lomerío con llanuras.

La Subprovincia Cordillera Costera del Sur, es un conjunto de sierras que se extienden fundamentalmente a lo largo de las costas michoacanas, guerrerenses y oaxaqueñas, desde la desembocadura del río Coahuayana (límite entre Michoacán y Colima) hasta el puerto de Pochutla, Oaxaca.

Una ramificación de éstas penetra al poniente en dirección norte, entre los volcanes de Colima y Tancítaro, pertenecientes al Eje Neovolcánico. La cordillera se localiza sobre el sitio de subducción de la Placa de Cocos, a cuyos desplazamientos a través del tiempo son atribuibles al origen y evolución de esta región. Debido a la variada litología que se presenta en estas sierras, se encuentran muchas y diferentes rocas cretácicas y paleógeno-neógenas, como calizas y calizas-lutitas del Cretácico Inferior, que se distribuyen al occidente de la subprovincia.

3.2 Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana, en la zona del acuífero predomina el clima templado-subhúmedo con lluvias en verano. Durante los meses de mayo a septiembre, tiempo en que las aguas de los arroyos montañosos bañan la superficie. Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 4 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Santiago Juxtlahuaca, Santa María Asunción Tlaxiaco, San Martín Itunyoso y San Miguel Tlacotepec, las cuales cuentan con un periodo de análisis de 39 años (1971-2010).

De acuerdo con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **869.6 mm y 17.1°C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor promedio de **1709 mm anuales**.

3.3 Hidrografía

El área que cubre el acuífero Juxtlahuaca pertenece a la Región Hidrológica 18 Balsas, Cuenca Alta del Río Balsas, en la cual el Río Mixteco es la corriente principal, que nace en el denominado Cerro de Olla en la Alta Mixteca, en el Municipio de Santo Tomas Ocotepec. Después de 12 km, confluye con el Río Tlaxiaco el cual ha recibido aportaciones de ríos, arroyos y principalmente del manantial Ojo de Agua.

El Río Ñumi se une al Río Mixteco, después de su confluencia con el Río Tlaxiaco, este nace en el municipio de San Juan Ñumi y traza su cauce en forma paralela al Tlaxiaco. Al atravesar el Río Mixteco, el poblado de San Juan Mixtepec, se le conoce como Río Grande y ahí le confluye el Río Salado, el cual nace en los cerros de Yucunicoco. Tiene su recorrido en sentido noroeste por unos 27 km, hasta unos 3 km al norte del poblado Santos Reyes Tepejillo, en donde se desvía al poniente por unos 4 km, para recibir los escurrimientos del Río Juxtlahuaca por su margen izquierda. La corriente del Río Juxtlahuaca nace a unos 14 km al sur de la población de Santiago Juxtlahuaca, su trayectoria de sur a norte y después de 2.5 km de haber pasado la población de Santiago Juxtlahuaca, se le une las aguas de la Laguna Encantada.

3.4 Geomorfología

Las rocas correspondientes al Jurásico Inferior y Medio, constituidas principalmente por sedimentos de origen continental, costeros y de plataforma, definen lomeríos con pendiente moderada y elevaciones máximas de 2,000 msnm, en los que el drenaje es de tipo dendrítico y de baja densidad, los cauces son estrechos y las pendientes de aproximadamente del 10% aumentan hacia la cabecera. En las rocas de Edad Jurásico Superior y Cretácico Inferior, compuestas por sedimentos arcillosos y arcillo-calcáreos, modelan formas más suaves que las anteriores, con un denso drenaje dendrítico desarrollado en su superficie. En lo que corresponde a los sedimentos arenosos, costeros y calcáreos que fueron depositados cercanos a plataforma, forman elevaciones moderadas, con alturas máximas de 2,000 msnm; desarrollándose en ellas un drenaje de tipo dendrítico con cauces estrechos y pendientes máximas de 25%.

Las rocas sedimentarias del Cretácico Medio y Superior, corresponden principalmente a calizas, dolomías, yesos y calizas arcillosas, plegadas, que definen amplias sierras con pendiente moderada y elevaciones máximas de 2,500 msnm. En ellas, por ser permeables, no se observa un drenaje superficial definido, por presentar fenómenos cársticos que propician un drenaje subterráneo. Por último, las rocas ígneas extrusivas principalmente de tipo andesítico, compuesta por una serie alternante de tobas y derrames, constituye sierras escarpadas con elevaciones de hasta 2,600 msnm sobre las que se desarrolló un sistema de drenaje de tipo dendrítico.

4 GEOLOGÍA

El estado de Oaxaca está situado el borde sur occidental de la placa Norteamericana, sitio en donde la placa de Cocos es subduccionada bajo la corteza continental. Durante el desarrollo de este fenómeno a lo largo de la historia geológica se han producido depósitos relacionados con arcos insulares y mares marginales creando secuencias sedimentarias y vulcano-sedimentarias dentro de un entorno geológico tectónico muy complejo (figura 2).

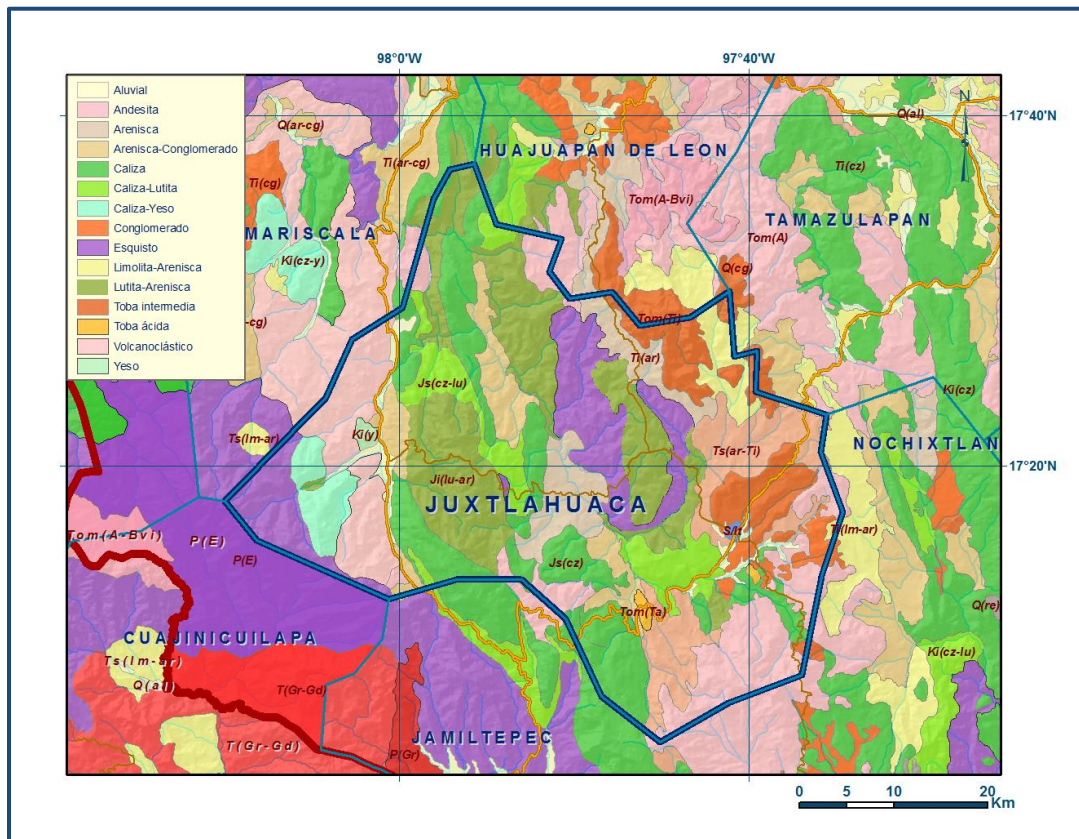


Figura 2. Geología general del acuífero

Desde el punto de vista geológico y tectónico el estado de Oaxaca es el más complejo de todo el país debido a la presencia de diferentes elementos tectónicos presentes y a las diversas litologías expuestas en superficie; siendo las más importantes las que definen los terrenos Maya, Cuicateco, Zapoteco, Mixteco y Chatino - Complejo Xolapa, Limitados por fallas.

El Terreno Xolapa es el más grande, pero el menos conocido, de los terrenos de la parte sur de México. Abarca un área aproximada de 70 a 100 km de ancho y 600 km de largo, corriendo éste paralelo a la costa del Pacífico.

Este terreno representa la raíz de un arco magmático del Mesozoico Medio al Paleógeno, caracterizado por la presencia de orto y paragneis y migmatitas en conjunto con plutones sintectónicos y postectónicos, consistiendo en rocas con alto grado de metamorfismo. Los contactos del terreno Xolapa con los terrenos Mixteco y Guerrero están caracterizados por la presencia de milonitas con una asociación con fallas normales, producto de la reactivación de otras estructuras.

Las rocas metamórficas del Complejo Xolapa se encuentran afectadas por cuerpos intrusivos Paleógeno-Neógenos, cubren al complejo dos diferentes depósitos cuaternarios.

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía de la región es muy compleja, ya que contiene elementos geotectónicos de muy diversas edades y litologías, mezclados o sobrepuestos a través del tiempo, describiendo a continuación los aspectos más relevantes de las unidades litológicas presentes:

Complejo Oaxaqueño

Las rocas metamórficas del Precámbrico que se encuentran aflorando en el estado de Oaxaca han sido ampliamente estudiadas. Fries et. al. (1962) y Fries y Rincón Orta (1965), definen al Complejo Oaxaqueño como una secuencia metamórfica de alto grado. Posteriormente Schlaepfer (1970), lo define como una secuencia de gneises de hornblenda y augen gneises de color café amarillento con notable foliación. Se encuentra aflorando en la porción suroriental fuera del límite del área. Está constituido por gneis de colores rojizo a gris oscuro al fresco y de tonalidades rojizas por efectos del intemperismo.

Constituye el basamento sobre el cual descansan discordantemente los sedimentos terrígenos mesozoicos del Grupo Puebla, el cual se ubica al nororiente del área y también los yesos de la Formación San Juan Teita.

Se le considera una edad Precámbrica de acuerdo con los resultados obtenidos por el método Plomo- Alfa (Fries et. al. 1974), en muestras recolectadas en el área de Santa Inés de Zaragoza, Oaxaca, en donde se obtuvieron edades de $1,190 \pm 20$ Ma y 839 ± 80 Ma. Se correlaciona con el Gneis Novillo de Tamaulipas y con el Gneis Huiznopala de Hidalgo.

Los sedimentos que dieron origen a esta secuencia metamórfica, fueron depositados en un geosinclinal que se extendía desde Oaxaca hacia el oriente del Estado de Hidalgo y al poniente de Tamaulipas, denominado como Geosinclinal Oaxaqueño por Fries (1962).

Complejo Acatlán

El Complejo Acatlán del Paleozoico fue propuesto por Ortega-Gutiérrez (1978), quien señala como área tipo la región de Acatlán, Puebla, y como sección tipo la observada a lo largo de la carretera federal No. 190, desde el entronque con el camino a Tecomatlán, hasta los poblados de San Miguel, Tultitlán, Cosoltepec, Xolutla Chazumba y Magdalena.

La define como una secuencia constituida por rocas metasedimentarias y metaígneas, la primera constituida por esquistos, gneises, pizarras, filitas y migmatitas; la segunda por rocas ofiolíticas, metagranitos y milonitas.

El Complejo Acatlán se divide en los subgrupos: Acateco: constituido por las formaciones Xayacatlán y Tecomate; Petlalcingo: conforma las formaciones Cosoltepec, Chazumba y Magdalena y Unidades metagraníticas: Granitoides Esperanza, Tronco de Totoltepec y Diques San Miguel.

Aflora en prácticamente todas las subcuencas, en el área afloran únicamente las formaciones Cosoltepec y Migmatita Magdalena; están constituidas por esquistos, augen-esquistos, algunos gneises de composición cuarzo feldespática de color café amarillento a gris plomo, con abundante sericita y vetillas de cuarzo.

En el área forma el basamento metamórfico de la subcuenca, en las que subyace de manera discordante a la secuencia terrígena continental del Jurásico Inferior. Ruiz-Castellanos (1979), obtuvo una edad de 481 ± 29 Ma a partir de 15 muestras analizadas, por lo que le asignó al Complejo Acatlán, una edad de Cámbrico-Silúrico. Se correlaciona en tiempo con el Esquisto Granjeno del estado de Tamaulipas.

Formación Rosario

Aflora durante el Mesozoico, nombre formacional propuesto por Erben (1956), para designar una secuencia constituida por un conglomerado basal, areniscas de color gris, rojizas y amarillentas, de grano fino a medio; de estratificación media y delgada, limolitas de los mismos colores, de estratificación delgada; lutitas y lodolitas negras, carbonosas y con vetas de carbón.

La localidad tipo la ubica en el cerro que se encuentra cercano al poblado El Rosario, situado al suroeste de Tezoatlán, Oaxaca. Aflora en la porción noroccidental de Huajuapán de León, en donde se localizan los poblados de Santiago Chilixtlahuaca, San José Chapultepec y Santiago Ayuquílilla, situados en el área que se le denomina como Subcuenca Mariscala, así como en los alrededores de Silacayoapilla, ubicada en la Subcuenca Huajuapán de León.

Está constituida por areniscas de grano fino a medio, de color verdoso, en capas con espesores de 5 a 60 cm que intemperizan en forma nodular; areniscas conglomeráticas en capas de 10 a 20 cm de espesor, con clastos de rocas ígneas y metamórficas; lutitas de color gris oscuro y café en paquetes de 30 a 50 cm de espesor, con gran cantidad de restos de plantas intercaladas y esporádicos paquetes de carbón.

Se reporta para esta unidad un espesor parcial de 110 m en una sección levantada entre Santiago Ayuquílilla y Chila de Flores. En Yucuquími de Ocampo se reporta un espesor parcial de 630 m y en Santa Catarina Yutandú, su espesor parcial es de 450 m; estas dos se ubican en la porción sur del acuífero Huajuapán de León. Con base a la flora fósil que contiene esta formación, se le sitúa en el Jurásico Inferior. Es correlacionable con la Formación Barranca Superior del estado de Sonora y con la Formación Huayacocotla del estado de Veracruz. De acuerdo con sus características litológicas y paleontológicas, se le infiere un origen continental, con facies fluviales y lacustres, en forma de abanicos aluviales que rellenaron las depresiones existentes.

Conglomerado Cualac

Con base en su posición estratigráfica y a la fauna que contiene, a esta unidad se le sitúa en el Aleniano Superior-Bajociano Inferior que pertenecen a la base del Jurásico Medio; se correlaciona en tiempo con la Formación Cahuascal de la Cuenca Tampico-Misantla. Nombre propuesto por Erben (1956), para designar a un conglomerado compuesto mayormente por guijarros de cuarzo blanco lechoso de 0.5 a 5 cm de diámetro y esporádicos fragmentos de mica, esquistos y gneises, empacados en una matriz cuarcítica color gris.

Presenta esporádicas intercalaciones de capas de limolitas y areniscas de estratificación delgada, color pardo y amarillento. Su localidad tipo, la sitúa en las cercanías del poblado Cualac, al poniente de Huamuxtitlán, Guerrero. Se observan afloramientos importantes de esta unidad al Poniente de Asunción Tlaxiaco en la porción Noroccidental del área, donde descansa sobre los Esquistos Acatlán y está cubierta por las rocas que constituyen a las unidades inferiores del Grupo Tecocoyunca.

Está constituida principalmente por areniscas, areniscas conglomeráticas y conglomerados de cuarzo subanguloso a subredondeado, de estratificación delgada y mediana y color amarillento. En la región de Yucuquimi de Ocampo su espesor parcial es de 200 m, en la zona de Santa Catarina Yutandú es de 80 m de espesor parcial, en tanto que en el área de Santiago Ayuquillilla el espesor parcial reportado es de 80 m.

Sobreyace transicional y concordantemente a la Formación Rosario y subyace de la misma manera a la Formación Tecomazuchil y al Grupo Tecocoyunca al sur de Huajuapán de León. De acuerdo con sus características litológicas, se infiere que el depósito del Conglomerado Cualac se realizó en ambientes continentales tales como en abanicos aluviales y depósitos de piamonte que rellenaron las depresiones existentes.

Grupo Tecocoyunca

Afloran durante el Mesozoico. Erben (1956) utiliza el nombre de Grupo Tecocoyunca para designar una secuencia de considerable espesor y diversidad de unidades contrastantes, la cual dividió en 5 formaciones: Zorrillo, Taberna, Simón, Otatera y Yucunúti; propone como localidad tipo a la barranca Tecocoyunca, localizada entre los poblados de Cualac y Huamuxtitlán, Guerrero.

El grupo presenta buenos afloramientos en las cercanías de San Juan Diquiyú, en la región de Tezoatlán, al norte del área; sobre el Río Chilapa y al poniente de Tlaxiaco, en la porción noroccidental del área.

Caliza con cidaris

La edad de esta caliza, corresponde al Oxfordiano. Buckhardt (1930), describió en las cercanías de El Consuelo, Oaxaca, una caliza gris bien estratificada que se vuelve blanquizca con el intemperismo y contiene Cidaris. La edad de esta caliza según el autor citado, corresponde al Oxfordiano. Cerca del Rancho Pacheco, en la región de Tlaxiaco, se observan buenos afloramientos de la caliza con cidaris. La secuencia denominada "caliza con cidaris" consiste en margas de color gris claro y a veces de color crema con algunas manchas amarillas y numerosas intercalaciones de calizas margosas de color gris de poco espesor.

En las partes medias de la secuencia se encuentran las mismas margas, con intercalaciones de calizas delgadas y margas grises, pero aparte se encuentran intercalaciones de calizas duras, oscuras y no margosas, las cuales contienen algo de pedernal. Las partes superiores de la secuencia consisten en calizas oscuras y duras con algo de pedernal, estratificadas en bancos de 30 cm a 1 m de espesor.

Caliza Teposcolula

Su edad está algo indeterminada, sin embargo, en base a su contenido fosilífero, se le considera del Cretácico Medio, Albiano-Cenomaniano. Salas (1949) da este nombre a una caliza de color crema o gris oscuro que se vuelve blanquizco con el intemperismo, densa y con algunos horizontes fosilíferos con abundantes ostras pequeñas, casi destruidas por la erosión en la superficie, con partes masivas y otras bien estratificadas que aflora en el área de San Pedro Teposcolula, Oaxaca, al noreste del área, donde sitúa su localidad tipo. Esta unidad estratigráfica se limita a una región relativamente pequeña dentro del estado de Oaxaca y tiene un espesor de 300 m.

Dentro del área del acuífero, los afloramientos de la Formación Teposcolula ocupan las partes más prominentes de las sierras formadas por plegamientos anticlinales de rumbo NW-SE. Esta unidad es la que presenta en la zona las mejores posibilidades acuíferas, dado que presenta buena permeabilidad debido a procesos cársticos y fracturamiento.

En el campo se le identifica porque forma altos topográficos abruptos y porque frecuentemente exhibe topografía cárstica; por otra parte con tiene pseudocapas, lentes y nódulos de pedernal, bancos de ruditas y por regla general, la mayoría de sus estratos muestran al microscopio una población de microfósiles variada y abundante. La Caliza Teposcolula está casi exclusivamente formada por una sucesión monótona de estratos gruesos de caliza de color gris a beige con lentes y nódulos de pedernal negro. Algunas capas están dolomitizadas. En el área su espesor es poco mayor de 1,000 m.

Grupo Sabinal

Con este nombre, Burchardt (1930) describe una serie de rocas marinas laminadas y bituminosas que afloran ampliamente en las inmediaciones de Tlaxiaco, específicamente sobre el Río Sabinal; contienen amonitas que registran una edad que abarca desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Inferior. Sobre el Río Sabinal aflora la columna más completa de esta unidad; en su base contiene una serie de calizas arcillosas de color gris y estratificación media (de 30 a 40 cm), se interrumpe para dar paso a un cuerpo de caliza oolítica del mismo color con estratificación gruesa (de 100 a 200 cm) y continúa con margas grises y escasas calizas arcillosas asociadas a paquetes de lutitas del mismo color.

Prosigue con mayor potencial una serie de margas y calizas arcillosas con escasos horizontes de lutitas, de color gris mate y con estratificación que varía de delgada a media (15 a 60 cm), con notoria abundancia de impresiones fosilíferas de exogyras diminutas de testa azul oscuro; de manera casi brusca, las margas anteriores ceden el paso a una unidad de estratificación delgada a laminar constituida por lutitas y calizas negras ampliamente bituminosas, que exhiben concreciones calcáreas de formas ovoides y discoideas, así como abundantes impresiones de Idoceras del Kimeridgiano.

El paso entre las margas grises y la serie bituminosa se considera como el contacto de la "caliza con cidaris" y los cuerpos del Grupo "Sabinal".

Formación San Isidro

Nombre Propuesto por López Ticha (1970), para designar una secuencia clástica que aflora sobre los ríos Ocotepéc, Tablas y San Isidro, entre los kilómetros 79 y 80 de la carretera Tlaxiaco-Pinotepa Nacional.

Está constituida por una alternancia rítmica de conglomerados con abundantes fragmentos de cuarzo, areniscas conglomeráticas, areniscas y limolitas; los estratos son gruesos a laminares y la coloración en general es rojiza; se observa además estratificación cruzada, gradada y laminaciones.

En el Cañón de Tonalá se reporta un espesor de 392 m y en Santa María Tindú 1,170 m de potencia. Se encuentra sobreyaciendo concordantemente a la Formación Jaltepetongo y subyace de forma concordante y transicional a la Formación Teposcolula. Su edad sólo se puede inferir por su posición estratigráfica debido a la ausencia de fauna; por encontrarse sobre la Formación Jaltepetongo de edad Hauteriviano y debajo de la Formación Teposcolula de edad Aptiano-Cenomaniano, se considera que la Formación San Isidro es de edad Barremiano-Aptiano. El depósito de esta unidad se realizó en un medio ambiente epicontinental, con invasiones marinas esporádicas, que caracterizan a un depósito tipo “molassa” transgresivo, producto de una fase tectónica post-orogénica.

Tronco de Zoquiapa

Se define informalmente como Tronco de Zoquiapa, a una serie de rocas ígneas intrusivas de composición ácida, que afloran en la región de Zoquiapa-Ihualtepec, Oaxaca, las cuales intrusionan a las formaciones Olinalá y Rosario sin afectar al Conglomerado Cualac, por lo que se le asigna una edad Jurásico Temprano. Aflora en Zoquiapa, El Partideño, Chepetlán, San Juan Ihualtepec y al oriente de San Miguel Ahuehuetitlán.

En muestra de mano, se trata de un granito de color blanco rosado, que intemperiza a verde amarillento, el cual tiene una textura fanerítica de grano grueso; al microscopio petrográfico se trata de un granito afectado ligeramente por cataclasis, en el que se observa una textura holocristalina, xenomórfica; contiene microclina, cuarzo y plagioclasas sódicas parcialmente trituradas.

En el poblado de Chepetlán, se observa que intrusiona el contacto entre las rocas metamórficas del Complejo Acatlán y las de la Formación Olinalá; en El Partideño se observa que afecta a la Formación Rosario, no así al Conglomerado Cualac. Por las relaciones estratigráficas observadas, se concluye que estas rocas se emplazaron durante el Toarciano (Jurásico Temprano).

Estas rocas están relacionadas con el sistema de horst y graben, que prevaleció en México durante la fase tafrogénica de la Orogenia Palizada, ocurrida durante el Triásico-Jurásico Medio, así como también íntimamente relacionada con la apertura del Golfo de México.

Rocas Volcánicas

Se designa con este nombre a una secuencia de rocas volcánicas, constituidas por tobas areno-limosas de color rojizo, en pseudoestratos delgados y medianos; aglomerados en pseudoestratos masivos y andesitas de aspecto nodular y esporádicamente intercalaciones de tobas bentoníticas. En los alrededores de Tlaxiaco, en la porción central norte del área, se pueden observar numerosos afloramientos de rocas volcánicas de composición andesítica.

Esta unidad se encuentra constituida por una secuencia de tobas areno-limosas, de color rojizo y verde, en pseudoestratos delgados y medianos; aglomerados masivos de fragmentos del tamaño de bloques.

Esta unidad sobreyace discordantemente a la Formación Huajuapán de León y puede sobreyacer a unidades más antiguas. De acuerdo con la posición estratigráfica que guarda con respecto a la Formación Huajuapán de León y al evento volcánico que le dio origen, se considera que esta Unidad es de Edad Plioceno; es correlacionable en tiempo con el complejo piroclástico Llano de Lobos, Cerro Verde y Andesita Yucudá de esta misma región. Esta unidad es el producto de un evento volcánico, durante una etapa postectónica, correlacionable en el tiempo y en el espacio con la Revolución Cascadiana.

Sistema Cuaternario

Los depósitos fluviales se observan principalmente a lo largo de los cauces de los ríos perennes del área. En la porción norte se destaca el valle de Tlaxiaco, en que se puede observar un buen afloramiento de aluvión, el cual sin embargo, tiene poco espesor.

Los sedimentos fluviales están constituidos por conglomerados sin consolidar, cuyos componentes son fragmentos de cuarzo, rocas volcánicas, tobas, rocas intrusivas y calizas; son subangulares a subredondeadas y normalmente se encuentran en una matriz arcillo-arenosa de la misma composición.

4.2. Geología estructural

Uno de los rasgos tectónicos más sobresalientes en la geología del sur de México son las fallas de basamento que limitan bloques corticales bien diferenciados, nombrados terrenos tectonoestratigráficos.

Los ejemplos de fallas de basamento estudiadas en México, nos permiten inferir que estas estructuras tienen como principal característica que dividen dominios con distinto estilo estructural. De éstas, las mejor estudiadas en el sur de México son: la falla de Oaxaca, la falla de Caltepec y la falla Chacalapa. En algunas partes de estas tres fallas está yuxtapuesta la zona de cizalla dúctil, formada a más de 15 km de profundidad, con fallas formadas cerca de la superficie bajo un régimen frágil.

Esto evidencia que la zona de cizalla sirvió como plano de debilidad en deformaciones posteriores permitiendo, en ciertas zonas, exhumar las partes profundas de la misma falla.

Uno de los mejores ejemplos de estructuras mayores con reactivaciones múltiples en esta región del país es justamente la falla de Caltepec. Esta falla es elemento fundamental en la conformación estructural del sur de México y tema central. Separa a los terrenos Zapoteco al oriente y Mixteco al poniente al nivel de sus basamentos metamórficos (complejos Oaxaqueño y Acatlán).

Los excelentes afloramientos (área de Caltepec) que exponen completamente el contacto en una anchura variable entre 2 y 6 km revelan una actividad tectonomagmática y metamórfica del Pérmico Temprano relacionada con la yuxtaposición de los complejos cristalinos durante la consolidación de Pangea y registran también períodos múltiples de reactivación mesozoicos, cenozoicos y probablemente hasta Recientes.

En la Zona de Juxtlahuaca, las unidades mencionadas están fuertemente afectadas por deformaciones de varias intensidades y tipos, desde deformación metamórfica en facies de granulita en el Complejo Oaxaqueño, hasta fallas y pliegues en unidades Oligocénicas.

En el distrito de Tlaxiaco se han encontrado cuatro fallas o fracturas y terrenos de formación “anticlinal”. La falla de Nundichi corre de sureste a noroeste, en dirección de Tlaxiaco a Mariscala de Juárez.

La falla "Santa Cruz Tayata" casi paralela a la falla de Nundichi, va de sureste a noroeste, en dirección a Huajuapán de León y las otras dos fallas o fracturas se ubican al sur y oriente de Tlaxiaco posiblemente en el vergel y campo de aviación, están unidas en su parte inferior, formando una T invertida con ligera inclinación de suroeste a noreste.

Ahora bien es de suponerse que las fallas o fracturas han existido desde siempre, pero en especial la de Nundichi se cree pudo haberse formado con en el terremoto del 19 de julio de 1882 y que por cierto tiró la campana de la Iglesia de la Virgen de la Asunción, este fuerte sismo tuvo lugar a las 2:30 de la tarde con epicentro en la Ciudad de Huajuapán de León, donde casi destruyó la población. (98 años después hubo otro sismo de igual intensidad en este mismo lugar derribando varias casas de la ciudad Huajuapeña).

Varios cerros de la localidad tienen formaciones de tipo "anticlinal" como la cordillera de Tlaxiaco, nace al norte de esta población con rumbo a Mariscal de Juárez. Otros cerros aledaños tienen el mismo tipo de terreno.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica, así como de la geología superficial, recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible establecer que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, en los sedimentos fluviales de los subálveos de los ríos Mixteco, Tlaxiaco, Ñumi y otros ríos y arroyos intermontanos, de espesores reducidos, así como en las tobas, conglomerados polimícticos y formaciones arcillosas superiores.

Este es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente calizas, lutitas y areniscas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias fracturadas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de rocas metamórficas del complejo Oaxaqueño y el complejo Acatlán.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido en su porción superior por los sedimentos aluviales y fluviales depositados en los subálveos de los ríos y arroyos, así como en las tobas y conglomerados polimícticos. La granulometría de estos materiales varía de gravas a arcillas, conformando un acuífero de reducidas dimensiones y poca capacidad de almacenamiento. La porción inferior del acuífero está alojada en rocas sedimentarias calcáreas y terrígenas, que manifiestan permeabilidad secundaria por fracturamiento asociado al intemperismo.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se ejecutaron 3 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Características y resultados de las pruebas de bombeo

Localidad	Coordenadas UTM		Tipo de prueba	Duración (min)	K m/s	T m ² /s
	X	Y				
San Juan Mixtepec	624,450	1,913,765	Abatimiento	60	2.00×10^{-4}	1.07×10^{-3}
Tlaxiaco	642,423	1,907,666	Recuperación	45	2.28×10^{-4}	5.83×10^{-3}
San Juan Mixtepec	624,450	1,913,765	Recuperación	60	3.12×10^{-4}	9.53×10^{-4}

Los valores de transmisividad varían de **0.0058 a 0.00095 m²/s** (501.1 a 82.08 m²/día). El coeficiente de permeabilidad medio evaluado de las pruebas varía en el rango de **2×10^{-4} m/s a 3.1×10^{-4} m/s** (17.28 m/día a 26.78 m/día), que son valores típicos de permeabilidad de arenas finas a gruesas.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles de agua subterránea, se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en 2010.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

De acuerdo a la configuración de profundidad al nivel estático para el 2010, mostrada en la figura 3, se puede observar que las profundidades varían desde 0.5 hasta 2.0 m, aumentando gradualmente conforme se asciende topográficamente.

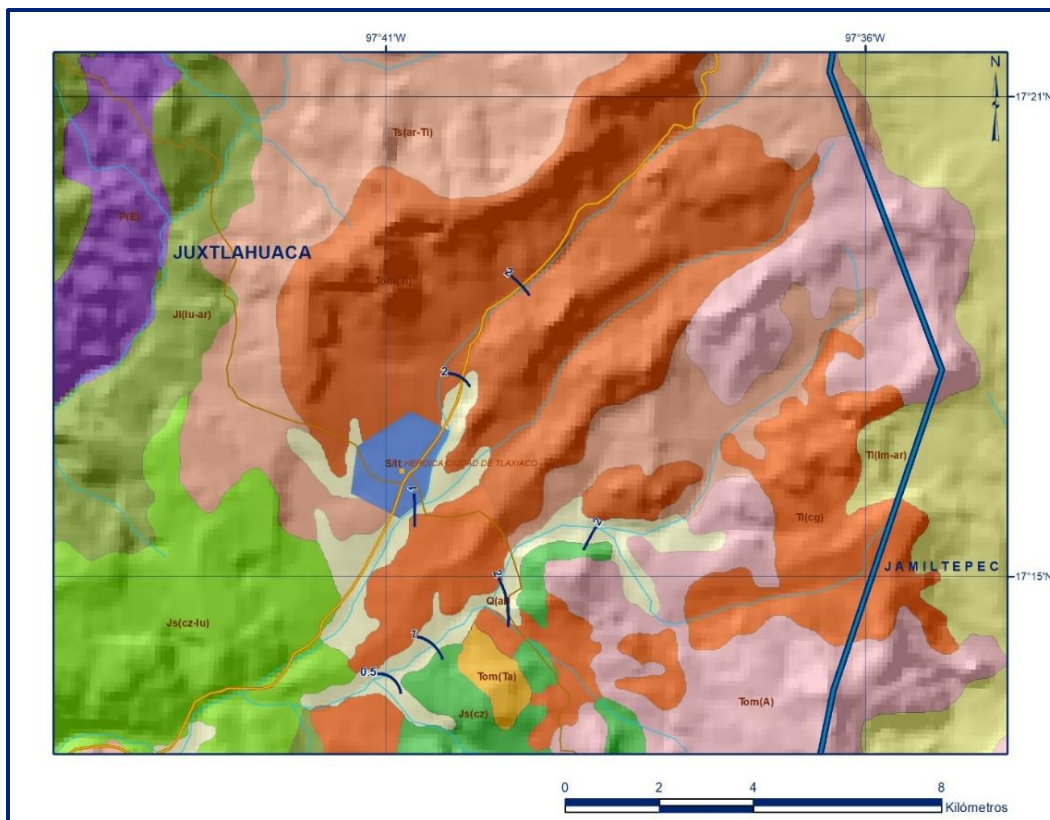


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

Debido a los niveles someros del agua subterránea, en el acuífero se presenta descarga natural por evapotranspiración. Los valores más someros se ubican en la parte más baja, hacia la comunidad de la Heroica Ciudad de Tlaxiaco.

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo a la configuración de elevación del nivel estático para 2010, mostrada en la figura 4, se puede observar que la carga hidráulica varía desde la equipotencial 2,130 msnm hasta la equipotencial 2,020 msnm, decreciendo gradualmente desde las zonas más altas, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y evidenciando la dirección preferencial del flujo subterráneo; las direcciones del flujo subterráneo son perpendiculares a las curvas de igual elevación.

La dirección predominante del flujo subterráneo es del noreste hacia el suroeste, desde la zona de recarga aguas arriba del río con el potencial hidráulico 2,130 hasta descargar a las corrientes aguas abajo del acuífero. El esquema de flujo subterráneo no presenta ninguna deformación notable o cono de abatimiento por la extracción de los aprovechamientos existentes, más bien, sigue las mismas direcciones de los escurrimientos superficiales.

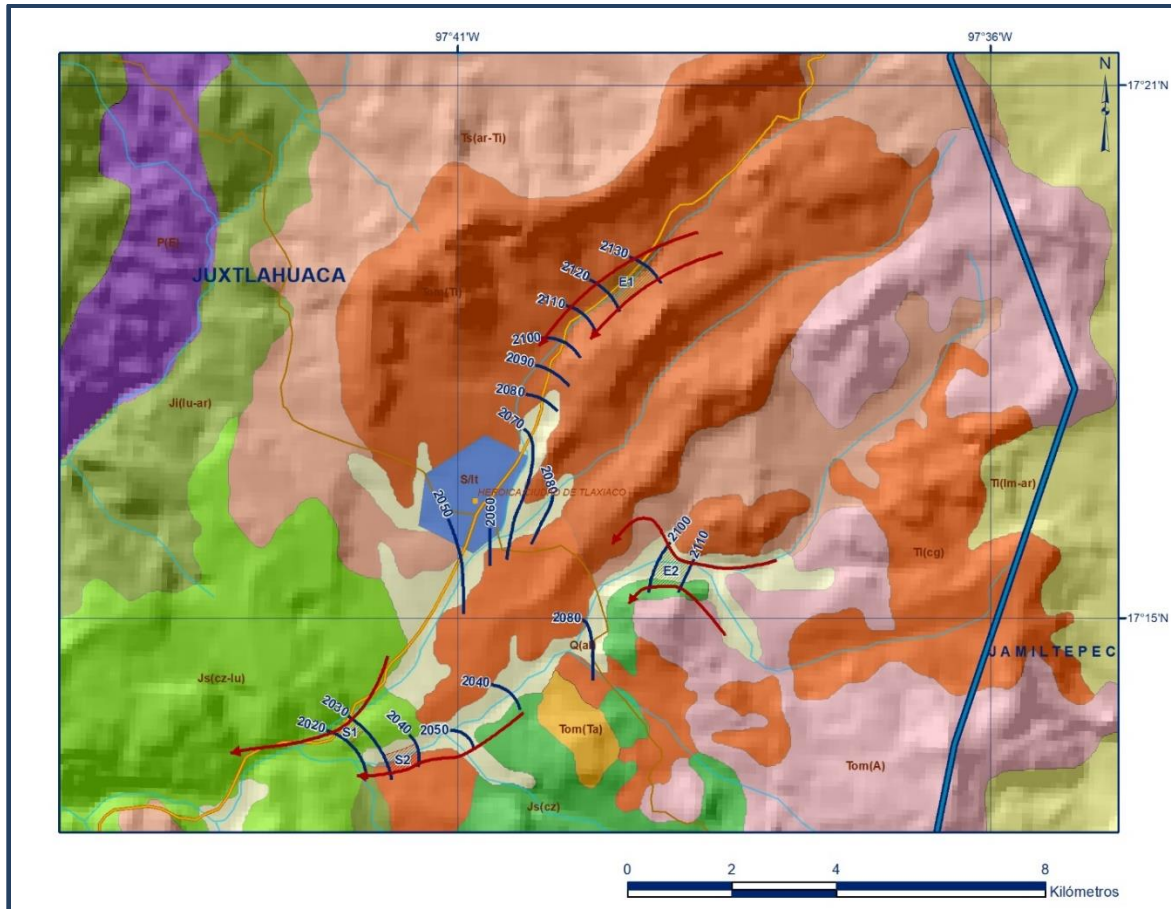


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Además, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2010, se tomaron 11 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, etc., para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece 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

La temperatura del agua medida directamente a la salida de las obras de captación varía entre 17.7° C y 23.3° C. El pH varía entre 6.85 y 7.79. Se midieron conductividades eléctricas del agua que varían entre 526 y 2,570 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que significa que se trata de agua subterráneas dulces de buena calidad. En cuanto a los sólidos totales disueltos (STD) varía en general entre 279 y 458 mg/L. Mediante los diagramas de Stiff, elaborados con las concentraciones en meq/L, se definió que el agua es de muy buena calidad y que es del tipo sódico-cálcico-bicarbonatada.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), predomina agua del grupo S1 con un riesgo de alcalinización del suelo bajo y del grupo C2 y C3, por lo que se puede decir que el riesgo de salinización del suelo es medio, todos corresponden a una conductividad eléctrica baja

Finalmente se puede concluir que el agua puede utilizarse en la zona, con pocas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable y, que son válidos con moderado grado de lavado de suelo. Se pueden cultivar plantas moderadamente tolerantes.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamiento realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 38 aprovechamientos, de los cuales 26 son norias, 5 son pozos y 7 manantiales; 32 se encuentran activos y 6 inactivos.

El volumen de extracción se ha estimado en **2.5 hm³ anuales**, de los cuales 0.698 hm³ (27.92%) se destinan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 0.003 hm³ (0.12%) para uso Agrícola, 0.018 hm³ (0.72%) para uso Doméstico, 0.479 hm³ (19.16%) para servicios, 0.01 hm³ (0.4%) para uso Industrial y los restantes 1.292 hm³ (51.68%) para usos múltiples.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2010 en un área **de 17.3 km²**, que es la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se encuentra 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 como sigue:

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

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

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (Rt) ocurre por dos procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos a lo largo de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo (Eh). De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso riego agrícola, del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri), que para este caso, dado que el volumen destinado para uso Público Urbano y Agrícola es pequeño, se considera que no existe recarga inducida.

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

$$R_v + E_h - ETR - D_{fb} - B - S_h = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv = Recarga vertical;

Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal;

ETR = Evapotranspiración;

Dfb = Caudal base;

B = Bombeo;

Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

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

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene lo siguiente:

$$R_v = ETR + D_{fb} + B + S_h - E_h \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

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

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 4.

Con base en esta configuración 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:

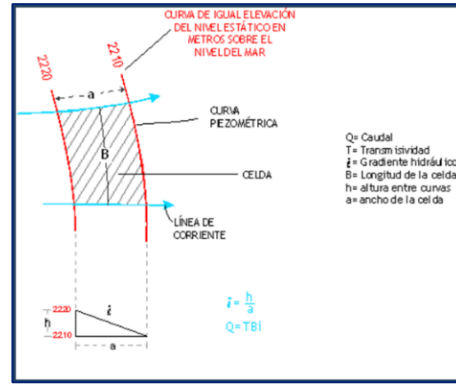
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B= Largo del canal de flujo (m);

i= Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$);

T= Transmisividad (m^2/s);



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda.

Tabla 3. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

Celda	B (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente hidráulico (i)	K (m/s)	b (m)	T (m^2/s)	Q (m^3/s)	V ($hm^3/año$)
E1	610	10	0.01099	0.0001	15	0.0015	0.01006	0.3
E2	580	10	0.01773	0.0001	15	0.0015	0.01543	0.5
TOTAL								0.8

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **0.8 $hm^3/año$** .

7.2. Salidas

Las descargas en el acuífero ocurren principalmente por evapotranspiración (ETR), bombeo (B), salidas por flujo subterráneo (Sh) hacia el mar y descargas por flujo Base de los ríos (Qb).

7.2.1. 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 del elevación del NE del año 2010, mostrada en la figura 4. Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación, hacia el mar. El valor estimado para este año de análisis se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Calculo de salidas subterráneas por flujo horizontal

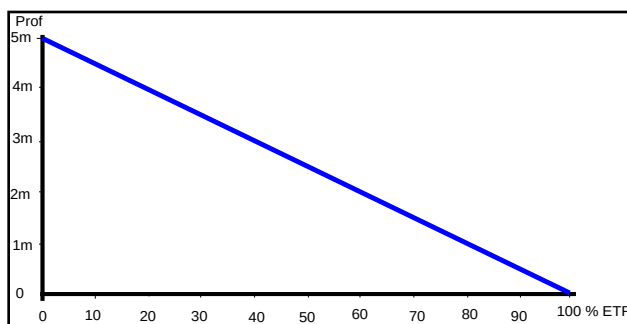
Celda	B (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente hidráulico (l)	K (m/s)	b (m)	T (m ² /s)	Q (m ³ /s)	V (hm ³ /año)
S1	390	10	0.02309	0.0001	20	0.002	0.0180102	0.6
S2	400	10	0.01684	0.0001	20	0.002	0.013472	0.4
TOTAL								1.0

El volumen total de las salidas subterráneas horizontales asciende a **1.0 hm³/año**.

7.2.2. Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración 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 resultó de 668.6 (mm).

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso:



En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.

El fenómeno tiene lugar en las áreas con niveles estáticos someros que para el caso se presentan en una extensión superficial aproximada de 8.6 km², en esas superficies los niveles freáticos oscilan a profundidades menores de 2 m por lo que se aplica un factor de incidencia del 60%. Por tanto aplicando los valores correspondientes, resulta que el volumen evapotranspirado es $ETR = 8.6 (0.6686) (0.6) = 3.5 \text{ hm}^3/\text{año}$. Por lo que el volumen evapotranspirado en las zonas con niveles freáticos someros asciende a **3.5 hm³/año**.

7.2.3. Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **2.5 hm³ anuales**.

7.2.4. Descargas por flujo base (Dfb)

Las descargas del acuífero durante el estiaje, a lo largo de los ríos que atraviesan el área de balance, se estimaron con base en el análisis y procesamiento de la información hidrológica superficial y subterránea, relativo a balances hidrológicos para un sistema abierto en condiciones naturales; volumen que resultó ser de **0.5 hm³/año**, el cual se descarga del acuífero en la temporada de estiaje.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, de acuerdo a la configuración, se presenta una evolución del nivel estático que asciende a 0.008 (hm³/ año) para el área de balance, por lo que la evolución es prácticamente cero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento. Por estas razones, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, **$\Delta V(S) = 0$** .

Solución de las ecuaciones 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:

$$\begin{aligned} Rv &= ETR + Dfb + B + Sh - Eh \pm \Delta V(S) & (2) \\ Rv &= 3.5 + 0.5 + 2.5 + 1.0 - 0.8 + 0.0 \\ Rv &= 6.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= E_h + R_v \\ R &= 0.8 + 6.7 \\ R &= 7.5 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
R = Recarga total media anual
DNC = Descarga natural comprometida
VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **7.5 hm³/año.332**

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **DNC = 3.3 hm³ anuales.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (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 **2,262,859 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 7.5 - 3.3 - 2.262859 \\ \text{DMA} &= 1.937141 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,937,141 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Pacífico Sur. 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de agua subterránea en acuíferos del estado de Oaxaca, acuífero Juxtlahuaca. Realizado por la Universidad Autónoma Chapingo.