CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Nochixtlán (2016), estado de Oaxaca

Ciudad de México, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1 Localización 2
1.2 Situación administrativa del acuífero 5
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 6
3. FISIOGRAFÍA 6
3.1 Provincias fisiográficas 6
3.2 Clima 8
3.3 Hidrografía 8
3.4 Geomorfología 9
4. GEOLOGÍA 10
4.1 Estratigrafía 13
4.2 Geología estructural 21
4.3 Geología del subsuelo 22
5. HIDROGEOLOGÍA 23
5.1 Tipo de acuífero 23
5.2 Parámetros hidráulicos 24
5.3 Piezometría 24
5.4 Comportamiento hidráulico 25
5.4.1. Profundidad al nivel estático 25
5.4.2. Elevación del nivel estático 26
5.4.3. Evolución del nivel estático 27
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 27
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 29
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 29
7.1 Entradas 29
7.1.1. Recarga vertical (Rv) 30
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 30
7.2 Salidas 31
7.2.1 Bombeo (B) 31
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 32
7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm) 32
7.2.4 Evapotranspiración (ETR) 32
7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S) 34
8. DISPONIBILIDAD 35
8.1 Recarga total media anual (R) 35
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 35
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 36
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA) 36
9. BIBLIOGRAFÍA 38

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 Nochixtlán, definido con la clave 2016 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-oriental del estado de Oaxaca, entre los paralelos17°05'33" y 17°36'54"de latitud norte, y entre los meridianos 96°57'18" y 97°26'36" de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1,353 km^2.

Limita al norte y este con el acuífero Cuicatlán; al noroeste con Tamazulapan; al sur-suroeste con el acuífero Jamiltepec y al sureste con el acuífero Valles Centrales, todos ellos pertenecientes al estado de Oaxaca (Figura 1).

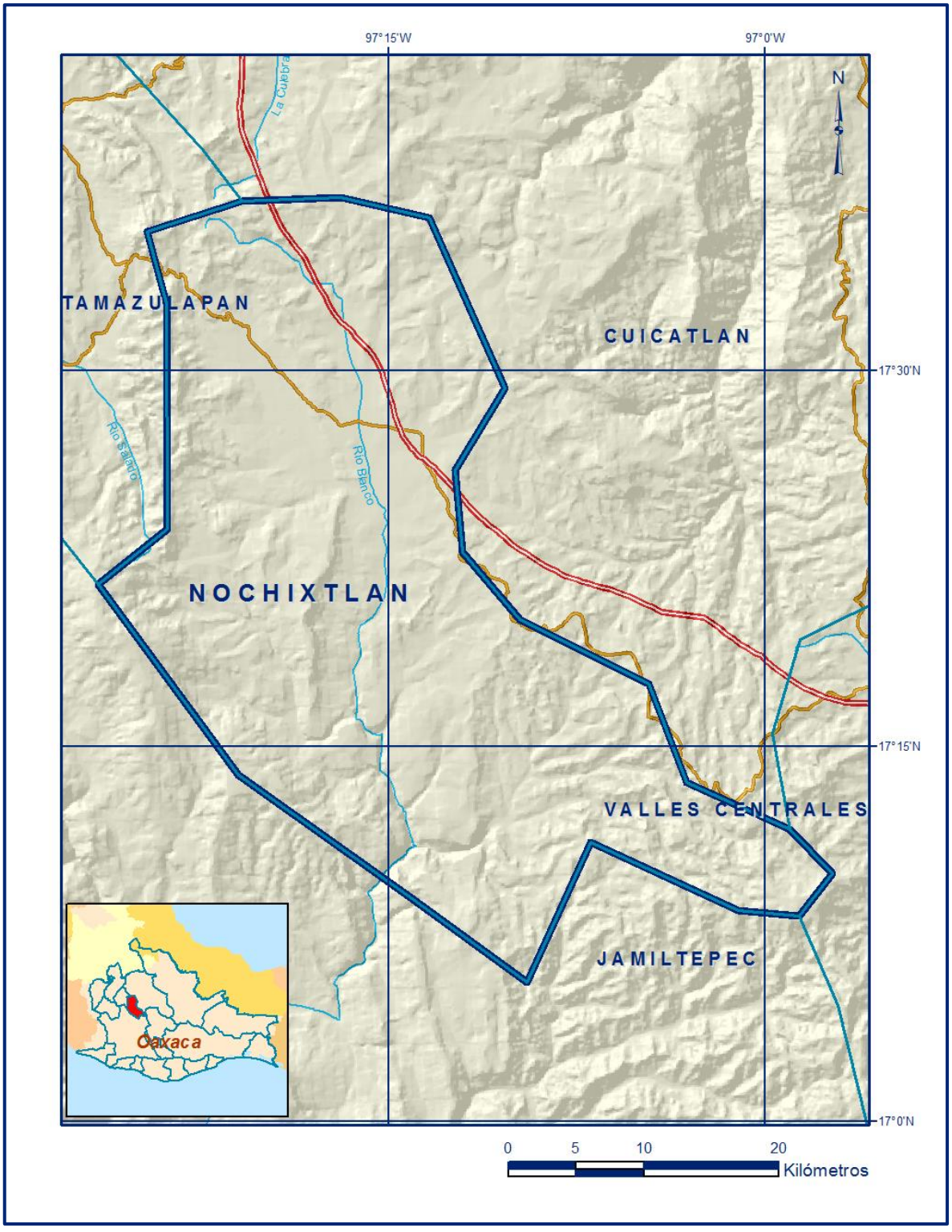


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, comprende completamente los municipios Santo Domingo Yanhuitlán, San Juan Yucuita, San Andrés Sinaxtla, San Pedro Topiltepec, Santiago Tillo, San Juan Sayuitepec, San Francisco Chindua, San Mateo Etlatongo, Magdalena

Zahuatlán, Santo Domingo Tlatayapam, San Miguel Tecomatlán, San Francisco Nuxaño, San Francisco Jaltepetongo y Santa Inés de Zaragoza: de manera parcial los municipios Asunción Nochixtlán, San Bartolo Soyaltepec, Santo Domingo Tonaltepec, Santa María Chachopam, Santiago Nejapilla, Magdalena Yodocono de Porfirio Díaz, Magdalena Jaltepec, San Pedro Tida, Santiago Tilantongo, San Andrés Nuxiño, San Juan Tamazola, y Santo Domingo Nuxa; así como pequeñas porciones de San Pedro y San Pablo Teposcolula , San Juan Diuxi, San Pedro Coxcaltepec, San Juan Teposcolula, San Vicente Nuñu, Santa María Peñoles, Santiago Suchilquitongo, San Andres Zautla y Santo Tomás Mazaltepec

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 que delimitan el acuífero

ACUIFERO 2016 NOCHIXTLAN						
VERTICE	**LONGITUD OESTE**			**LATITUD NORTE**		
	GRADOS	**MINUTOS**	**SEGUNDOS**	**GRADOS**	**MINUTOS**	**SEGUNDOS**
1	96	58	36.7	17	8	13.6
2	97	1	4.1	17	8	27.8
3	97	6	56.0	17	11	9.5
4	97	9	29.1	17	5	34.7
5	97	14	14.4	17	9	2.2
6	97	21	0.0	17	13	52.3
7	97	26	35.4	17	21	27.5
8	97	23	48.7	17	23	40.0
9	97	23	51.7	17	32	41.5
10	97	24	37.8	17	35	34.1
11	97	20	49.7	17	36	47.0
12	97	16	54.4	17	36	55.4
13	97	13	22.4	17	36	6.8
14	97	10	20.9	17	29	19.2
15	97	12	21.4	17	26	1.3
16	97	12	3.0	17	22	44.7
17	97	9	46.9	17	20	3.5
18	97	4	37.0	17	17	30.8
19	97	3	7.4	17	13	33.3
20	96	58	59.7	17	11	41.3
21	96	57	17.8	17	9	56.3
1	96	58	36.7	17	8	13.6

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Pacífico Sur y al Consejo de Cuenca Costa de Oaxaca, instalado el 7 de abril de 1999. Su territorio se encuentra parcialmente vedado. En pequeñas áreas de los extremos norte y este rige el *"Decreto que declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Acuacultura Número Dos Cuenca del Papaloapan para preservar, fomentar y explotar las especies acuáticas, animales y vegetales, así como para facilitar la producción de sales y minerales"*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF), el 6 de agosto de 1973; esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En otra pequeña área de la región suroriental está vigente el "*Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida como Valle de Oaxaca, cuya extensión y limites geopolíticos comprenden los ex distritos de Etla, Centro, Tlacolula, Zimatlán y Ocotlán, Oax.,*" publicado en el DOF, el 25 de septiembre de 1967; esta veda es de tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En la mayor parte de su territorio no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Nochixtlán, clave 2016, se encuentra sujeta a las disposiciones del "*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican"*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de

disponibilidad 3. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional. A continuación, se describen los más importantes:

PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA ZONA DE NOCHIXTLÁN, ESTADO DE OAXACA. Elaborado en 1992 por Sistemas Hidráulicos y Ambientales S. A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua. Este estudio tuvo como objetivo determinar las condiciones geológicas que gobiernan la ocurrencia, distribución y cantidad del agua subterránea, definir el modelo hidrogeológico y evaluar de manera preliminar el potencial de las diferentes unidades hidrogeológicas, para identificar zonas favorables para la exploración y/o explotación. Sus actividades de campo más importantes fueron el censo de aprovechamientos e hidrometría de las extracciones, piezometría, ejecución de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y muestro de aguas subterráneas para análisis fisicoquímicos. Concluye que la recarga media anual era del orden de 50 hm^3 anuales.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUÍFEROS TEHUATEPEC, RÍO OSTUTA, NOCHIXTLÁN Y HUATULCO DEL ESTADO DE OAXACA Y CUAJINICUILAPA DEL ESTADO DE GUERRERO. Realizado en 2002 por COPEI, Ingeniería, S.A. de C.V, para la Comisión Nacional del Agua. Recaba información piezométrica y realiza configuraciones del nivel estático para analizar y describir su comportamiento.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO NOCHIXTLÁN, OAXACA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Sur, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincias fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, Subprovincia Tierras Altas de Oaxaca (Raisz E., 1964). Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI

(1989), se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, la porción norte y centro en la Subprovincia Mixteca Alta y la región sur y suroriental en la Subprovincia Sierras Centrales de Oaxaca.

La Provincia Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja, se encuentra constituida por una serie de montañas y sierras que presentan grandes desniveles considerables. Su representación dentro del área estudiada se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte meridional, lugar en donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2,500 msnm. Es una cadena montañosa localizada en el sur de México que se extiende a lo largo de 1200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Está orientada de manera paralela a la costa del océano Pacífico y a la porción occidental del Eje Neovolcánico, del que es separada por la Depresión del Balsas. Es la provincia de mayor complejidad geológica, debido a la presencia de rocas sedimentarias, ígneas y la mayor abundancia de rocas metamórficas del país. El choque de las placas tectónicas de Cocos y Norteamericana, provocó el levantamiento de esta sierra y determina en gran parte su complejidad.

La Subprovincia Mixteca Alta tiene una geología muy compleja y se extiende en dirección norte-sur, penetrando en territorio del estado de Puebla; comprende 6.97% del territorio del estado de Oaxaca. Limita al norte con las subprovincias Sur de Puebla y Sierras Centrales de Oaxaca, con ésta misma por el oriente, al sur y oeste con la Cordillera Costera del Sur. Su territorio está clasificado en los siguientes sistemas de topoformas: sierra alta compleja, que cubre la mayor superficie, sierra baja compleja con cañadas, sierra baja compleja, sierra baja, sierra de cumbres tendidas, lomerío con cañadas, lomeríos, valle de laderas tendidas con lomeríos, valle intermontano con lomeríos, valle de laderas escarpadas con lomeríos y meseta de aluvión antiguo.

La Subprovincia Sierras Centrales de Oaxaca es una región más o menos paralela a la mitad norte de la Subprovincia Sierras Orientales; inicia desde Tehuacán, Puebla, y finaliza hasta la sierra situada al oeste de la ciudad de Oaxaca. Su porción norte, dentro del estado de Puebla, es conocida como sierra de Zapotitlán, donde predominan las rocas calizas del Cretácico, que originan cumbres elevadas a más de 2,000 msnm. En el sur contiene afloramientos de rocas metamórficas, con abundancia de gneis al oeste de la ciudad capital, donde las laderas son escarpadas.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante es templado subhúmedo, con las variantes C(w0) y C(w1) con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frio entre -3 y 18°C y temperatura del mes más cálido menor de 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual. En el extremo nororiental el clima es BS1kw semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frio entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. En la zona sur el clima es (A)C(w1) semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frio menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. Ambos con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 6 estaciones climatológicas localizadas en la superficie del acuífero, que contienen registros para diferentes periodos: Campo Agrícola Experimental Yanhuitlán, Santa María Tiltepec, Santa María Nochixtlán, Etlatongo, Yocodono y Jaltepec. Con estos datos, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **580.6 mm, 15.3 °C y 1,584mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se ubica en la Región Hidrológica (RH) RH-20 “Costa Chica de Guerrero”, Subregión Hidrológica “Río Verde”, cuenca del Río Atoyac o Verde, drenada por el río del mismo nombre, que vierte su caudal en el Océano Pacífico; Subcuenca del Río Sordo. Es en la parte alta de la cuenca donde se origina el Río Cuanana, uno de los principales afluentes del Rio Atoyac; en Ixtayutla recibe las aportaciones del Río Yolotepec y de sus numerosos afluentes. En este punto el río cambia de dirección hacia el sur, abriéndose paso en la Sierra Madre del Sur a través de un cañón muy estrecho, para posteriormente desembocar al Océano Pacifico.

El Río Atoyac es el dren principal del acuífero. Nace en la Sierra de Sedas con el nombre de Río Etla, a una elevación de 2,000 msnm; en su primer tramo escurre con una dirección general hacia el sureste hasta la ciudad de Oaxaca, continuando en dirección noroeste-sureste a través del valle de Etla, en donde recibe las aportaciones de gran cantidad de arroyos de tipo intermitente. En el valle de

Zimatlán entra en su extremo norte, con una dirección de escurrimiento norte-sur; aproximadamente a unos 5 km aguas debajo de la Ciudad de Oaxaca, a la altura del poblado San Agustín de Las Juntas, recibe por la margen izquierda las aguas del Río Salado, unos de sus principales afluentes y colector más importante del Valle de Tlacolula. Continúa hacia el sur con el nombre de Río Atoyac, recibiendo varios tributarios provenientes de las sierras que flanquean el valle, pasa por Zimatlán de Álvarez y continúa hasta la altura de Santa Gertrudis, donde confluye por su margen izquierda el Río Ocotlán. En este punto cambia su dirección de escurrimiento hacia el suroeste y pasa por Santa Ana Tlapacoyan donde se le unen las aguas del Río La Asunción o San Bernardo. Después continúa hacia el sur-suroeste por 15 km más, pasando por Santa María Ayoquezco de Aldama y San Andrés Zabache para salir del Valle de Zimatlán por su extremo sur e ingresar en el acuífero Río Verde-Ejutla; finalmente se une al Río Verde y desemboca en el Océano Pacífico. Desde su nacimiento hasta su confluencia con el Río Salado, el Río Etla es intermitente. En el valle de Zimatlán el río Atoyac se comporta, en algunos tramos, como tipo perenne

La red de drenaje es de tipo dendrítico en las partes topográficamente más altas y dendrítico denso en los afloramientos de rocas metamórficas. En las zonas bajas y flancos de las sierras el drenaje es subparalelo a paralelo.

3.4 Geomorfología

La característica geomorfológica predominante en la zona es el contraste del relieve por el cambio abrupto de pendiente entre las sierras y los valles intermontanos de relieve muy suave, debido a la resistencia a la erosión de las rocas ígneas intrusivas y metamórficas de la sierra, comparadas con los suelos y materiales de relleno que forman los valles. Contrasta también la etapa geomorfológica de madurez que presentan las sierras que ocupan la mayor superficie del área, que no han alcanzado un nivel base de erosión, con la etapa de juventud avanzada que presentan los valles. Se identifican las siguientes unidades geomorfológicas principales.

Sierras altas con altura hasta de 2,900 msnm, que se localizan al oeste, suroeste y norte-centro de la región, de forma alargada y un tanto angostas, de pendientes moderadas a fuertes y con escarpes verticales hasta de 100 m de altura; por efecto de fallas o fracturas en ocasiones se manifiestan como lomas largas de pendiente suave que cambian bruscamente, como se observa hacia las rancherías El Venado y Diuxi, al sur de Magdalena Jaltepec, San Pedro Cántaros y noreste de Santa

Catarina. Corresponden a rocas sedimentarias cretácicas, que forman anticlinales y sinclinales con trend estructural noroeste-sureste, causados por los esfuerzos compresionales de la Orogenia Laramide. También se incluyen sierras con altura hasta de 2,600 msnm que corresponden a los derrames lávicos del Terciario Superior, que se localizan en la porción central de la zona. Sus formas son un tanto alargadas, de pendiente fuerte a moderada y de aspecto semi-redondeado, también presentan escarpes pronunciados hasta de 50 m que corresponden al frente de emisión o fallas. Otros aspectos que tiene estas rocas es de cerros aislados de forma redondeada de pendiente moderada con alturas de 2,300 msnm, que tienen estructuras intrusivas de tipo dique, lacolitos y mantos, como los que se observan al sur del poblado Magdalena Jaltepec y norte de Yodocono; cuyo origen se debe a derrames de fisura o fracturamiento.

Otras sierras de mediana altura con elevaciones hasta de 2,300 msnm, que corresponden a las rocas precámbricas del Complejo Oaxaqueño, se presentan en la porción suroriental de la región; son de forma redondeada con pendiente moderada a fuerte, están fuertemente disectadas, como se observa en el río San Antonio, en la proximidad del poblado Zaragoza y a lo largo de la carretera internacional en el tramo Nochixtlán-Oaxaca. Otros rasgos son las series de lomeríos amplios de mediana altura, pendiente suave a moderada que ocasionalmente presentan pequeños escarpes causados por basculamientos propios de las rocas que los constituyen; en estos se agrupan los depósitos sedimentarios y vulcanosedimentarios de las formaciones del Terciario Inferior de origen continental. En las áreas donde su espesor es reducido adoptan las geoformas de las rocas que sobreyacen.

El último rasgo corresponde a los depósitos recientes, producto del intemperismo y la erosión de las rocas preexistentes, forman valles irregulares angostos y amplios de pendientes suaves, que se presentan como “brazos” de 10 a 15 km de largo, que se unen al valle central de Nochixtlán, el cual corresponde a un valle intermontano de gran amplitud rodeado de altas montañas, que tiene un dren de salida hacia el sur.

4. GEOLOGÍA

La región en la que se ubica el acuífero, al igual que toda la porción sur de México, presenta una geología compleja debido a que en ella confluyen 3 elementos

tectónicos amalgamados en diferentes momentos geológicos, que son los Terrenos Tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1983) Mixteco, Oaxaca y Maya (Figura 2)

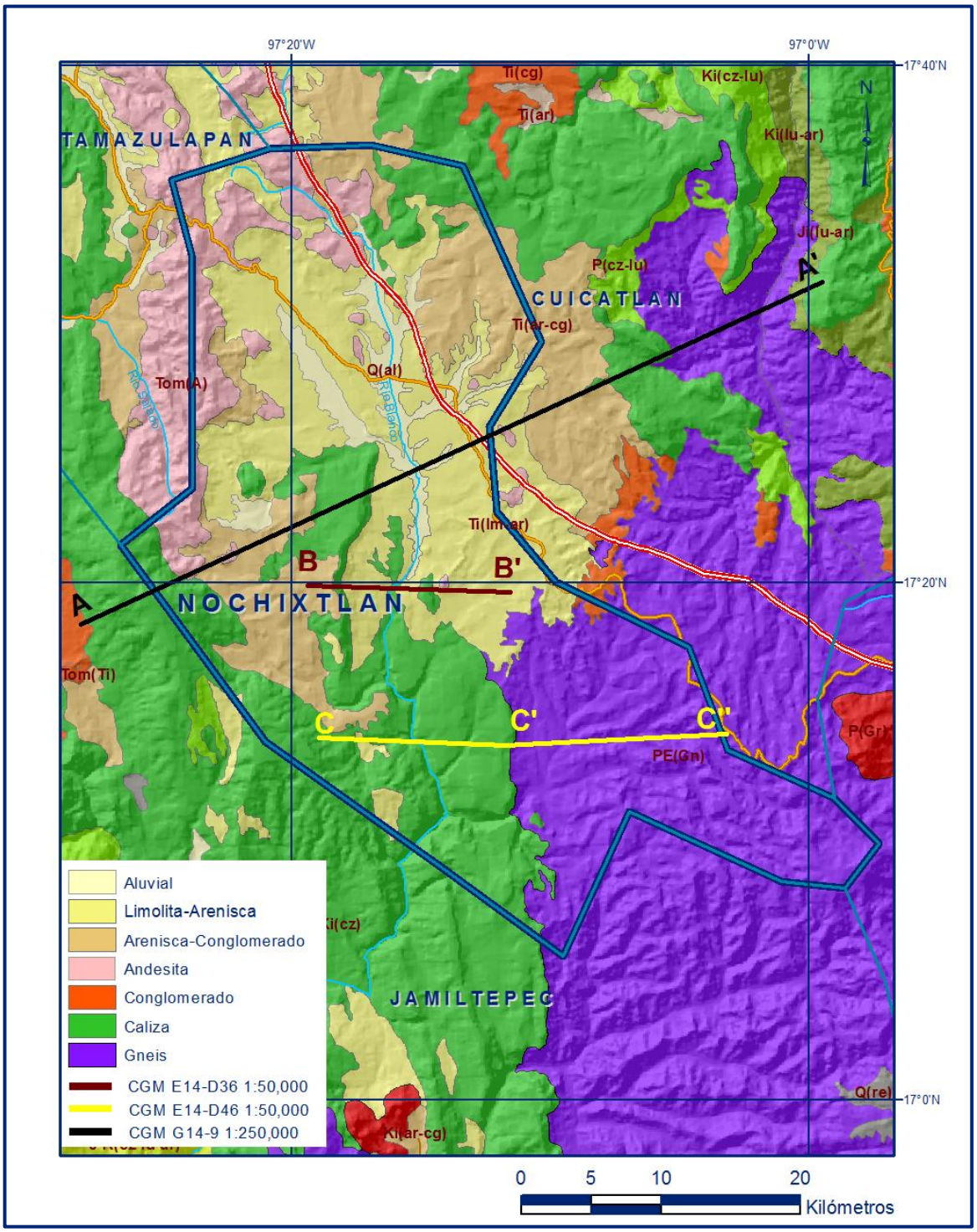


Figura 2. Geología general del acuífero

El Terreno Mixteco aflora en la región occidental del área, su basamento fue definido por Ortega- Gutiérrez (1978) como Complejo Acatlán de edad Cámbrico Superior al Ordovícico y lo subdivide en los Subgrupos Petlalcingo y Acateco, que constan de esquistos psamíticos y pelíticos, migmatitas, metaconglomerados y metacalizas. Su cobertura exclusiva está compuesta de conglomerados, areniscas, calizas y lutitas de la Formación Olinalá del Carbonífero-Pérmico. Discordante a esta formación afloran areniscas, lutitas y conglomerados que comprenden a las formaciones Rosario y Cualác indiferenciadas del Jurásico Inferior, que son cubiertas por una secuencia de areniscas y lutitas que conforman el Grupo Tecocoyunca del Jurásico Medio que subyace a calizas, lutitas, limolitas y tobas andesíticas que conforman las formaciones Chimeco, Sabinal y una unidad indiferenciada del Jurásico Superior. Durante el Neocomiano-Aptiano se deposita una secuencia de calizas y lutitas de la Formación Tlaxiaco, la cual es cubierta en el Albiano por yesos y dolomías de la Formación San Juan Taita, marcando el inicio de una plataforma carbonatada que evoluciona hasta el Cenomaniano y está representada por calizas de la Formación Teposcolula que a su vez es sobreyacida por margas y limolitas de la Formación Tilantongo del Turoniano-Maestrichtiano.

El Terreno Oaxaca se ubica en la porción central de la zona, limitado al poniente tectónicamente por el Terreno Mixteco y al oriente por el Terreno Maya, su basamento está constituido por el Complejo Oaxaqueño compuesto de charnoquitas, ortogneis, paragneis, gneis sienítico, gneis anortosítico, nelsonitas, migmatitas y mármoles, Ortega-Gutiérrez (1984). El grado de metamorfismo de este complejo corresponde a facies de granulita, con edades que varían de 1,000 a 1,200 Ma (Anderson y Silver, 1971). La cobertura propia del Complejo Oaxaqueño comprende calizas, lutitas y areniscas de la Formación Tiñú del Cámbrico-Ordovícico Inferior, sobre la cual descansa de manera discordante una secuencia de lutitas, areniscas y calizas de las formaciones Ixtaltepec (Mississípico-Pérmico) y Santiago (Pensilvánico-Pérmico); a estas unidades le sobreyacen conglomerados rojos de la Formación Yododeñe del Pérmico-Triásico. Sobreyace discordantemente una secuencia de lechos rojos de la Formación Todos Santos del Jurásico Medio, sobre la cual descansan discordantemente las areniscas y lutitas con lentes calcáreos de la Formación Jaltepetongo del Neocomiano-Aptiano, a la que le sobreyace concordantemente las calizas con bandas de pedernal negro de la Formación Yushe del Albiano-Cenomaniano. El Cretácico Superior comprende calizas y lutitas de la Formación Yucunama.

El Terreno Maya se localiza al centro-oriente de la zona; limitado al poniente tectónicamente por el Terreno Oaxaca. Su basamento está constituido por el complejo metamórfico Sierra de Juárez que comprende rocas metamórficas en facies de esquistos verdes, como son esquistos de cuarzo-muscovita, esquistos de cuarzo-biotita, esquistos de actinolita-tremolita, así como meta-areniscas, metaconglomerados y metacalizas. La edad de esta unidad es aún discutible ya que existen determinaciones radiométricas del Carbonífero-Pérmico, aunque también existen algunas edades mesozoicas. En función de que está afectado parcialmente por un granito-granodiorita de supuesta edad pérmica, se asume una edad Carbonífero-Pérmico para el complejo metamórfico. El Complejo MiloníticoAloapan compuesto de rocas de metamorfismo cataclástico de cizalla consta de protomilonitas, milonitas, ultramilonitas y cataclastitas. Estas rocas están compuestas al menos de cinco protolitos que son: gneis cuarzo-feldespáticos, rocas graníticas, rocas básicas, ultrabásicas y esquistos. La cobertura comprende los lechos rojos de la Formación Todos Santos del Jurásico Medio.

Algunas unidades de la cubierta terciaria son compartidas por los tres terrenos, como son el Conglomerado Polimíctico y areniscas de edad Paleoceno-eoceno, sobre la que descansa una unidad de tobas andesíticas y andesitas de edad Eoceno-Mioceno. Afectando a la mayoría de las unidades, aflora un intrusivo granodiorítico del Oligoceno. También del Mioceno en la cuenca de Oaxaca se tiene una secuencia de calizas lacustres y limolitas que contienen un cuerpo de ignimbritas (Toba Etla) de color verde de la Formación Suchilquitongo. Existen también algunas zonas con aluvión cuaternario (Carta Geológico-Minera Oaxaca E14-9. Escala 1:250,000. SGM, 2000).

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en la región comprende un registro cuya edad varía del Precámbrico al Reciente y está conformado por rocas metamórficas, ígneas, sedimentarias y depósitos aluviales. En la región están presentes diferentes terrenos tectonoestratigráficos, que se clasifican de acuerdo con sus basamentos. La cubierta incluye rocas volcánicas y sedimentarias probablemente deformadas durante el Jurásico o el Cretácico, calizas del Cretácico Inferior y conglomerados del Cretácico Inferior-Cretácico Superior, así como rocas volcánicas continentales del Paleógeno y Neógeno.

TERRENO OAXACA

PRECÁMBRICO

El Terreno Oaxaca consta de un basamento cristalino conocido como **Complejo Oaxaqueño** (Fries, 1962), conformado por ortogneises cuarzo feldespáticos, paragneises con grafito y mármoles de tipo cipolino, anfibolitas, intrusivos de charnokitas, anortositas, pegmatitas y milonitas, características de una facies de granulita. Existen varias edades isotópicas, aunque variables confirman su edad Proterozoica. Aflora en la región central del estado de Oaxaca, desde el límite con el estado de Puebla hasta la cercanía de Pochutla, con dirección N-NW, definiendo una franja continua, parcialmente cubierta en algunos sitios. Está limitado hacia el occidente por rocas metagraníticas y esquistos del Complejo Acatlán, hacia el sur por gneises, migmatitas y esquistos correlacionables con el Complejo Xolapa, y en la parte meridional por un cuerpo milonitizado con estructura lineal, por la cobertura mesozoica y los terrenos volcánicos terciarios, que se encuentran ampliamente distribuidos en la zona.

PALEOZOICO

Formación Tiñú

Con este nombre Pantoja-Alor describe a una serie de clásticos marinos que consisten de caliza, lutita y limolita, de color gris amarillento que descansan en discordancia angular sobre las rocas metamórficas del zócalo Precámbrico y le sobreyacen en discordancia angular rocas del Paleozoico Superior, Mesozoico y Terciario. Como localidad y sección tipo propuso el pequeño afloramiento de Tiñú localizado en el camino que conduce al poblado de Santa María Tiñú y de los miembros que la forman; además de dos secciones auxiliares que fueron medidas en el área de Santiago Ixtaltepec. Su edad corresponde al Cámbrico-Ordovícico Inferior.

Formación Santiago

Pantoja-Alor denomina Formación Santiago a una serie de clásticos de origen marino, que consiste de calizas, areniscas, limolitas y lutitas, que divide en dos miembros; el inferior de caliza que en la porción superior contiene intercalaciones delgadas de lutitas y margas, y el miembro superior de lutitas con intercalaciones de limolitas, areniscas y calizas; cuya localidad tipo es el área de Santiago Ixtaltepec, Sin embargo, las mejores exposiciones se localizan en los alrededores de Santiago y el Arroyo Las Pulgas, en donde se midió la sección tipo. Sobreyace en discordancia angular a los clásticos del miembro inferior de lutitas de la Formación Tiñú y cambia

transicionalmente a los clásticos sobreyacentesde la Formación Ixtaltepec. Por su contenido fósil se le asigna una edad del Mississípico

Formación Ixtaltepec

Nombre propuesto también por Pantoja-Alor para referirse a una secuencia de clásticos marinos con fauna del Pensilvánico, que consiste de lutitas, limolitas y areniscas con intercalaciones de lentes de calizas, cuyos mejores afloramientos se localizan al norte del poblado Santiago Ixtaltepec, en donde se midió la sección tipo con un espesor incompleto de 430 m. Descansa concordantemente sobre los clásticos de la Formación Santiago y le sobreyacen en ligera discordancia los conglomerados de la Formación Yododeñe

Formación Yododeñe

Con este nombre Pantoja-Alor describe a una gruesa secuencia de conglomerados de edad Pérmico, que presentan intercalaciones de areniscas y limolitas, cuya sección tipo es la parte superior del Arroyo Yododeñe, que se localiza inmediatamente al oriente de la ranchería del mismo nombre. Yace en ligera discordancia erosional sobre los clásticos de la Formación Ixtaltepec y es cubierta en pequeña discordancia angular por la Formación Teposcolula

JURÁSICO

Formación Todos Santos

Sobreyaciendo al Complejo Oaxaqueño en clara discordancia erosional, se encuentran los lechos rojos de la Formación Todos Santos, formada por areniscas y limolitas de estratificación delgada. Se considera que esta formación pertenece al Jurásico Medio. Se presenta en contacto con la Formación Jaltepetongo.

CRETÁCICO

Formación Jaltepetongo

Nombre propuesto por González-Alvarado (1970), para designar a una secuencia de lutitas apizarradas y areniscas calcáreas dispuestas en estratos delgados a laminares; posteriormente Cartagena- Hernández (1981) con base a estudios de campo, la sitúa en la parte media del Grupo Tlaxiaco. Se trata de una alternancia rítmica de mudstone a packstone arcilloso, en estratos delgados a gruesos, que alternan con lutitas calcáreas y conglomerados calcáreos; algunos estratos están dolomitizados, contiene micro-laminaciones, exfoliación laminar y en forma de paralelepípedos, estratificación cruzada y micropliegues. Su espesor reportado varía de 96 m en el

área del Cañón de Tonalá a 230 m en las cercanías de Yutatío. Por su posición estratigráfica pertenece al Hauteriviano.

Formación Yushé

Nombre informal propuesto inicialmente González Alvarado (1970) para referirse a una secuencia de micritas puras con abundantes horizontes de pedernal negro y estratificación laminar; diferenciando a esta unidad como facies de cuenca, a la Formación Ocotlán como facies arrecifal y a la Formación Teposcolula como de facies de plataforma. Estas tres formaciones son contemporáneas, con la diferencia de que la facies Yushé y Ocotlán corresponden a depósitos de mares más profundos y arrecifal respectivamente, en tanto que la Formación Teposcolula es de plataforma somera. Su edad es Cretácico Medio-Superior (Albiano-Turoniano). Está constituida por calizas de color gris a café claro, con microfauna planctónica, abundantes nódulos y lentes de pedernal negro y ámbar, así como numerosas vetillas rellenas de calcita. Se presenta en capas delgadas de 10 a 30 cm de espesor; ocasionalmente con intercalaciones arcillosas

Formación Yucunama

Ferrusquía I. (1970) propine el nombre para designar a las calizas margosas color crema amarillento que ocupan el sinclinal que separa los dos anclinales del Macizo Central. Tanto en el límite inferior como en el superior son discordantes y ambos afloran en el área. Su espesor es del orden de 300 a 400 m. Su localidad tipo es el pueblo de San Pedro Yucunama, situado cerca del margen occidental del sinclinal.

PALEOZOICO

TERRENO MIXTECO

Complejo Acatlán

Está formado por una secuencia plegada y afectada por metamorfismo regional, la cual ha sido estudiada por varios autores (Ordóñez, 1906; Jenny, 1933; Salas, 1949; Fries, 1960; Rodríguez-Torres, 1970), esta secuencia fue formalmente definida por Ortega-Gutiérrez (1978), quien la propuso como unidad litoestratigráfica equivalente a grupo, el cual incluye cinco formaciones estratiformes (Magdalena, Chazumba, Cosoltepec, Xayacatlán y Tecomate) y tres intrusivos (Granitoides Esperanza, Tronco de Totoltepec y Diques San Miguel). Estas formaciones representan una secuencia constituida por migmatita, esquisto pelítico, cuarcita, anfibolita, eclogita, roca verde, metagabro, serpentinita, metagrauvaca, meta-arcosa y metaconglomerado, cuya litología premetamórfica corresponde a depósitos típicos de arco insular y cuenca

oceánica marginal. Las rocas intrusivas afectaron a los sedimentos durante su evolución quedando en parte también metamorfoseadas.

Formación Olinalá

Definida formalmente por Flores de Dios y Buitrón (1982), para referirse a una sucesión sedimentaria continua, en cuya base se encuentra un conglomerado polimíctico que pasa transicionalmente a limolita, la cual se intercala con areniscas. Sobreyacen a estos depósitos rocas carbonatadas que a su vez cambian transicionalmente a rocas clásticas finas, limitadas por el complejo Acatlán. Su localidad tipo se encuentra en la cañada Los Arcos ubicada a 2.5 km al sureste de Olinalá (Corona-Esquivel, 1981). Se correlaciona en tiempo con las formaciones Matzitzi e Ixtaltepec de esta misma región.

Formación Cualác

Descrita por Guzmán (1950) con el nombre de Cuarcita Cualác. Posteriormente, Erben (1956) la designó Conglomerado Cualác. Su localidad tipo se localiza en las cercanías del poblado Cualác, estado de Guerrero, en donde dicha formación aflora de una manera excelente. Esta unidad tiene un espesor máximo de unos 500 m, está constituida como un conglomerado de matriz cuarcítica, compuesto principalmente de guijarros de cuarzo blanco lechoso en la base y en menor cantidad está representada por guijarros de mica-esquisto, gneis e ignimbrita; en algunos niveles se intercalan estratos delgados de limolita y arenisca de grano fino. Aunque carece de fósiles, su edad Jurásico Medio se asignó por su posición estratigráfica bajo las capas con amonitas del grupo Tecocoyunca que la sobreyacen transicionalmente.

Grupo Tecocoyunca.

Burckhardt (1927), describió por vez primera los estratos del Jurásico Medio en los alrededores de Tecocoyunca, pero Jenny (1933) distingue posteriormente dos unidades: superior e inferior. Más tarde Guzmán (1950) las nombra “Capas Tecocoyunca” y también las separa en inferior y superior. Finalmente, Erben (1956), las eleva de rango denominándolas como las conocemos en la actualidad, dividiéndolo en 5 formaciones: Zorrillo, Taberna, Simón, Otatera y Yucuñuti; propone como localidad tipo a la barranca Tecocoyunca, localizada entre los poblados de Cualác y Huamuxtitlán, Guerrero.

El Grupo Tecocoyunca tiene un espesor de más de 250 m y se constituye de una secuencia de estratos que en su porción inferior es de origen continental, mientras que en la parte media presenta intercalaciones marinas; su porción superior se constituye de estratos completamente marinos. Litológicamente se trata de areniscas, limolitas y lutitas con concreciones calcáreo-hematíticas; en algunos niveles contiene mantos de carbón y en otros horizontes con coquinas. La parte superior de este grupo en el área de Olinalá está constituida por lutitas de color morado y frecuentes intercalaciones de yeso. En el Jurásico Medio se repitieron las condiciones de cuenca somera, permitiendo el depósito del Conglomerado Cualác y del Grupo Tecocoyunca. Su edad se ha ubicado en el Jurásico por su contenido fósil de flora y fauna (Erben 1956).

CRETÁCICO

Grupo Tlaxiaco

El nombre fue propuesto de manera informal por Cartagena-Hernández (1981) para agrupar a las rocas sedimentarias del Cretácico Inferior, constituidas por calizas y lutitas, que afloran ampliamente en las inmediaciones de la ranchería Ojite, en el estado de Oaxaca. Está constituido por las formaciones Ojite, Jaltepetongo y San Isidro.

Formación Jaltepetongo

Nombre propuesto por González-Alvarado (1970), para designar a una secuencia de lutitas apizarradas y areniscas calcáreas dispuestas en estratos delgados a laminares; posteriormente Cartagena- Hernández (1981) con base a estudios de campo, la sitúa en la parte media del Grupo Tlaxiaco. Se trata de una alternancia rítmica de mudstone a packestone arcilloso, en estratos delgados a gruesos, que alternan con lutitas calcáreas y conglomerados calcáreos; algunos estratos están dolomitizados, contiene microlaminaciones, exfoliación laminar y en forma de paralelepípedos, estratificación cruzada y micropliegues. Su espesor reportado varía de 96 m en el área del Cañón de Tonalá a 230 m en las cercanías de Yutatío. Por su posición estratigráfica pertenece al Hauteriviano.

Formación Teposcolula

Esta formación fue nombrada por Salas (1949), según afloramientos próximos al poblado de dicho nombre, situado en la porción noroccidental del estado de Oaxaca. Cerca de Teposcolula la formación consiste de calizas color crema o gris oscuro, que se vuelve blanca en el intemperismo, densa y con algunos horizontes fosilíferos con

abundantes ostras pequeñas, partes masivas y otras bien estratificadas. Descansa discordantemente sobre las capas de areniscas y conglomerados del Grupo Tlaxiaco; su contacto superior está cubierto discordantemente por las rocas vulcanoclásticas del Terciario Inferior. Su edad Albiano-Cenomaniano se determinó con base en los microfósiles que contiene.

TERRENO MAYA

JURÁSICO

Complejo MiloníticoAloapan (Sierra de Juárez)

Alaníz Álvarez, et. al. (1994) definieron a este complejo estructural que constituye el complejo milonítico más grande de México; el cual separa a las rocas precámbricas del Complejo Zapoteco (Oaxaca) de las rocas ígneas y sedimentarias mesozoicas del Complejo Cuicateco (Juárez). Se localiza en la llamada Sierra de Juárez y corresponde a una estructura con dirección sensiblemente N-S, de 130 km de longitud y de 10 a 15 km de ancho. Está constituido por rocas miloníticas en facies de esquisto verde y anfibolita, cuyos protolitos son de diferente tipo: gneis, granulita, anortosita y mármol que pertenecen al basamento del Terreno Zapoteco; rocas graníticas leucocráticas que se correlacionan con el granito de Etla y el granito de San Felipe del Agua; gabro y horblendita del basamento del Terreno Cuicateco; rocas básicas volcánicas y subvolcánicas; y rocas sedimentarias. Las relaciones estratigráficas, así como la edad obtenida por el método de K-Ar de una muscovita, indican que el evento principal de milonitización se presentó entre el Pérmico Tardío y el Jurásico Medio

Formación Todos Santos

Sobreyaciendo a las rocas del Complejo Milonítico en clara discordancia erosional, se encuentran los lechos rojos de la Formación Todos Santos, formada por areniscas y limolitas de estratificación delgada. Se considera que esta formación pertenece al Jurásico Medio.

TERCIARIO

Conglomerado Tamazulapan

Con este nombre se denomina a las rocas conglomeráticas que afloran en forma de franjas angostas en la mitad norte de la margen occidental del macizo central cretácico, que aflora en discordancia angular y erosional sobre la caliza Yushé; su inclinación se debe a la inclinación de bloques fallados. Es un conglomerado constituido por fragmentos de roca calizas de la Formación Yushé, de hasta 60 cm

de diámetro, masivo y compacto, embebidos en una matriz arenosa de color rojizo, cementada por carbonato de calcio. Su edad no se ha determinado con precisión por falta de fósiles; sin embargo, la presencia de materiales volcánicos y sus relaciones estructurales, la correlacionan con el conglomerado basal del Grupo Balsas y con el Conglomerado Rojo que aflora en diferentes partes del país, que tienen una edad Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano.

Formación Yanhuitlán

Hisazumi (1932) empleó por primera vez este nombre para designar de modo general a todos los depósitos terciarios. Posteriormente, Salas restringe el término para una serie de arcillas y limolitas arcósicas débilmente consolidadas, de color rojo y crema, estratificadas en capas delgadas a medianas de 2 a 60 cm, ordenadas en secuencia rítmica, que afloran en las inmediaciones de Santo Domingo Yanhuitlán. C.J. Schlaepfer (1970) define a esta formación como una secuencia de limolitas rojas semiconsolidadas y horizontes limo-arcillosos más compactos, que cubren grandes extensiones, en particular en el valle de Nochixtlán, donde tiene su máximo espesor. Estos depósitos rellenan una antigua cuenca endorreica y su geometría es la de un amplio cuerpo lenticular, tomando como localidad tipo la Loma Taza, situada aproximadamente a 2 km al norte de Yanhuitlán.

Rocas Volcánicas

Están representadas por una secuencia de rocas de composición generalmente andesítica, asociadas a las rocas de origen piroclástico, tales como tobas cristalinas, arenosas y líticas, que afloran en el extremo norte y noroccidental noroeste de la zona. Las andesitas con las que presentan mayor distribución en el área. Son densas y masivas, de color gris oscuro, textura fanerítica con fenocristales de plagioclasa y anfíbol; presentan intenso fracturamiento y fragmentación.

Formación Suchilquitongo

Conformada por rocasvolcánicas y sedimentos depositados en medio lacustre. Incluye rocas volcánicas constituidas principalmente por andesitas de textura fanerítica a porfídica, tobas andesíticas, riolitas y tobas riolíticas de textura piroclástica. En algunas localidades comprende tambiénareniscas y calizas lacustres.

CUATERNARIO

Formación Sosola

C.J. Schlaepfer define a esta unidad constituida esencialmente por gravas, más o menos consolidadas, que se interdigitan con la parte superior de la Formación Yanhuitlán, y que se encuentran intrusionadas por rocas ígneas de composición andesítica. Las gravas se extienden desde Sachio, en el oeste hasta las alturas que dominan la parte meridional del Cañón de Tomellín, al este, formando un extenso cuerpo tabular. Su límite superior es una superficie de erosión. Su localidad tipo es la meseta de San Jerónimo y San Juan Sosola, donde las gravas tienen un espesor de 60 a 70 m.

Depósitos aluviales

Unidad constituida por depósitos sedimentarios recientes, constituidos por una mezcla heterogénea de cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillascon una débil cementación y compactación, y una clasificación muy pobre, que rellenan los valles, cauces y zonas de inundación; así como conglomerados de fragmentos de rocas origen ígneo, sedimentario y metamórfico. Su espesor es variable e irregular ya que varía entre 30 y 100 m hacia el centro de ellos, reduciéndose considerablemente hacia las laderas.

4.2 Geología estructural

Una de las estructuras más sobresalientes en un complejo estructural de más de 130 km de largo y entre 10 y 15 km de ancho, con orientación norte-sur, denominado Complejo Milonítico Aloapan, que representa el límite entre los terrenos Oaxaca y Maya; delimitada al este por la Falla Siempre Viva que corresponde a una falla de deslizamiento, al oeste por la Falla Oaxaca que corresponde a una falla de tipo normal originada por la reactivación cenozoica de una antigua cabalgadura mesozoica y al sur por la Falla Donaji de tipo normal. La Falla Tamazulapan que constituye el límite de los Terrenos Tectonoestratigráficos Mixteco y Oaxaqueño, es una falla lateral derecha con rumbo NW 30° SE, que se flexiona en su porción intermedia para luego tomar una orientación sensiblemente N-S con echados de 79° hasta casi verticales hacia el E.

Las estructuras en el Terreno Mixteco son principalmente pliegues y cabalgaduras con orientación general NW-SE, el dominio frágil es menos común resaltando la Falla Mixteca de tipo lateral izquierda con rumbo NW-SE, además de fallas normales en todas direcciones; las estructuras del Terreno Oaxaca son pliegues de orientación

NW-SE y fallas normales de orientación NW-SE en las que están incluidas las fallas Oaxaca y Tomellín, fallas de este sistema conforman el graben de Oaxaca. En el Terreno Maya sobresalen los pliegues y cabalgaduras, entre las más importantes destacan la Falla Siempre Viva, estructura de "detachment" con orientación NW-SE y echados hacia el NE, que conforma el límite orienta del Complejo MiloníticoAloapan. También se tiene un sistema de cabalgaduras con orientación NW-SE, como la Falla Aloapan, la Falla Vista Hermosa y la Falla Valle Nacional (Carta Geológico-Minera Oaxaca E14-9. Escala 1:250,000. SGM, 2000).

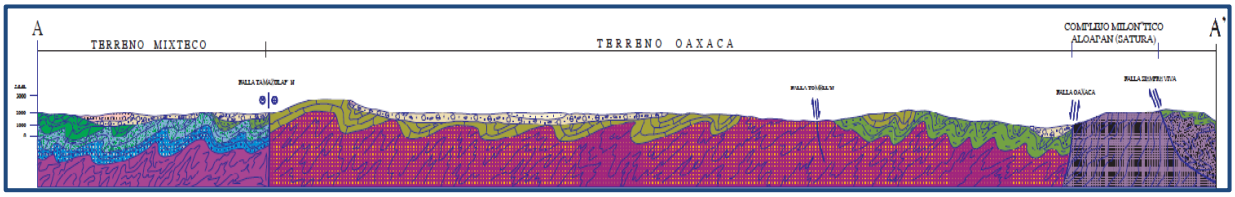
Regionalmente, las estructuras más sobresalientes de los alrededores del área de estudio se refieren a anticlinales y sinclinales, cabalgaduras y fallamiento con orientación preferencial al NNW-SSE. La foliación observada en el Complejo Metamórfico presenta la misma orientación de las estructuras regionales (cabalgaduras) y de la cobertura, lo que indica claramente una reactivación cenozoica de los esfuerzos. Los pliegues representan estructuras anticlinales y sinclinales de la cobertura mesozoica.

La Falla Oaxaca es una estructura de grandes dimensiones e importancia geológica, ya que equivale a una sutura entre terrenos en el sur de México; presenta una dirección NNW-SSE y una longitud de 380 Km, se extiende desde la Ciudad de Oaxaca hasta Tehuacán, separando a los Terrenos Zapoteco y Cuicateco; está ocupada por un complejo milonítico que forma la Sierra de Juárez (Ortega-G. et al. 1992). Por su desplazamiento ha sido descrita como una falla normal con el bloque caído hacia el oeste; en cuanto a la edad del desplazamiento, los estudios han demostrado que la falla se originó antes del Jurásico Medio y que ha tenido actividad durante diversos regímenes tectónicos, con reactivaciones en el Mioceno y con actividad inclusive en el Cuaternario.

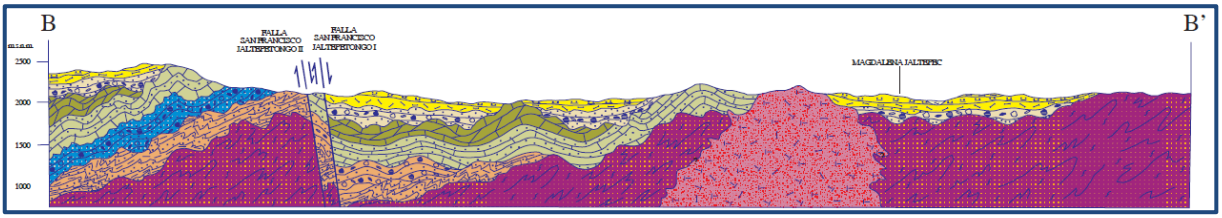
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación del río Blanco y arroyos tributarios, y los conglomerados que conforman los pie de monte; cuyo espesor varía de 10 a 100 m.

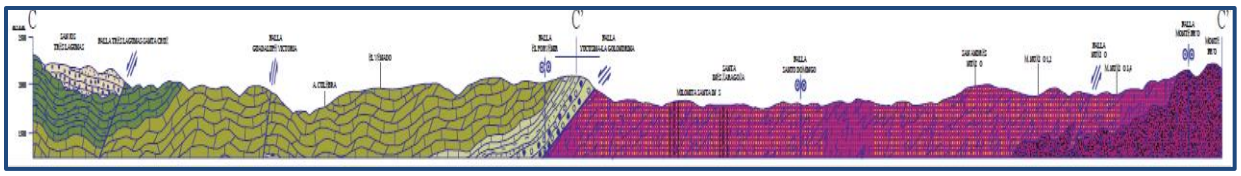
La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas, entre las que destacan andesitas, tobas e ignimbritas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, así como la parte alterada de rocas intrusivas y metamórficas. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, intrusivas y metamórficas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas, limolitas y areniscas. La secuencia de rocas volcánicas y calizas cretácicas constituye un acuífero potencial, que puede presentar condiciones de semiconfinamiento o confinamiento debido cuando están sobreyacidas o alternadas con lutitas y limolitas (Figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera Oaxaca E14-9. Esc. 1:250.000 (SGM, 2000)



Fuente: Carta Geológica-Minera Asunción Nochixtlán E14-D36. Esc. 1:50.000 (SGM, 2007)



Fuente: Carta Geológico-Minera San Mateo Tepantepec E14-D46. Escala 1:50,000. (SGM, 2007).

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

A partir de la información geológica e hidrogeológica superficial y del subsuelo del acuífero, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, de baja capacidad de almacenamiento, conformado por dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado. El medio poroso constituye la unidad superior y está representado por los sedimentos aluviales de granulometría que varía de gravas a limos, que constituyen el lecho y la llanura de inundación del río Blanco y arroyos tributarios, cuyo espesor alcanza hasta 100 m en el centro del valle y disminuye

gradualmente hacia los flancos de las sierras de que lo delimita. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.
La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas principalmente volcánicas, entre las que destacan andesitas, tobas e ignimbritas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, así como la parte alterada y fracturada de las rocas metamórficas. Las rocas volcánicas y calizas del Terciario constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de semiconfinamiento o confinamiento, debido a que están sobreyacidas o alternadas con lutitas, limolitas y areniscas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 1992 (CONAGUA) se ejecutaron 26 pruebas de bombeo y 15 pruebas más en 2001 (CONAGUA) en el acuífero vecino Valles Centrales que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica; todas ellas de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación**.**

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se determina que valores de transmisividad variaron en un rango muy amplio de **1.0 x 10^{-3} a 60.0 x 10^{-3} m^2/s (86.4 a 5184 m^2/día)**. La conductividad hidráulica varía de **1.7 a 103.7 m/d (2.0 x10^{-5}a 1.2 x10^{-3}m/s)**. Los valores más altos corresponden a los sedimentos clásticos de mayor granulometría y mejor clasificados que constituyen el cauce de los ríos y arroyos, o a zonas de mayor espesor saturado, que se localizan en la porción central del acuífero

Sólo 2 pruebas de bombeo contaron con pozo de observación, en la que se obtuvo un coeficiente de almacenamiento de 0.00093 y 0.0008. Sin embargo, para fines del balance de agua subterránea se consideró un valor del rendimiento específico Sy de 0.05.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2002 además de registros históricos durante el periodo 1992-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2004-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han

mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2019.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron desde 4 m, que se registran en las llanuras de inundación del río Blanco y arroyos tributarios, hasta 70 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles, conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, menores de 5 m, se registran en las porciones centrales de los valles, a lo largo de los ríos y arroyos; en tanto que las mayores profundidades, de 60 a 70 m, se presentan en la porción noroccidental y suroriental del valle de Nochixtlán (Figura 4).

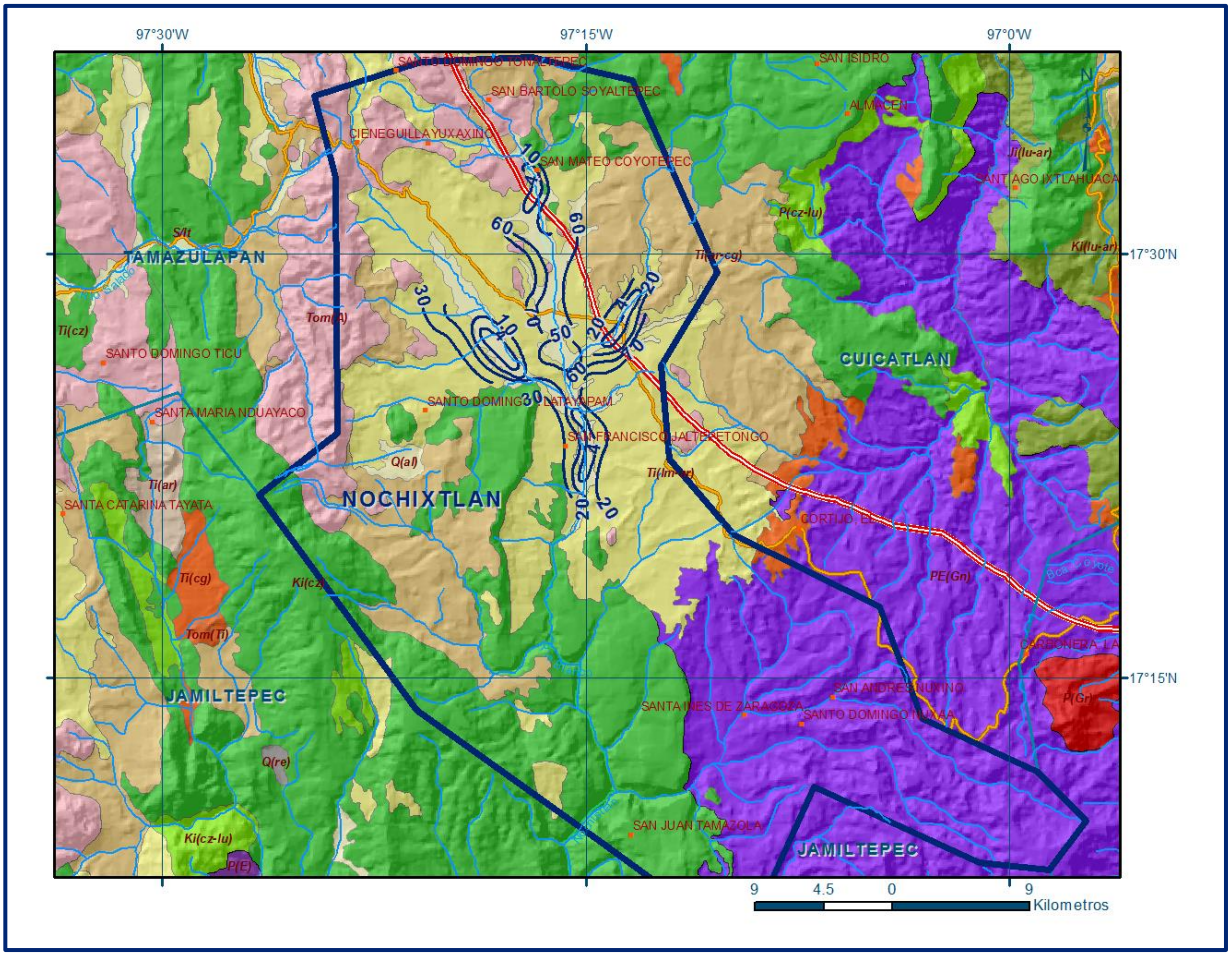


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 2080 a 1980 msnm, que se incrementan de sur a norte, a lo largo del cauce del río Blanco, y en dirección a los flancos de las sierras que delimitan los valles. Los valores más altos, 2050a 2080 msnm, se registran en el extremo norte del valle de Nochixtlán, hacia el poblado San MateoCoyotepec, desde donde descienden gradualmente hacia el sur por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, a lo largo del cauce del río Blanco. Los valores más bajos de carga hidráulica, de 1990 a 1980 msnm, se presentan en la porción sur de dicho valle, al sur del poblado San Francisco Jaltepetongo. De esta manera, se define una dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur, con alimentaciones provenientes del flanco oriental y occidental, procedentes de los arroyos tributarios del río Blanco (Figura 5).

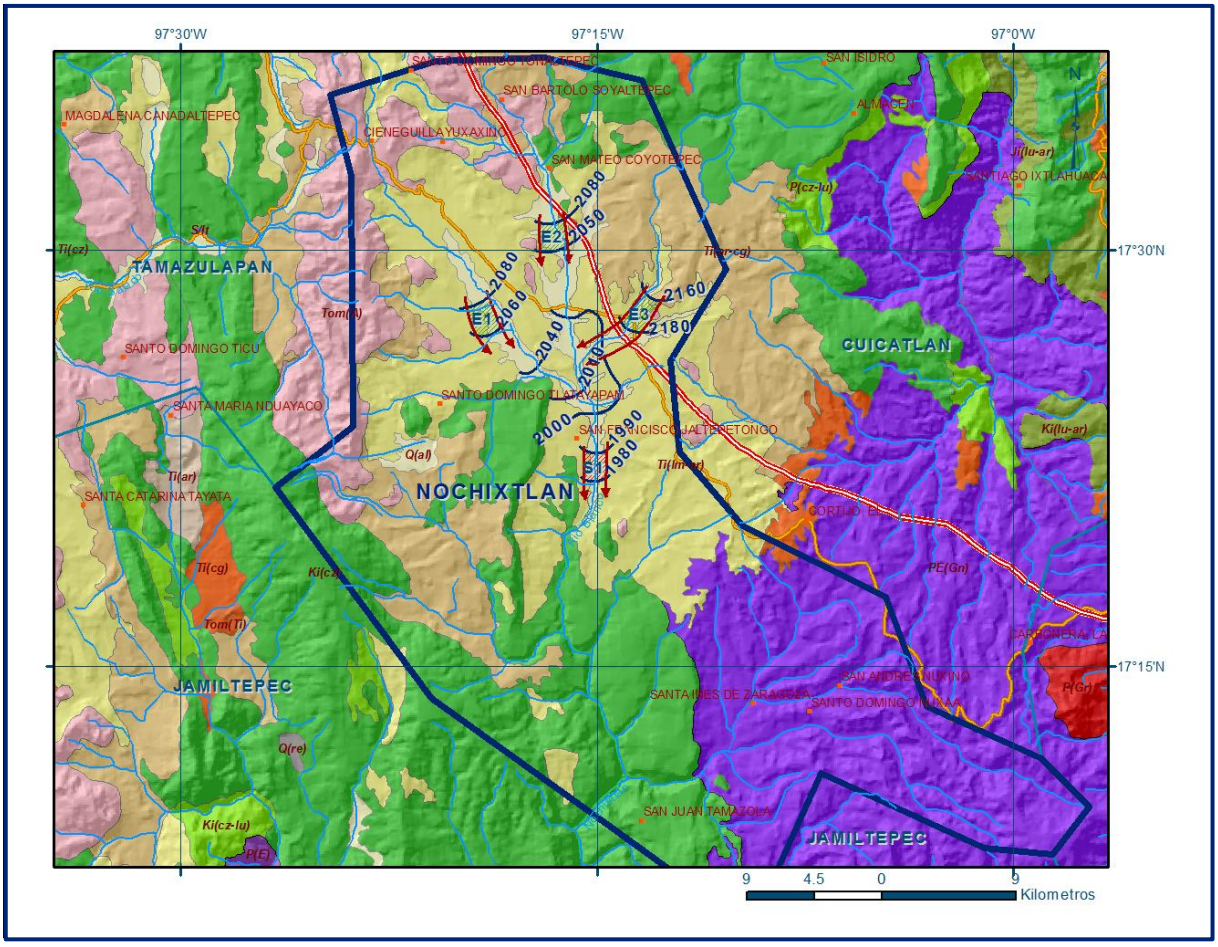


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2004-2019 registró valores de abatimiento de 2 a 7 m en los sedimentos que conforman el cauce y llanura de inundación del rio Blanco, que representan un ritmo anual de abatimiento de 0.1 a 0.5 m. Al noreste del poblado San Francisco Jaltepetongo se registra un abatimiento local de 9 m, que representa 0.6 m anuales. En la mayor parte de la zona de explotación los niveles del agua subterránea no presentan variaciones significativas en su posición (Figura 6).

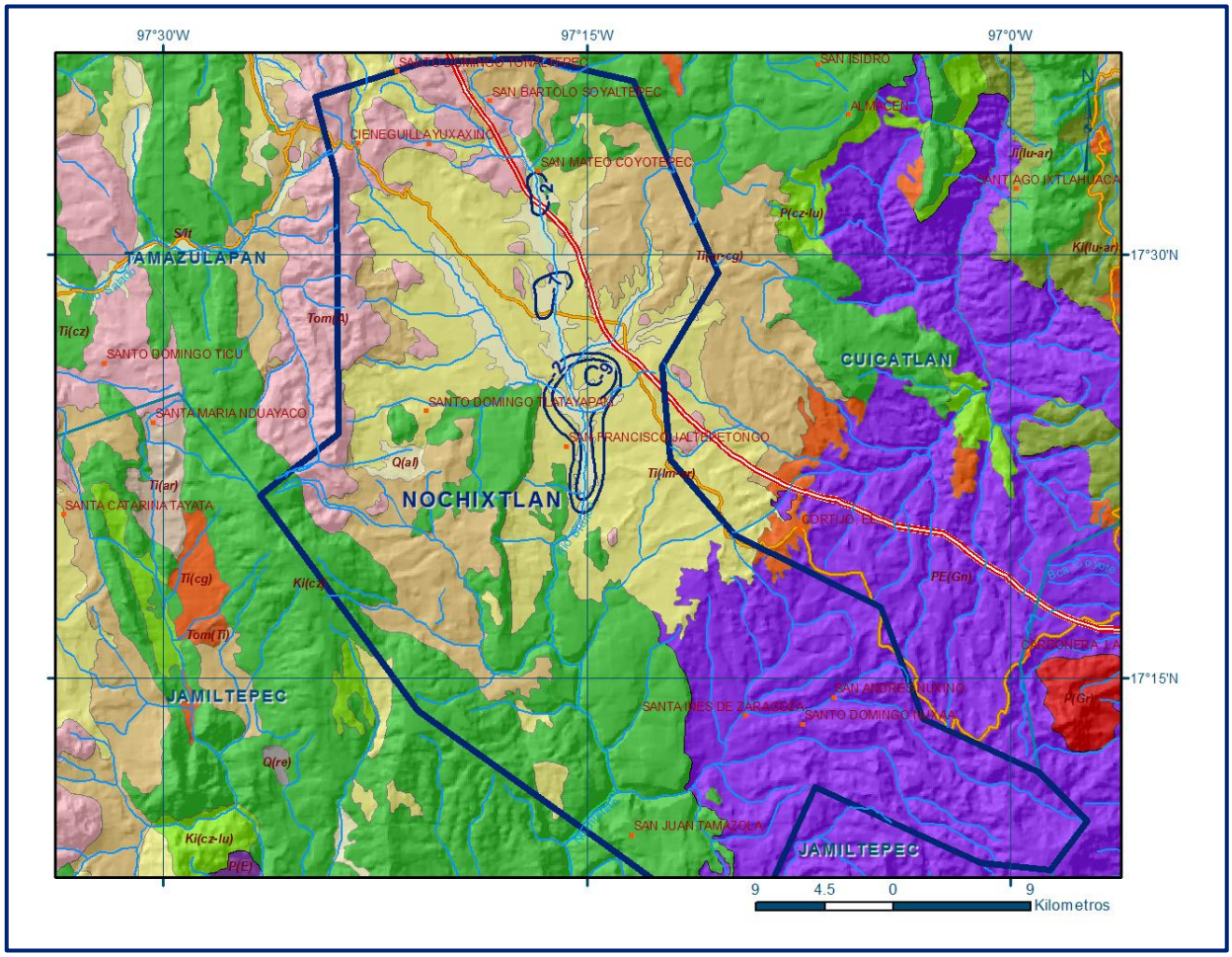


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2004-2019)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2002, se tomaron 10 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, iones mayoritarios, sólidos totales disueltos (STD) y análisis bacteriológicos.

Adicionalmente, como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018) se tomaron 2 muestras de agua subterránea en el año 2018. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, 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 (LMP) 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 concentración de SDT presenta valores que variaron de 300 a 2170 mg/l, algunos de la cuales sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido por la norma referida. Una muestra de aguas subterránea rebasa el LMP de fluoruro de 1.5 mg/l con una concentración de 1.577 mg/l.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica de manera general como dulce a salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Asociation (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 510 a 3,690□S/cm. La temperatura del agua medida directamente a la salida de las obras de captación varía entre 19.2 ° y 26.7° C. El pH varía entre 7.2 y 8.6.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica de manera general como de salinidad media (C2) a alta (C3) y contenido bajo (S1) de sodio intercambiable, lo que indica que solo es apropiada para su uso en riego con algunas restricciones, como cultivos moderadamente tolerantes a la salinidad, suelos permeables o requerir lavados periódicos.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la bicarbonatada-cálcica, que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas volcánicas y calcáreas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en 1992, se registraron los 100 aprovechamientos más importantes, de los cuales 57 son pozos, 13 norias, 23 manantiales y 7 galerías filtrantes. La extracción total estimada es de **11.6 hm³ anuales**.

Adicionalmente, a través de los 23 manantiales se descarga un caudal de 1000 lps, que equivalen a **31.5 hm³ anuales.** Destaca entre ellos el manantial denominado "El Venado", que se localiza en el río Culebra.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2004-2019, en un área de balance de **300 km²**, que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos.

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:

Entradas (E) – Salidas (S) = 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 en el acuífero:

Recarga total – Descarga total = 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 y 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 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 cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento (ΔVS) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical
Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal
Ri: Recarga Incidental
B: Bombeo
Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
Dm: Descarga a través de manantiales
ETR: Evapotranspiración
ΔV(S): Cambio en el volumen almacenado

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

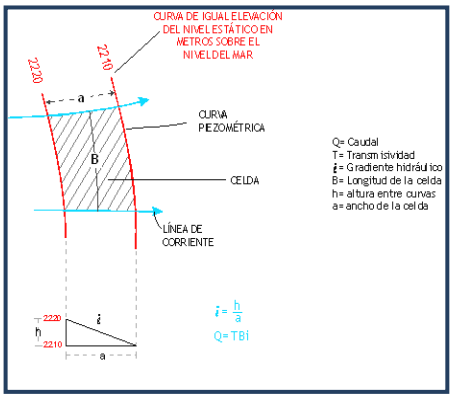
$$Rv = Sh + B + Dm + ETR - Eh - Ri \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

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 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. La recarga al acuífero tiene 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 2019 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:Caudal (m^3/s)
T:Transmisividad (m^2/s)
B:Longitud de la celda (m)
i:Gradiente Hidráulico (adimensional)

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **9.8 hm^3/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
E1	1690	2215	20	0.0090	0.012	0.1831	2.8
E2	1746	1850	30	0.0162	0.010	0.2831	4.4
E3	1430	2520	30	0.0119	0.010	0.1702	2.6
						TOTAL	**9.8**

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 de la región donde se localizan las celdas.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por flujo subterráneo (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las zonas de niveles freáticos someros y por medio de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **11.6 hm^3** 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 año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **1.2 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
S1	1455	1870	10	0.0053	0.010	0.0778	1.2
						TOTAL	1.2

7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)

La descarga a través de los 23 manantiales censados es de 1000 lps, que representa un volumen anual de 31.5 hm^3. **Dm = 31.5 hm³ anuales.**

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) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

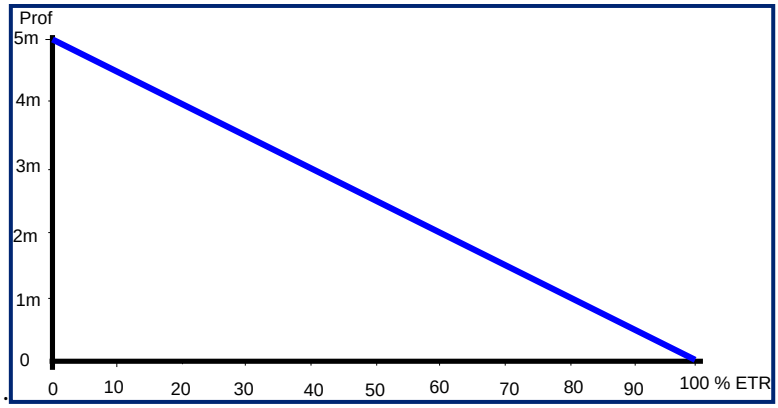
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 15.3 °C y 580.6 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 498.9 mm anuales, como se muestra a continuación:

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

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

T (°C) =	15.3		
P(mm) =	580.6	P^2 =	337096.36
L =	861.57885	L^2 =	742318.115
ETR (mm)	498.9		

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.



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, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 1.0 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km^2)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm^3/año)
4	4	9.7	0.4989	0.2	1.0
	Total	**9.7**			**1.0**

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2004-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy = 0.05 se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

ΔVS: Cambio de almacenamiento en el período analizado
S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático
h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo analizado es de - 6.1 hm^3, es decir, un promedio anual de **- 0.4 hm^3**.

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2004-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	ΔV(S) (hm^3/año)
-2	-2	2.7	0.05	-0.3
-7	-7	4.1	0.05	-1.4
-9	-9	0.9	0.05	-0.4
-3	-3	15.1	0.05	-2.3
-2 a -3	-2.5	13.2	0.05	-1.7
	TOTAL	**36.0**	**TOTAL**	**-6.1**
		Promedio anual		**-0.4**

Solución a 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:

$$Rv = Sh + B + Dm + ETR - Eh \pm \Delta V(S)$$
$$Rv = 1.2 + 11.6 + 31.5 + 1.0 - 9.8 - 0.4$$
$$Rv = 35.1\ hm^3/año$$

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

$$R = Rv + Eh + Ri$$
$$R = 35.1 + 9.8$$
$$R = 44.9\ hm^3 anuales$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **44.9 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las

descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico, prevenir la migración de agua de mala calidad al acuífero.

Para el caso del acuífero Nochixtlán su valor es **31.5 hm³ anuales**, que corresponde a la descarga a través de manantiales. No se considera comprometido el volumen de las salidas por flujo horizontal porque éstas fueron evaluadas en la entrada al cañón del Río Blanco que comunica con el acuífero Jamiltepec, aproximadamente a 12 km de límite entre estos acuíferos, y porque no existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento aguas abajo. Por lo tanto, **DNC = 31.5 hm³/año.**

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 **12’891,679 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos del 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 aguas subterráneas (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 aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

DMA = R – DNC –VEAS
DMA = 44.9 – 31.5 – 12.891679
DMA = 0.508321 hm^3/año

El resultado indica que existe un volumen disponible de **508,321 m^3** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1992. Prospección geohidrológica y evaluación preliminar de la zona de Nochixtlán, estado de Oaxaca. Realizado por Sistemas Hidráulicos y Ambientales, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del agua, 2001. Estudio de actualización geohidrológica del acuífero de Valles Centrales, estado de Oaxaca. Realizado por COPEI Ingeniería, S.A. de C.V**.**

Comisión Nacional del Agua. 2002. Estudio de actualización de mediciones piezométricas en los acuíferos Tehuantepec, Río Ostuta, Nochixtlán y Huatulco del estado de Oaxaca, y Cuajinicuilapa del estado de Guerrero.Realizado por COPEI, Ingeniería, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Sur, 2019. Información piezométrica del acuífero Nochixtlán, estado de Oaxaca

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera Oaxaca E14-9. Escala. 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Carta Geológica-Minera Asunción NochixtlánE14-D36. Escala. 1:50.000.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Carta Geológica-Minera San Mateo Tepantepec E14-D46. Escala. 1:50.000.