CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO SANTIAGO ASTATA (2020), 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 5
3. FISIOGRAFÍA 6
3.1 Provincias fisiográficas 6
3.2 Clima 7
3.3 Hidrografía 8
3.4 Geomorfología 9
4. GEOLOGÍA 10
4.1 Estratigrafía 12
4.2 Geología estructural 14
4.3 Geología del subsuelo 15
5. HIDROGEOLOGÍA 16
5.1 Tipo de acuífero 16
5.2 Parámetros hidráulicos 17
5.3 Piezometría 17
5.4 Comportamiento hidráulico 18
5.4.1. Profundidad al nivel estático 18
5.4.2. Elevación del nivel estático 19
5.4.3. Evolución del nivel estático 20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA 21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 21
7.1 Entradas 22
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 22
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 23
7.2 Salidas 24
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 24
7.2.2 Evapotranspiración (ETR) 25
7.2.3 Bombeo (B) 26
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) 26
8. DISPONIBILIDAD 28
8.1 Recarga total media anual (R) 28
8.2 Descarga natural comprendida (DNC) 28
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 29
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 29
9. BIBLIOGRAFÍA. 30

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la "NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

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

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

1.1 Localización

El acuífero Santiago Astata, definido con la clave 2020 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo sur del estado de Oaxaca, entre los paralelos 15°48'32" y 16°16'43" de latitud norte y entre los meridianos 95°33'26" y 96°08'02" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,804 km^2.

Limita al norte con el acuífero Tehuantepec; al este con Morro-Mazatán y al oeste con Huatulco, todos ellos del estado de Oaxaca. Al sur su límite natural es el Océano Pacífico (Figura 1).

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero comprende totalmente el municipio San Pedro Huamelula, la mayor parte de San Miguel del Puerto, San Carlos Yautepec y San Miguel Tenango; así como porciones menores de San Juan Ozolotepec, Santa María Ecatepec, Asunción Tlacolulita, Santiago Astata, Magdalena Tequisistán y Santo Domingo Tehuantepec

Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2020 SANTIAGO ASTATA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	95	35	23.2	16	16	43.1	
2	95	33	26.4	16	11	27.9	
3	95	36	24.7	16	3	59.1	
4	95	36	44.5	16	0	33.4	
5	95	38	14.9	15	59	45.0	
6	95	36	34.3	15	57	54.8	
7	95	37	4.6	15	55	38.9	DEL 7 AL 8 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
8	96	0	9.7	15	48	32.1	
9	96	0	40.9	15	50	53.1	
10	96	3	52.6	15	54	22.6	
11	96	5	31.8	15	55	22.7	
12	96	5	42.9	15	56	38.0	
13	96	7	19.5	15	57	29.0	
14	96	7	29.0	16	1	29.3	
15	96	8	1.5	16	3	37.9	
16	96	5	49.5	16	10	9.9	
17	96	0	16.5	16	10	52.5	
18	95	58	3.4	16	8	14.6	
19	95	55	59.6	16	7	19.7	
20	95	53	5.8	16	7	49.0	
21	95	50	37.2	16	7	16.2	
22	95	49	59.5	16	8	45.5	
23	95	47	26.0	16	9	3.7	
24	95	45	31.9	16	8	53.7	
25	95	42	48.3	16	10	37.9	
26	95	40	0.2	16	11	42.5	
27	95	38	4.3	16	14	40.0	
1	95	35	23.2	16	16	43.1	

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. En su territorio completo no rige ningún decreto de veda para la extracción del agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del "*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican",* publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en el 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 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 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:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE TEHUANTEPEC, OAXACA. Realizado en 1979 por Rocha y Asociados, S. A. de C.V. (ROASA), para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). El estudio tuvo como objetivo determinar la condición de explotación del acuífero. Concluye debido a que la extracción era poca significativa, principalmente a través de un número muy grande de norias y algunos pozos para uso industrial, el acuífero estaba en condición de subexplotación y que la baja permeabilidad de los materiales ubicados fuera del cauce de los ríos no permite considerar a los acuíferos de la zona como fuente potencial de agua subterránea

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.

ACTUALIZACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO COLOTEPEC-TONAMECA, EN EL ESTADO DE OAXACA. Realizado en 2005 por BETSCO, S.A., para la Comisión Nacional del Agua Organismo. Fue el primero que dio a conocer las condiciones hidrogeológicas que imperaban en la superficie del acuífero. Los trabajos consistieron en actualizar la posición de los niveles del agua subterránea en la red de medición de los acuíferos y obtener las elevaciones de los brocales o de los puntos de medición; con base en esta información determinar la elevación del nivel estático, elaborar mapas de configuraciones de elevación y profundidad al nivel estático así como de las evoluciones que presentan los niveles del agua, como resultado de los esfuerzos hidrodinámicos inducidos por las condiciones de recarga y extracción a que está

sujeto el acuífero. Realiza también muestre de aguas subterráneas para su análisis fisicoquímico.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ACUÍFEROS DEL ESTADO DE OAXACA. Realizado en 2010 para la Comisión Nacional del Agua por la Universidad Autónoma Chapingo. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO SANTIAGO ASTATA, 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 de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964) el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur. Por otro lado, según la regionalización fisiográfica del INEGI (1989), se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur; el extremo norte en la Subprovincia Sierras Orientales y la porción centro y sur en la Subprovincia Costas del Sur.

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 Sierras Orientales es un sistema montañoso que forma parte del extremo oriental de la Sierra Madre del Sur y comprende parte de los estados de Puebla, Veracruz y Oaxaca; se extiende en dirección noroeste-sureste desde la región de Orizaba, Veracruz, hasta las proximidades de Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca. La porción norte, en el estado de Veracruz, llamada Sierra de Zongolica, es algo menos abrupta que el resto y en ella predominan las rocas calcáreas del Cretácico que le dan afinidad con la Sierra Madre Oriental. Desde la proximidad de San Juan Bautista Valle Nacional hasta la cañada del río Tehuantepec, se conoce como Sierra Mixe; es más alta y escarpada que la de Zongolica, con cumbre máxima de 3,280 m en el cerro Zempoaltépetl ubicado al noreste de Santa María Tlahuitoltepec; su litología es muy compleja, con rocas metamórficas, aluviones antiguos y, en su porción sur, rocas ígneas ácidas y algunos afloramientos calcáreos

Por su parte, la Subprovincia Costas del Sur comprende la angosta llanura costera del Pacífico, que está orientada más o menos en sentido noroeste-sureste, desde las cercanías de la desembocadura del río Coahuayana, en el límite entre Colima y Michoacán, hasta Salina Cruz, Oaxaca, pasando por el estado de Guerrero. Está conformada por sierras, llanuras y lomeríos; las primeras se localizan a lo largo del límite norte de la subprovincia, se aproximan al litoral cerca de San Pedro Pochutla y Salina Cruz y están constituidas predominantemente por rocas metamórficas precámbricas, aunque en el oriente se encuentran rocas metamórficas y sedimentarias del Cretácico, ígneas intrusivas del Mesozoico e ígneas extrusivas del Terciario. Las llanuras se encuentran a lo largo de la faja costera, cubiertas por suelos del Cuaternario principalmente; y los lomeríos se ubican entre las sierras y las llanuras, y sólo dos de las unidades llegan al litoral, una en Puerto Ángel y otra en Barra de La Cruz.

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 en región es

cálido subhúmedo con lluvias en verano, el cual comprende toda la zona costera desde el límite con el estado de Guerrero hasta el límite con Chiapas. En este tipo de clima la temperatura media anual es mayor de 22°C y la temperatura del mes más frio mayor de 18°C. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm; presenta régimen lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Conforme se asciende topográficamente, se presenta las variantes Aw(1), Aw(2) y (A)C(w1), semicálido subhúmedo del grupo C. En estos dos últimos tipos de clima el índice P/T es mayor de 55. El clima (A)C(w1) presenta temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frio menor de18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor a 40 mm. En el extremo suroriental el clima es de tipo BSo(h')w árido, cálido, con temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frio mayor de 18°C. Lluvias de 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 9 estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie del acuífero que contienen registros para diferentes periodos: San Francisco Ozolotepec, La Hamaca, Santa María Xadani, San Isidro Chacalapa, Tapanalá, Huamelula, Isla, Campo Experimental del Valle y Tlacolulita. Con estos datos, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **942.0 mm, 28.1 °C y 1800 mm,** respectivamente.

3.3 Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se ubica en la Región Hidrológica (RH) RH-21 “Costa de Oaxaca”, Subregión Hidrológica “Costa de Oaxaca”, Cuenca Rio Astata y Otros, subcuencas de los ríos Zimatlán, Chacalopa y Astata. La cuenca Río Astata y Otros incluye parte de los distritos Tehuantepec, Pochutla y Yautepec; abarca 2.88% del territorio oaxaqueño; limita al norte con la cuenca Río Tehuantepec (B) de la RH-22, al oeste con la cuenca Río Copalita y otros (B) de la misma RH-21, mientras que al sur y al este su límite es el Océano Pacífico.

La mayor parte de los ríos que se desarrollan dentro de la cuenca se caracterizan por ser de corta extensión, régimen intermitente, presentar fuerte pendiente y lecho de material gravo-arenoso. Dentro de la red de drenaje destacan los ríos Zimatlán, Ayuta y Astata que alimentan a las lagunas Blanca, Colorada, Grande y El Rosario.

El Río Astata, también llamado Huamelula, nace en la Sierra Madre del Sur a 1,420 msnm de altitud, desciende hacia el sur en una trayectoria sinuosa para desembocar al Océano Pacífico. Recibe como afluente principal al río Santa María, el resto de su caudal lo aportan numerosos tributarios de régimen intermitente, antes de unirse al río Santa María se localiza la Estación Hidrométrica Astata, misma que durante el periodo 1980-1993 reportó un volumen medio anual de 29.79 Mm^3 y gasto medio anual de 0.94 m^3 /s, drena en total un área aproximada de 530 km^2.

El Río Ayuta es otra de las corrientes permanentes de esta cuenca, drena un área de 593 km^2 de los distritos Yautepec y Tehuantepec, nace a 1,300 msnm de altitud, cerca del parteaguas de la Sierra Madre del Sur, desde donde dirige su cauce hacia el sureste hasta el oeste de San Miguel Chongo, de ahí se dirige al sur mediante un cauce sinuoso y de fuerte pendiente hasta desembocar al Océano Pacífico.

El Río Zimatlán nace al sur de San Pablo Topiltepec, a 1,600 msnm de altitud, sigue un curso irregular a lo largo de 42 km de longitud antes de descargar sus aguas al Océano Pacífico, drena 494 km^2 de los distritos Pochutla, Yautepec y Tehuantepec

La infraestructura hidráulica de la cuenca está integrada principalmente por una presa derivadora construida sobre el cauce del Río Astata, que tiene un volumen de almacenamiento medio anual reportado de 1.386 Mm^3; para beneficiar 31 ha de cultivo.

3.4 Geomorfología

La característica geomorfológica predominante en la zona es el contraste del relieve por el cambio abrupto de pendiente entre la región norte 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 la planicie. Contrasta también la etapa geomorfológica de madurez que presentan las sierras que ocupan la mayor superficie del área y que no han alcanzado un nivel base de erosión, con la etapa de juventud avanzada que presentan los valles. En la zona norte el relieve es de montañas complejas posiblemente desarrolladas durante el Mesozoico y posteriormente deformadas y afectadas por cuerpos intrusivos, del Jurásico al Mioceno, constituidas principalmente por gneis, migmatita, granito y granodiorita, disectadas por una intensa red de corrientes que han labrado valles y cañones profundos, y en las que el intemperismo ha originado picachos, bloques semiesféricos de grandes

dimensiones y acantilados. La porción sur es un conjunto de lomeríos y cerros formados por una intensa erosión fluvial e intemperismo químico, que actuaron sobre rocas intrusivas y metamórficas del Jurásico-Cretácico, además de una planicie costera originada posiblemente por la subsidencia del terreno debido a la influencia de la Placa de Cocos; está conformada por conglomerados y suelos aluviales y lacustres.

Los valles intermontanos están constituidos por sedimentos aluviales derivados principalmente de las rocas ígneas y metamórficas, erosionados, arrastrados por las corrientes y depositados en las partes bajas. Actualmente los valles, están siendo labrados por corrientes de régimen permanente que descienden de las sierras y desembocan en la línea costera del Océano Pacífico, rellenando las lagunas marginales y los esteros.

En la zona se identifican tres aspectos geomorfológicos, uno de control litológico, otro estructural y el último deposicional. El primero corresponde a la sierra que forma el batolito granítico que aflora principalmente al norte de la zona, dando lugar a pasajes abruptos de difícil acceso, cortados por abundantes arroyos de control tectónico. La morfología de control estructural la representan dos terrazas formadas por erosión y depósito marino durante el Terciario Superior. Estas terrazas se encuentran a una elevación promedio de 50 a 70 msnm, formando acantilados hacia la zona de costa en roca granítica, o bien, escalones donde predominan las areniscas. El último aspecto lo representan los valles fluviales y los depósitos de litoral que conforman zonas topográficamente uniformes, casi planas, principalmente longitudinales, aproximadamente en dirección norte-sur para los fluviales y este-oeste para los de litoral.

4. GEOLOGÍA

A nivel regional, en la zona se encuentran implicados los Terrenos Tectonoestratigráficos Xolapa y Maya, así como los bloques Arco Chontal y Mixtequita. El Terreno Xolapa aflora en el extremo suroccidental y está constituido por ortogneises, migmatitas, anfibolitas y diques aplíticos con metamorfismo en facies de anfibolita. La interpretación de la edad de esta unidad es compleja ya que estudios isotópicos ha reportado edades desde el Precámbrico hasta el Paleoceno. Otras edades miocénicas están relacionadas con grandes emplazamientos plutónicos no deformados de composición granodiorítica con variaciones a dioritas. El Bloque Arco Chontal se presenta en la porción suroriental; se constituye como el

arco volcánico mesozoico más oriental con respecto a los situados al occidente de México. El Basamento de este bloque no se reconoció, sin embargo, algunos autores consideran que puede ser rocas pertenecientes al Complejo Xolapa. El Arco Chontal consiste de una secuencia vulcanosedimentaria conformada por andesitas, areniscas, lutitas y limolitas con interestratificaciones de lentes calcáreos. La parte superior está constituida por estratos delgados de calizas marmorizadas y esquistosas; conglomerados polimícticos con clastos calcáreos y andesitas; fragmentos de rudistas le dan una edad Neocomiano-Turoniano o Cretácico Temprano (Carfantán, 1981, 1983). La cubierta del Arco Chontal está representada por calizas y dolomías pertenecientes a la Formación Teposcolula, a la cual la sobreyace en concordancia la Formación Yucunama constituida por calizas y lutitas (Carta Geológico-Minera Juchitán E15-10 D15-1. Escala 1:250,000. SGM, 2000) (Figura 2).

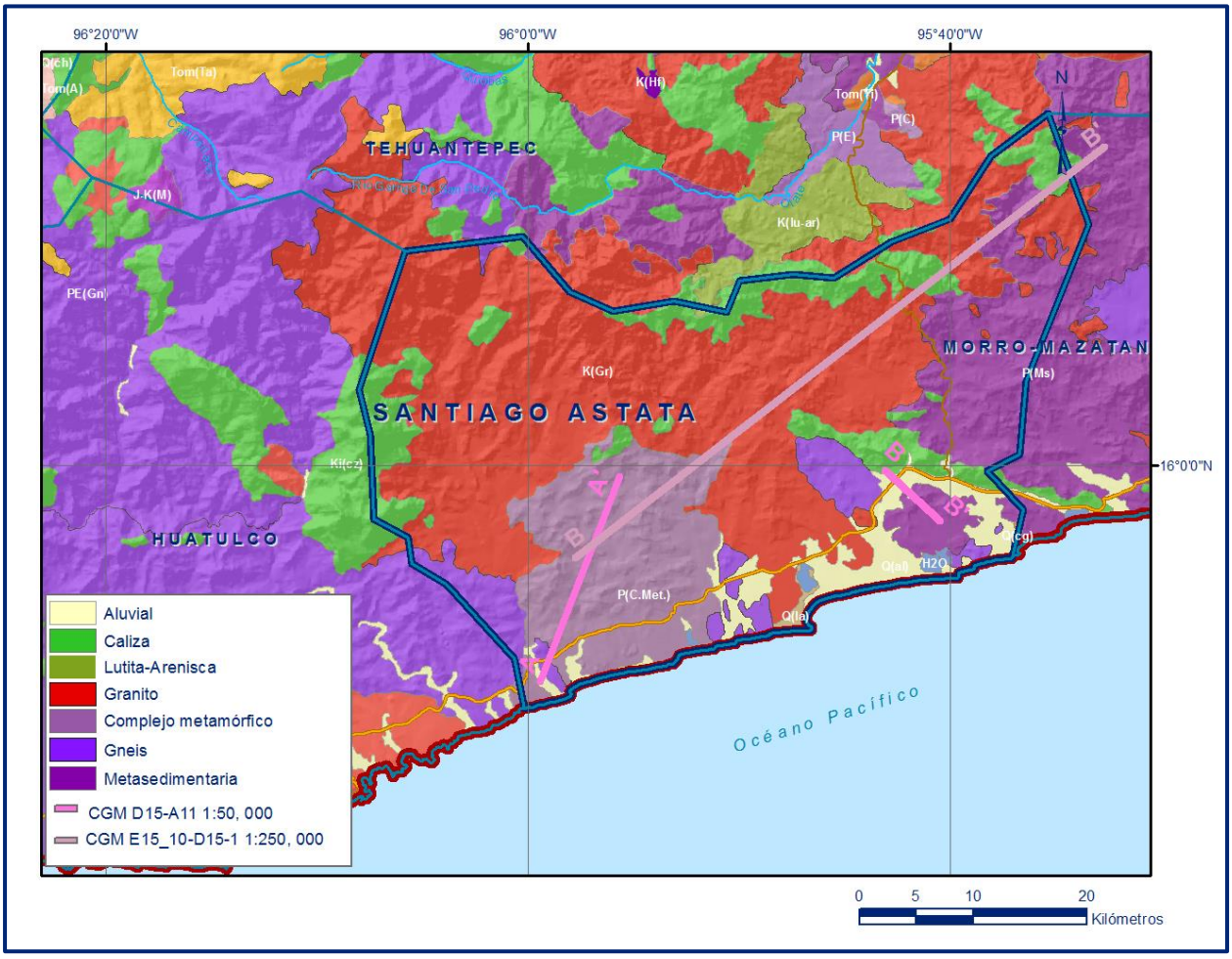


Figura 2. Geología general del acuífero

La Formación Teposcolula está constituida por brecha intraformacional en estratos medios a gruesos en la base y caliza masiva hacia la cima; la edad determinada con base en su contenido faunístico es Albiano-Cenomaniano. Las unidades mencionadas se encuentran intrusionadas por el Batolito Ayuta de composición granítica-granodiorítica, datado por el método Rb-Sr en biotitas, con edad 20.9 ± 4 Ma, perteneciente al Mioceno. Del Holoceno se diferenciaron tres ambientes sedimentarios; aluvión que se desarrolla en las planicies y cauces de los ríos y arroyos; el litoral que se formó a lo largo de la línea de costera, consiste principalmente de arena y limo; y el palustre originado y expuesto en las zonas planas, lagunares y de inundación, a lo largo de la planicie costera, conformado principalmente de materia orgánica, limo, arcilla y arena fina de composición variable (Carta Geológico-Minera Santiago Astata D15-A11. Escala 1:50,000. SGM, 2013).

4.1 Estratigrafía

En la región en la que se ubica el acuífero aflora una secuencia estratigráfica constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas cuya edad comprende del Precámbrico al Reciente. A continuación, se describen de manera general las distintas unidades litológicas, comenzando con la más antigua.

TERRENO XOLAPA

PRECÁMBRICO

Presenta un basamento conocido como Complejo Xolapa (De Cserna, 1965) constituido por ortogneises y paragneises con migmatitas en intervalos anatexíticos, diques aplíticos y pegmatíticos, mármoles, anfibolitas y esquistos. Consta de dos grandes grupos de rocas cuya unidad más antigua está constituida por paragneises, esquistos pelíticos, esquistos de biotita y cuarcita, cuyos protolitos sedimentarios son interpretados como interestratificaciones de grauwacas, rocas pelíticas y carbonatos. El segundo grupo es el más ampliamente distribuido y su litología consiste principalmente de ortogneises, anfibolitas y migmatitas en facies de anfibolita. En este grupo se desarrolló un metamorfismo de alto grado y una migmatización a gran escala. La interpretación de su edad ha presentado siempre serias dudas, ya que se han realizado estudios isotópicos con resultados desde Precámbrico hasta Oligoceno-Mioceno (Tolson, 1998); aunque algunas edades terciarias podrían estar relacionadas a emplazamientos plutónicos no deformados con los que concluyó el magmatismo por acreción plutónica contra los terrenos adyacentes; que afectan a este basamento con cuerpos calcoalcalinos de composición generalmente

granodiorítica con variaciones a granitos, dioritas, cuarzomonzonitas y cuarzodioritas, que conforman el batolito de la costa.

PALEOZOICO-JURÁSICO

El mismo autor asigna al Paleozoico y Jurásico a la migmatita, gneis y esquisto de facies de anfibolita, que están afectadas por cuerpos intrusivos de granito, granodiorita, tonalita y diorita, desde el Cretácico tardío al Terciarios inferior, que a su vez son intrusionados por diques pegmatíticos.

CRETÁCICO

En este periodo quedan incluidos los mármoles que De Cserna (1965) y Ortega (1981) incluyen en el Complejo Xolapa, que suponen son derivados de rocas pelíticas poco calcáreas, y originados por los cuerpos intrusivos de composición granítico-granodiorítico que causaron el metamorfismo de contacto.

Desde el Cretácico al Reciente, ocurrieron eventos magmáticos en la zona, que hacen incongruentes las edades reportadas por diferentes autores y métodos para la datación de las rocas intrusivas cartografiadas. Esto lleva a la conclusión de que el magmatismo y la intrusión de todos los cuerpos que afectan al Complejo Xolapa, comenzó probablemente dese el Jurásico y continuó quizá hasta el Mioceno.

Formación Teposcolula

Conformada por calizas biomicríticas poco fosilíferas de tipo arrecifal, dispuestas generalmente en estratos gruesos que contienen nódulos de pedernal. Son de color gris claro a café claro y parcialmente dolomitizadas. Afloran al este y sureste, en donde se observan de color gris claro a crema que al intemperizarse se vuelve gris blanquecino, textura criptocristalina y compacta. Se le asigna una edad que corresponde al Cretácico Medio (Albiano-Cenomaniano).

Rocas ígneas intrusivas

El Cretácico Superior está representado por rocas ígneas intrusivas de tipo granítico, que intrusionan a las rocas calizas. Tiene dimensiones y estructuras de batolito y otras secundarias como diques y troncos que afloran de manera extensa en la porción centro y norte. En la franja de 5 a 10 km de la zona costera se encuentran cubiertas por depósitos de areniscas del Terciario y sedimentos de Cuaternario. Su expresión morfológica varía de acuerdo si se encuentra en contacto con micaesquistos o independientemente; formando una topografía que se eleva

rápidamente para constituir un conjunto montañoso abrupto y de difícil acceso cuando es granito principalmente, y ondulado con cerros de poca elevación en presencia de micaesquistos. Presentan un sistema tectónico que controla la evolución sedimentaria posterior.

TERCIARIO

Está representado por rocas ígneas intrusivas que conforman el Batolito Ayuta, de composición granítica-granodiorítica, que intrusiona a las principales unidades mencionadas anteriormente. De acuerdo a las dataciones por el método Rb-Sr hechas en biotitas, se les asigna una edad 20.9 ± 4 Ma, que los ubica en el Mioceno.

CUATERNARIO

Del Holoceno se diferenciaron tres depósitos sedimentarios: Aluviales y fluviales que se desarrollan en las planicies y cauces de los ríos y arroyos, constituidos por cantos rodados, gravas, arenas y limos; depósitos litorales que se formaron lo largo de la línea de costera conformados principalmente de arenas finas, bioclastos y limo que forman actualmente playas, sujetos a la acción de las mareas y niveles máximos actuales del mar. Por último, los depósitos de zona de inundación, representados por sedimentos palustres originados y expuestos en las zonas planas, lagunares y de inundación, a lo largo de la planicie costera, conformado principalmente de materia orgánica, limo, arcilla y arena fina de composición variable.

4.2 Geología estructural

La deformación dúctil se manifiesta como foliación que afecta a las rocas del Complejo Xolapa y del Terreno Juárez o Cuicateco, y milonitización que se observa en el Complejo Xolapa y en las rocas graníticas-granodioríticas del Batolito de Ayuta. La deformación frágil está representada por fallas normales y laterales que afectan a todas las unidades litoestratigráficas.

El dominio dúctil presenta foliación penetrativa con rumbos promedio de N40°W y N38°E en el Complejo Xolapa, mientras que en el subterreno Arco Chontal la dirección de la foliación es en promedio de N25°W y N18E. Se desarrolla milonitización a lo largo de la Falla Chacalapa, con desplazamiento lateral izquierdo y orientación E-W. El dominio frágil lo conforman sistemas de fallas normales que presentan direcciones al NW y NE, entre las que se cuentan La Iglesia, Morro Ayuta, Aguacate y Agua Caliente, Piedra Grande, La Joya 2, Tapanalá y La Zanja. Solo se observó la estructura Tepalcate, con orientación al NE y movimiento lateral derecho,

mientras que las de componente izquierda con orientación al NW son Mazcalco, Arenal y Astata; y las de dirección NE corresponden a Mecate, Los Macuiles, El Ciruelo, Piedra Tinaja y Zimatlán. El único lineamiento con rumbo NE-SW es El Potrillo. Se presentan también lineamientos curvos como Papalote 1 y Las Cuñas, asociados a cuerpos intrusivos (Carta Geológico-Minera Santiago AstataD15-A11. Escala 1:50,000. SGM, 2013).

Las rocas del Complejo Xolapa, comprenden diferentes episodios de deformación que se manifiestan por la presencia de foliación penetrativa con rumbos E-W y con echados al sur, pliegues intrafoliales, isoclinales, disarmónicos, zonas anastomosadas, boudinage, bandeamiento, lineaciones y otros indicadores cinemáticos que definen la dirección del movimiento

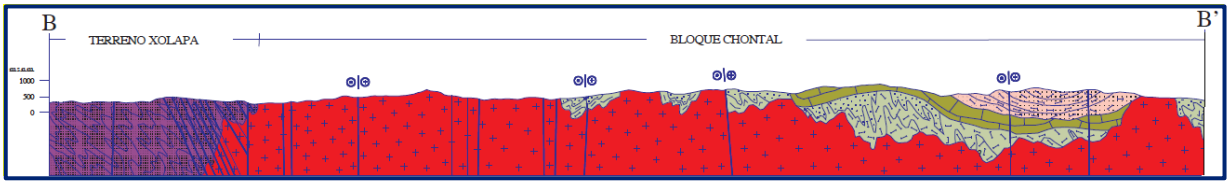
Regionalmente la estructura de mayor importancia es la Falla Chacalapa que representa uno de los contactos más interesantes entre los terrenos cristalinos del sur de México, es el contacto entre los terrenos Oaxaca y Xolapa. En la falla, las rocas de los complejos Oaxaqueño y Xolapa se confunden en un solo cinturón milonítico que tiene un espesor variable que varía de cientos de metros a varios kilómetros. El fechamiento isotópico (Rb-Sr), de uno de los plutones milonitizados permite interpretar una edad tentativa del Cretácico Tardío para la fase principal de la actividad de la falla (Ortega, G.F., et al., 1986). En su extremo hacia Puerto Escondido el contacto es interceptado por el poniente por el “Lineamiento Colotepec” (Ortega, G.F, 1990), que desplaza este límite hacia otra gran falla conocida como Juchatengo, desarrollada más al norte. La Falla Chacalapa es una estructura anastomosada desarrollada en el régimen dúctil que ha sido reactivada en régimen dúctil-frágil y actualmente se encuentra a nivel superficial en el régimen frágil. El estiramiento se observa claramente mediante “boudinage” o estrangulamiento de niveles anfibolíticos en gneises cuarzo-feldespáticos del Complejo Xolapa. Las fallas Pochutla y Figueroa son muy semejantes en sus características a la Chacalapa, por lo que se consideran del mismo sistema, así como las fallas Mixtepec y Limones, en las que se proponen reactivaciones bajo el régimen frágil.

4.3 Geología del subsuelo

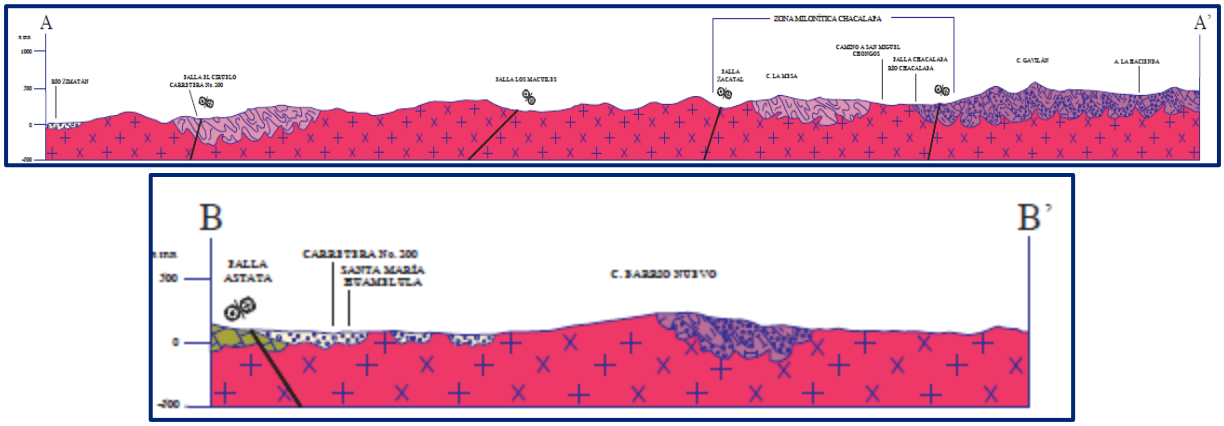
De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluvialesde granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación delosríos

Astata, Ayuta, Zimatlán y arroyos tributarios, así como depósitos lacustres, y conglomerados que conforman la planicie costera. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen algunas decenas de metros de espesor.

La porción inferior se aloja en la secuencia de rocas intrusivas y metamórficas, cuando se presentan alteradas y con permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas intrusivas y metamórficasal desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. La secuencia de rocas calcáreas cretácicas constituye un acuífero potencial, que puede presentar condiciones de semiconfinamiento o confinamiento debido cuando están sobreyacidas por lutitas y limolitas (Figura 3).



FUENTE: Carta Geológico-Minera E15-10-D15-1 "Juchitán" Escala 1:250.000 (SGM, 2000).



FUENTE: Carta Geológico-Minera Santiago Astata D15-A11 Escala 1:50.000 (SGM, 2013).

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Con base en la información geológica e hidrogeológica superficial y del subsuelo, recabada en el acuífero, así como lo observado en otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, 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 arcillas, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Astata, Ayuta, Zimatlán y sus arroyos tributarios, así como depósitos litorales y conglomerados que conforman la planicie costera. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región, principalmente mediante norias perforadas manualmente que sólo satisfacen las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas intrusivas y metamórficas, cuando se presentan alteradas y con permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de **confinamiento o semiconfinamiento**, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y areniscas.

5.2 Parámetros hidráulicos

No existe información disponible de pruebas de bombeo realizadas en aprovechamientos localizados en el acuífero. Sin embargo, se dispone de resultados de pruebas de corta duración realizadas tanto en etapa de abatimiento como de recuperación en los acuíferos vecinos Colotepec-Tonameca y Huatulco, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad que varían entre **1.0 x 10^{-3}** y **103.0 x10^{-3} m^2/s (86.4 a 8899 m^2/d)**. La conductividad hidráulica varía de **5.0 x10^{-5}** a **5.0 x10^{-3} m/s (4.3 a 432 m/d)**. 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; en tanto que los más bajos se relacionan con los sedimentos de granulometría más fina

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Para fines del balance, se adoptó un valor de 0.1.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con los registros históricos durante el periodo 2004-2019, 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 2011-2019 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 menos de 1 m en la zona costera hasta15 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la planicie costera y del cauce de los ríos Astata, Ayuta y Zimatlánhacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles, conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, menores de 3 m, se registran en la porción costera, en la zona que bordea a las lagunas y en el subálveo de los ríos; en tanto que las mayores profundidades, de 10 a 15 m, se presentan en la porción suroriental del acuífero, hacia los poblados Coyul, Tapanalá y Astata (Figura 4).

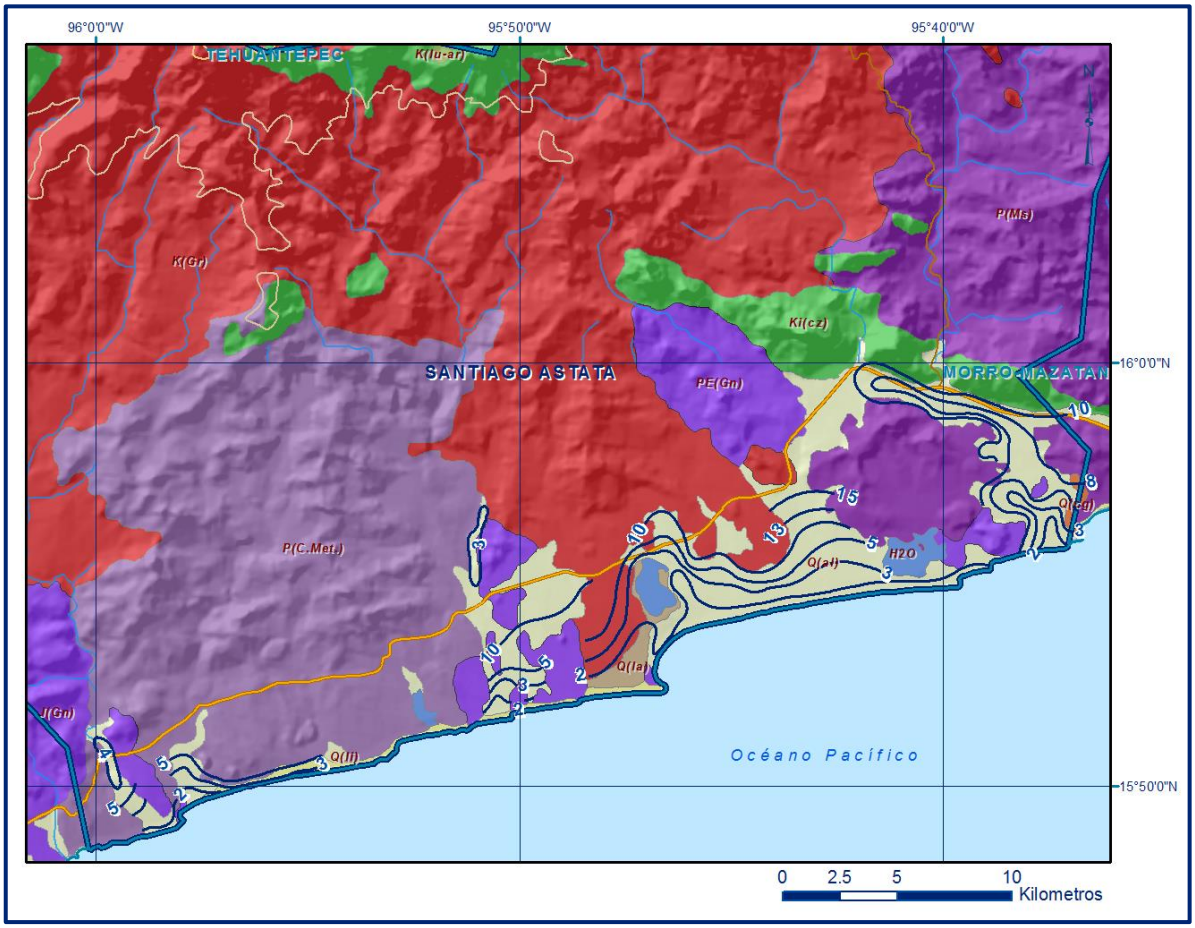


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

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 1 a 40 msnm, que se incrementan de la planicie costera y del cauce de los ríos Astata, Ayuta y Zimatlán, en dirección a los flancos de las sierras que delimitan los valles. Los valores más altos, 30 a 40 msnm, se registraron en el extremo sur oriental del acuífero, hacia los poblados Coyul, Tapanalá y Astata, desde donde descienden gradualmente hacia el sur y sureste por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la planicie costera y hacia las lagunas. Los valores más bajos de carga hidráulica, de 1 a 4 msnm, se presentaronen la planicie costera y en la parte baja del cauce de los ríos, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur y noroeste-sureste, paralela a la dirección del escurrimiento superficial (Figura 5).

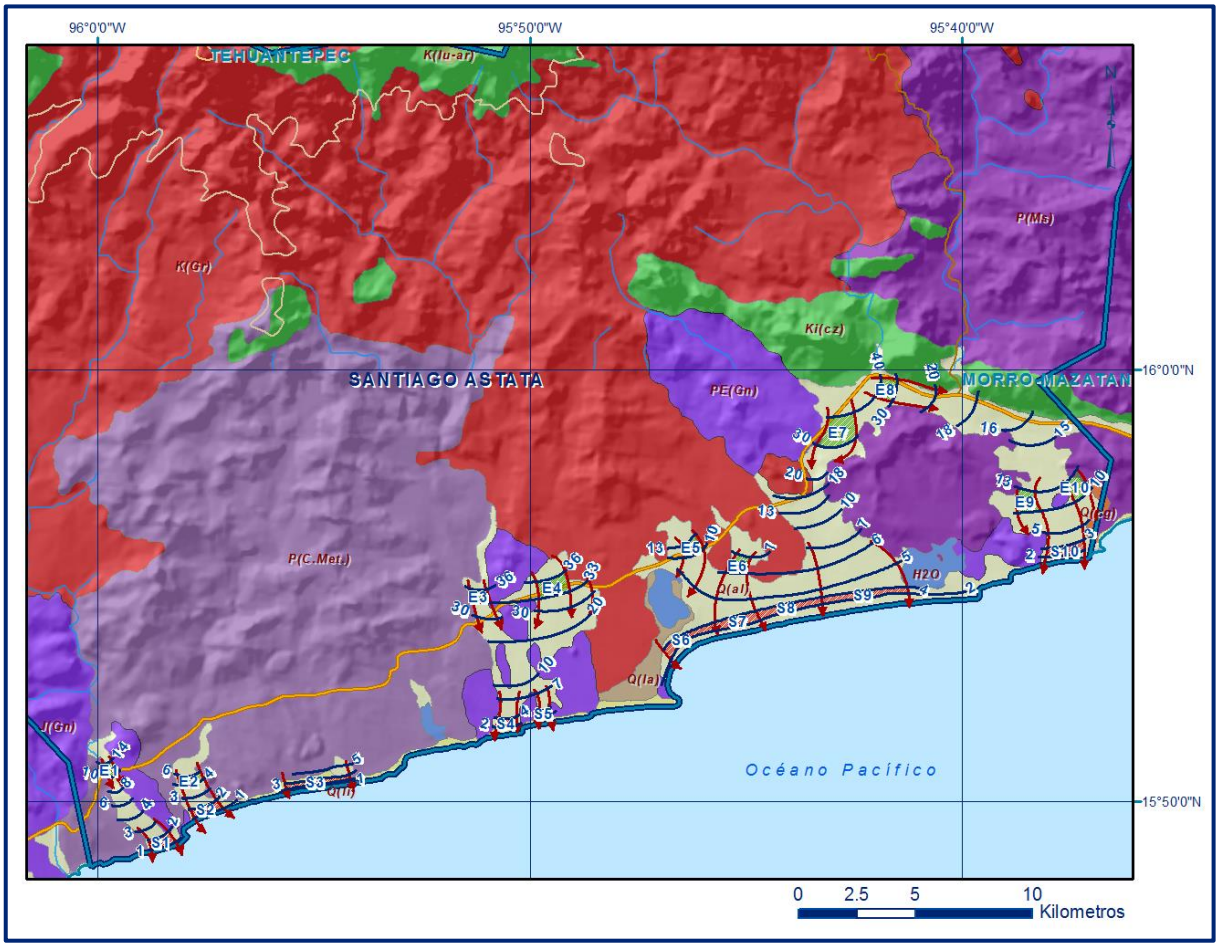


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2011-2019 registra valores tanto de abatimiento como de recuperación. Los primeros varían de 0.5a 1.0 m, es decir de 0.06 a 0.1 m anuales, con valores muy locales de 7 m, y se observaron en la porción suroriental del acuífero, hacia el poblado Astata y al sur de Tapanalá. Las recuperaciones varían de 1.0 a 4.0 m, que representan 0.1a 0.5 m anuales, y se registraron de manera local al sureste de Astata y en el subálveo del Río Ayuta. En la mayor parte de la zona de explotación los niveles del agua subterránea no presentan variaciones importantes en su posición (Figura 6).

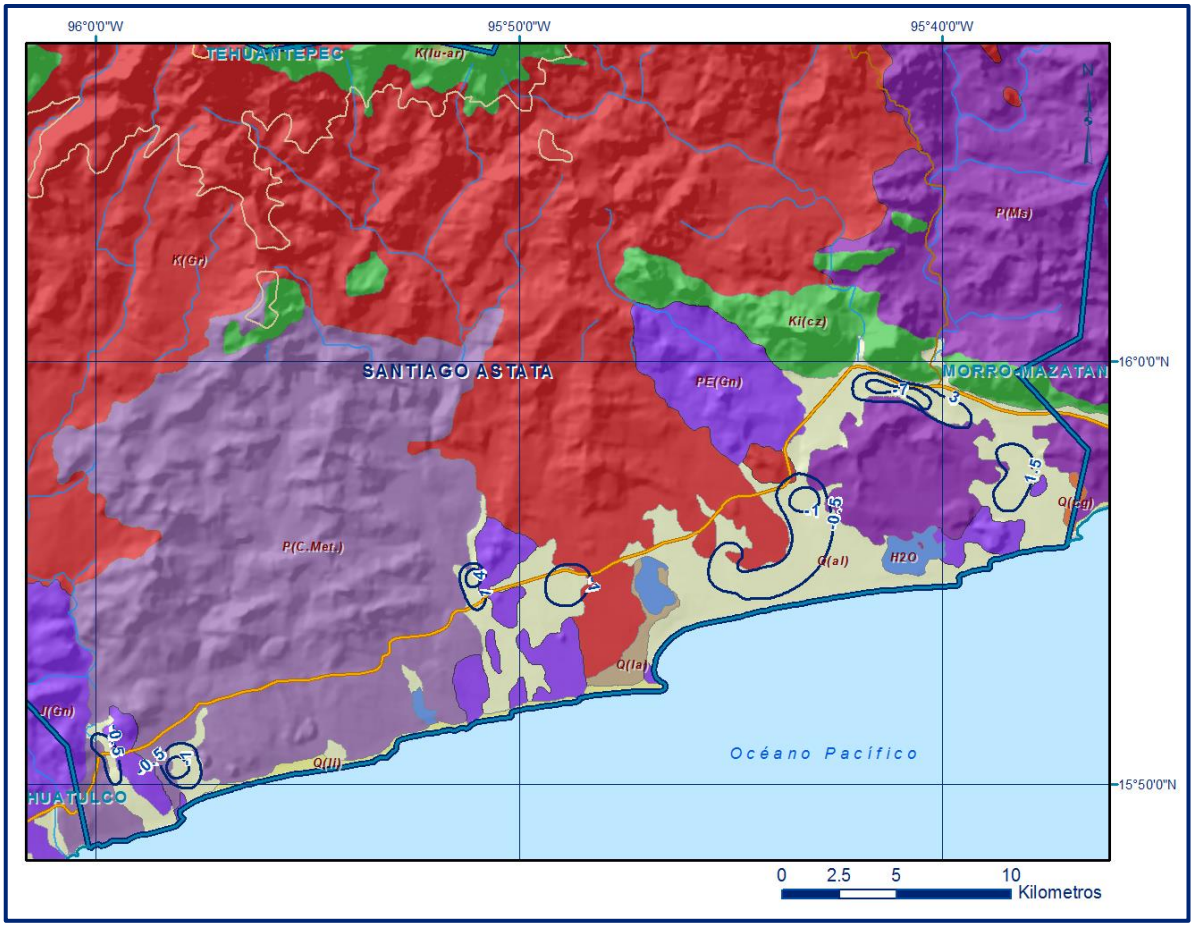


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2011-2019)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos presenta valores que varían de 130 a 370 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 ppm establecido en 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. 4 muestras presentaron concentraciones de fierro que sobrepasan el LMP de 0.3 mg/l que establece la norma mencionada y en 6 muestras se exceden el LMP de 0.15 mg/l en la concentración de manganeso.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica de manera general como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Asociation (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 220 a 650 μS/cm.

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 como de salinidad baja (C_1) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), lo que indica que es apropiada para su uso en riego sin restricciones. Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la bicarbonatada-cálcica-sódica, que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas calizas y volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se tiene registrado un volumen de extracción de **5.7 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022, de los cuales 0.4 hm^3 (7.0%) son para uso público-urbano y 5.3 hm^3 (93.0%) corresponden al uso agrícola,

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2011-2019, en un área de balance de **104 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). Debido a que los volúmenes de agua subterránea para uso púbico-urbano y agrícola son pequeños, se considera para fines del balance que la recarga incidental es despreciable.

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:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical
Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal
B: Bombeo
Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
ETR: Evapotranspiración
ΔV(S): Cambio en el volumen almacenado

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

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

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:

$$Q = T * B * i$$

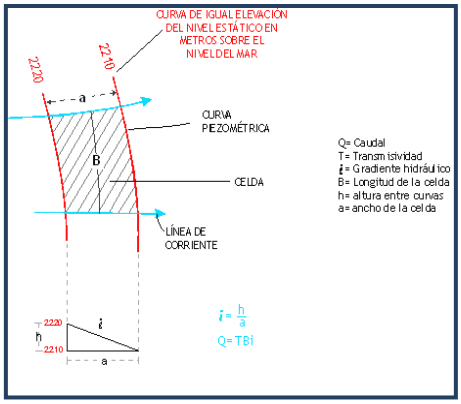
Donde:

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 **12.2 hm^3/año**.

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.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo 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	388	632	4	0.0063	0.0120	0.0295	0.9
E2	1046	376	2	0.0053	0.0100	0.0556	1.8
E3	721	538	3	0.0056	0.0080	0.0322	1.0
E4	1310	751	3	0.0040	0.0080	0.0419	1.3
E5	905	643	3	0.0047	0.0070	0.0296	0.9
E6	711	801	1	0.0012	0.0070	0.0062	0.2
E7	1280	1318	10	0.0076	0.0060	0.0583	1.8
E8	1000	700	10	0.0143	0.0080	0.1143	3.6
E9	860	960	3	0.0031	0.0070	0.0188	0.6
E10	850	980	3	0.0031	0.0007	0.0018	0.1
						TOTAL	**12.2**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros.

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 de elevación del nivel estático para el 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 **14.9 hm^3/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	1033	465	1	0.0022	0.0150	0.0333	1.1
S2	1250	318	1	0.0031	0.0100	0.0393	1.2
S3	2688	230	2	0.0087	0.0030	0.0701	2.2
S4	815	415	2	0.0048	0.0080	0.0314	1.0
S5	456	257	2	0.0078	0.0070	0.0248	0.8
S6	2415	278	2	0.0072	0.0050	0.0869	2.7
S7	1825	460	2	0.0043	0.0060	0.0476	1.5
S8	2716	330	2	0.0061	0.0040	0.0658	2.1
S9	3585	350	2	0.0057	0.0030	0.0615	1.9
S10	1600	400	1	0.0025	0.0030	0.0120	0.4
						TOTAL	**14.9**

7.2.2 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 28.1 °C y 942.0 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 898.6 mm anuales, como se muestra a continuación:

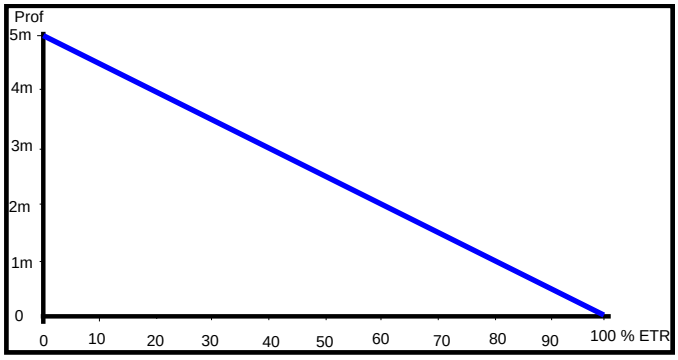
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) =	28.1		
P(mm) =	942	P^2 =	887364
L =	2111.90205	L^2 =	4460130.27
ETR (mm)	898.6		

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 = 20.6 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	1.0	0.8986	0.2	0.2
3 a 5	4	16.8	0.8986	0.2	3.0
2 a 3	2.5	19.9	0.8986	0.5	9.0
0 a 2	2	14.6	0.8986	0.6	7.9
3	3	1.3	0.8986	0.4	0.5
	Total	**53.7**			**20.6**

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **5.7 hm³ anuales.**

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2011-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy = 0.1se 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 es de -2.1 hm^3**,** es decir, un promedio anual de **-0.3hm^3.**

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2011-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	ΔV(S) (hm^3/año)
-0.5	-0.5	1.5	0.1	-0.1
-0.5 a -1	-0.8	13.8	0.1	-1.0
-1	-1.0	4.5	0.1	-0.4
4	4.0	0.4	0.1	0.2
1.5	1.5	3.5	0.1	0.5
3 a -7	-2.0	4.2	0.1	-0.8
-7	-7.0	1.2	0.1	-0.8
1 a 4	2.5	1.3	0.1	0.3
	TOTAL	**1.5**	**TOTAL**	**-2.1**
		Promedio anual		**-0.3**

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:

$$Rv = Sh + B + ETR - Eh \pm \Delta V(S)$$
$$Rv = 14.9 + 5.7 + 20.6 - 12.2 - 0.3$$
$$Rv = 28.7\ hm^3/año$$

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

$$R = Rv + Eh$$
$$R = 28.7 + 12.2$$
$$R = 40.9\ hm^3 anuales$$

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 **40.9 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprendida (DNC)

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

Para el caso del acuífero Santiago-Astata, su valor es **25.2 hm³ anuales**, de los cuales 14.9 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia la zona costera y 10.3 hm³ al 50% del volumen de evapotranspiración para protección de los ecosistemas costeros y ribereño de los ríos. Por lo tanto, **DNC= 25.2 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 **7’236,511 m^3 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 agua subterránea (DMA)

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

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

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 40.9 – 25.2 – 7.236511
DMA = 8.463489 hm^3 anuales

El resultado indica que existe un volumen disponible de **8’463,489 m^3** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

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, 2005. Actualización piezométrica del acuífero Colotepec-Tonameca, en el estado de Oaxaca. Realizado por BETSCO, S.A.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de aguas subterráneas en acuíferos del estado de Oaxaca. Realizado por la Universidad Autónoma Chapingo.

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

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1979. Estudio geohidrológico preliminar de la zona de Tehuantepec, Oaxaca. Realizado por Rocha y Asociados, S. A. de C.V. (ROASA).

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera E15-10 D15-1 “Juchitán”. Escala. 1:250.000.

Servicio Geológico Mexicano, 2013.Carta Geológico-Minera Santiago Astata D15-A11. Escala 1:50,000.