



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SAN CRISTÓBAL LAS CASAS (0712),
ESTADO DE CHIAPAS**

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	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia Fisiográfica.....	6
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía	11
4.2 Geología Estructural	15
4.3 Geología del subsuelo.....	16
5. HIDROGEOLOGÍA.....	17
5.1 Tipo de acuífero.....	17
5.2 Parámetros hidráulicos	17
5.3 Piezometría.....	18
5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	18
5.5 Comportamiento hidráulico	19
6. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	20
6.1 Entradas.....	21
6.1.1 Recarga vertical (Rv)	21
6.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	21
6.2 Salidas	21
6.2.1 Extracción por bombeo (B).....	21
6.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	21
7. DISPONIBILIDAD	22
7.1 Recarga total media anual (R)	22
7.2 Descarga natural comprometida (DNC)	22
7.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	23
7.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	23
8. BIBLIOGRAFÍA	24

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 San Cristóbal de las Casas, definido con la clave 0712 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la parte central del estado de Chiapas, y cubre una superficie aproximada de 1,552 km², se identifica con la clave Geohidrológica CHA012 (Figura 1).

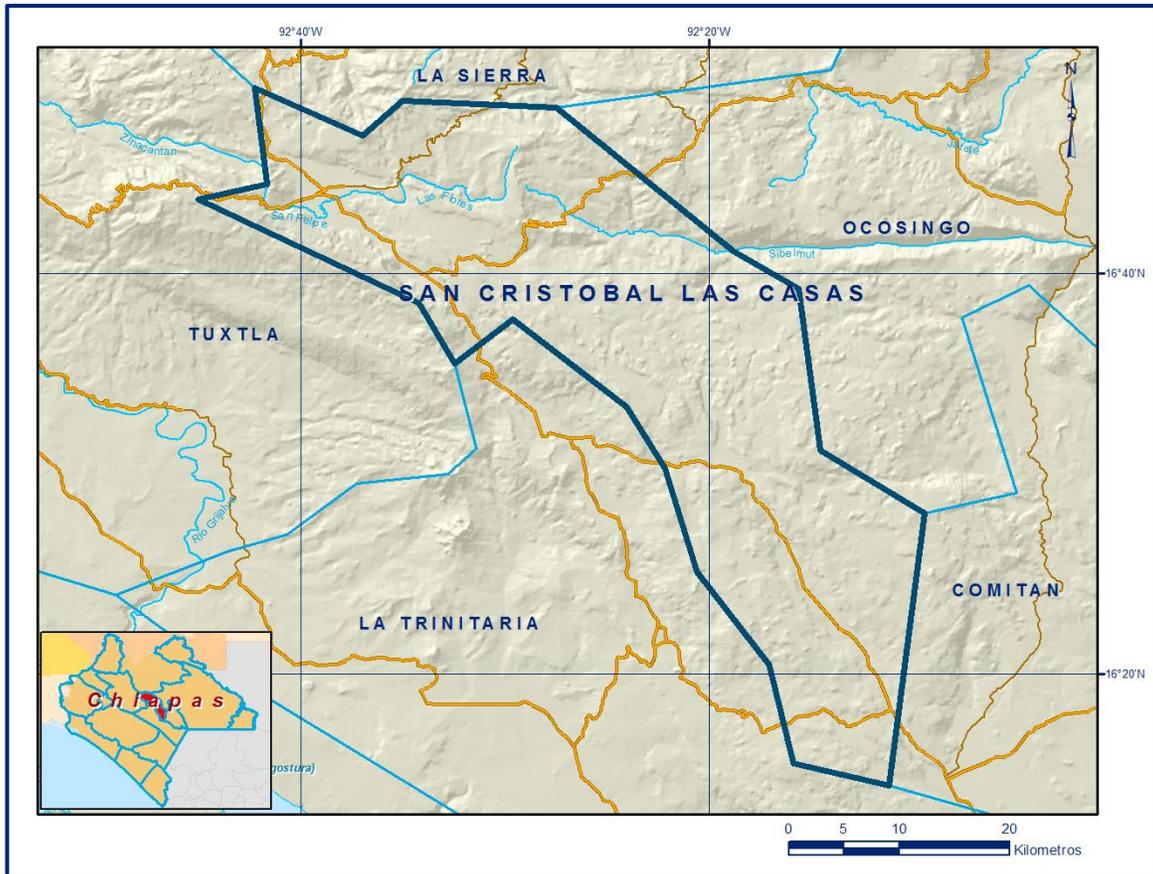


Figura 1. Localización del acuífero

El estado de Chiapas se localiza al sureste de la República Mexicana, limitado al sur por el Océano Pacífico, al oriente por la República de Guatemala, al norte por el estado de Tabasco y al poniente por los estados de Veracruz y Oaxaca. Cubre una superficie territorial aproximada de 70,254 km², ocupando el octavo lugar a nivel nacional.

El estado está conformado por 112 municipios y su población total asciende a 3,920,892 habitantes (INEGI, 2003). Los Municipios más importantes y donde se concentra la mayor población son: Tuxtla Gutiérrez, con el 10.8 % de la población total; Tapachula con el 6.8%; San Cristóbal de Las Casas con el 3.3%; Comitán de Domínguez con el 2.7%; Villa Flores y Palenque cada uno con el 2.2%, finalmente el municipio de Tonalá con el 2.0%, el resto de los municipios abarcan en conjunto el 70%.

Limita al norte con el acuífero La Sierra, al noroeste con los acuíferos Ocosingo y Comitán, al sur con el acuífero La Trinitaria y al noroeste con el acuífero Tuxtla. Geográficamente se localiza en la parte central del estado de Chiapas.

Geopolíticamente el acuífero abarca parcialmente los municipios de: Comitán de Domínguez, Amatenango, Chanal, Teopizca, Huixtán, San Cristóbal de Las Casas, Zinacantán, Chamula y Tenejapa.

El desarrollo económico de la región se fundamenta principalmente en las actividades relacionadas con el sector primario (agricultura y ganadería), destacando la ganadería dentro de las principales actividades a las que se dedica la población económicamente activa, la actividad que le sigue en importancia es la agricultura siendo ésta de régimen temporal en las zonas alejadas a los arroyos y ríos.

Dentro de los principales cultivos destacan el maíz, sorgo, frijol y en menor proporción las hortalizas.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0712 SAN CRISTOBAL LAS CASAS						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	92	11	13.0	16	14	24.3
2	92	15	53.4	16	15	31.7
3	92	17	5.3	16	20	27.5
4	92	20	36.5	16	25	4.0
5	92	22	10.9	16	30	15.3
6	92	24	3.6	16	33	18.8
7	92	29	37.9	16	37	42.7
8	92	32	28.0	16	35	31.2
9	92	34	13.4	16	38	32.3
10	92	45	16	16	43	40.9
11	92	41	39.9	16	44	29.1
12	92	42	14.4	16	49	15.3
13	92	36	57.5	16	46	54.5
14	92	35	0.6	16	48	37.3
15	92	27	30.1	16	48	17.6
16	92	18	49.4	16	41	7.0
17	92	15	38.7	16	39	13.9
18	92	14	35.5	16	31	8.8
19	92	9	29.5	16	28	0.5
1	92	11	13.0	16	14	24.3

1.2. Situación Administrativa del acuífero

Administrativamente los acuíferos del estado de Chiapas se encuentran dentro de la región hidrológico-administrativa número XI Frontera Sur, por lo que el acuífero Cintalapa pertenece a esta misma.

La Región XI Frontera Sur se localiza en el sureste de la República Mexicana y comprende los estados de Chiapas y Tabasco, tres municipios de Oaxaca (San Pedro Tapanatepec, Chahuites y San Francisco Ixhuatán) y el municipio de Palizada en Campeche. Su extensión territorial es de 103,480 Km² y representa el 5.3% del territorio nacional. Sus coordenadas extremas son las siguientes: al norte los 18°39' y al sur los 14°32' Latitud Norte; al extremo oriente se ubica en los 90°22' y al oeste en los 94°38'. Cuenta con abundantes recursos naturales y una compleja orografía que ha dificultado a través del tiempo su integración al desarrollo del resto del país.

Se encuentra en vigor en la zona el decreto de veda tipo I "Río Grijalva", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de octubre de 1957. No se tiene conocimiento de organizaciones de usuarios de agua subterránea, ni de distritos o unidades de riego, probablemente debido a la abundancia de agua subterránea, como se observa en la figura No. 3, la zona de veda existente no abarca la zona que pertenece a El acuífero.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. La extracción de agua subterránea en el acuífero es de 0.52 Mm³ al año, el cual es utilizado totalmente en la agricultura, de acuerdo con los datos existentes en la Gerencia de Aguas Subterráneas.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En esta zona solo se tiene el registro de informes de carácter geológico a nivel regional, donde se hace mayor énfasis a las cuestiones estructurales, realizado por personal de PEMEX, dentro del programa de exploración de la zona Sur. Por otra parte, se pudo constatar que la zona no cuenta con estudios de carácter geohidrológico, siendo los más cercanos aquellos que se realizaron en la zona de Tuxtla, al noroeste de la zona.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

El estado de Chiapas muestra en su expresión superficial relieves que van desde el nivel del mar en la Costa de Chiapas, hasta elevaciones abruptas de 4,000 metros sobre el nivel del mar (msnm) en las Montañas del Norte y Sierra Madre de Chiapas. De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas de E. Raíz (1954 y 1964), el estado de Chiapas se encuentra dentro de las provincias fisiográficas siguientes: Cordillera Centroamericana, Llanura Costera del Golfo de México y Tierras Altas de Chiapas y Guatemala.

La Región Tierras Altas de Chiapas y Guatemala enmarca casi la totalidad del estado, limita al norte con las provincias de la Planicie Costera del Golfo y la de Yucatán; al oeste con la Provincia de la Sierra Madre del Sur; internándose al sur en la República de Guatemala. Ésta, a su vez, se conforma por las siguientes subprovincias: La Planicie Costera del Pacífico, La Sierra de Chiapas, La Depresión Central, Los Altos (Meseta de Chiapas) y las Sierras Plegadas del Norte.

Específicamente la zona donde se encuentra el acuífero se encuentra dentro de la subprovincia denominada Altos de Chiapas, la cual se localiza al noroeste de la Planicie Costera del Pacífico y se denota como una gran estructura que se levanta abruptamente con respecto a las tierras bajas, con orientación noroeste-sureste.

La subprovincia de los Altos de Chiapas (Meseta de Chiapas), está constituida por rocas cretácicas compuestas principalmente por lutitas, limolitas y areniscas, así como lavas y tobas de composición andesítico-basáltica.

3.2 Clima

Geográficamente el estado de Chiapas queda comprendido dentro de la zona tropical, presentando de acuerdo con su configuración orográfica una gran variedad de climas que van desde el templado subhúmedo a cálido húmedo con lluvias en todo el año. Con el fin de conocer las características atmosféricas de la zona de San Cristóbal de Las Casas, se recopilaron en el Servicio Meteorológico Nacional los datos climatológicos de las estaciones que se encuentran en la zona. Particularmente dentro del acuífero no se cuenta con estación Climatológica, sin embargo, se consideraron las estaciones El Burrero (1960-2000), localizada en la comunidad Ixtapa, y la estación La Angostura (1962-1999) ubicada en las inmediaciones del acuífero.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, la temperatura media anual oscila entre los 17 y los 27 °C, exhibiendo sus valores más bajos en los meses de diciembre y enero con valores de 17 y 18 °C, registrados en la estación El Burrero, mientras que los valores más altos se observan durante los meses de abril y mayo con valores de 28 °C, registrados en la estación La Angostura. siendo mayo el mes más caluroso.

La precipitación media anual de la región es superior a los 1,430 mm, por arriba del promedio nacional. La distribución estacional muestra que, durante la temporada de lluvias, que dura de 4 a 5 meses, de Junio a Septiembre-Octubre, se concentra la mayor parte de la precipitación, alcanzando valores mensuales de hasta de 290 mm, mientras que durante el estiaje la lluvia disminuye considerablemente hasta valores apenas de los 17 mm, identificados en el primer trimestre.

Con respecto a la evaporación se puede observar en las estaciones que durante todo el año existe una continua evaporación, con valores acumulados al año que superan los 1,800 mm, registrados en la estación Angostura, y valores mensuales que van de los 70 hasta los 120 mm. Con base en los datos climatológicos y la clasificación de INEGI, se puede concluir que en la zona donde se localiza el acuífero se presentan los climas: cálido subhúmedo con lluvias en verano, semicálido subhúmedo con lluvias en verano y cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, con valores de precipitación entre 1,000 y 2,000 mm.

3.3 Hidrografía

La hidrografía del estado y de todo el sureste mexicano es un sistema muy complejo, por sus dimensiones y por sus características superficiales topográficas muy accidentadas en las partes altas. En el estado de Chiapas se complementa la Cuenca Hidrológica del Grijalva-Usumacinta con el río Mezcalapa que nace en la vertiente del macizo de Chiapas en su porción noreste, la que está integrada por una gran cantidad de tributarios que se abastecen principalmente del río Grande de Chiapas y aguas provenientes de la Presa Netzahualcóyotl, para abandonar el estado con dirección al Golfo de México.

Las cuencas del Usumacinta y del Grijalva se originan en las montañas de Los Altos, en Guatemala, muy cerca una de la otra, a continuación, se describe la zona correspondiente a la cuenca del Grijalva, que es donde se encuentra la zona de estudio.

El río Grijalva nace en Huehuetenango, Guatemala, para luego fluir entre las montañas Chiapanecas, al llegar a los límites de Tabasco, cambia su nombre a Mezcalapa, para después de recibir el tributo del Río Pichucalco o Ixtacomitán, mientras que el río Mezcalapa se enriquece con el río La Sierra, nacido en la meseta central de Chiapas, y adopta nuevamente el nombre de Grijalva; es así como el Grijalva, ya muy enriquecido, llega a Villahermosa, para seguir su curso rumbo al mar.

Todavía en ese trayecto final recibe la aportación de los ríos Chilapilla y Chilapa, que son los dos brazos del río Tepetitán o Tulijá, el último de los grandes caudales que se incorporan al Grijalva, procedente también de Chiapas. Llama la atención que mientras los grandes ríos se encuentran gobernados por los rasgos estructurales, las ramificaciones y corrientes tributarias tienen un control topográfico.

Particularmente, dentro de la zona de San Cristóbal se destaca el río La Concordia, el cual tiene su origen en la sierra de Chiapas y está formado por cuatro subafuentes que se unen en forma de abanico, después de 25 km de recorridos independientes y constituyen así el río Custepeques, que fluye hacia el noreste. Hacia la parte media del recorrido de este río se le incorpora un afluente más llamado arroyo La Concepción, en este punto existe un cambio de dirección hacia el este, donde cambia de nombre la corriente a río La Concordia.

De acuerdo con la división territorial en regiones Hidrológicas, el acuífero se localiza dentro de la denominada Región Hidrológica No. 30, Grijalva- Usumacinta. Esta región es la más extensa del estado de Chiapas, abarca la porción central de la entidad y cubre aproximadamente un 80% del territorio estatal; en ella se encuentran las cuencas de los ríos más importantes de la zona, que drenan la superficie de la entidad directamente al Golfo de México. Se encuentra limitada al Sur por la Región Hidrológica No. 23 Costa de Chiapas, y al norte por la Región Hidrológica No. 29 Coatzacoalcos.

La Región Hidrológica No. 30, se subdivide en tres subregiones que son: la 30-A, Alto Grijalva; la 30-B, Bajo Grijalva y la 30-C, Usumacinta. De acuerdo con lo anterior, se puede observar que el acuífero se encuentra incluida dentro de la Subregión denominada Alto Grijalva 30-A.

El Alto Grijalva se subdivide en dos principales subregiones: la conocida como Alto Grijalva, que va desde la frontera con Guatemala hasta la cortina de la presa de La Angostura y Medio Grijalva que comprende desde la presa La Angostura hasta la presa Malpaso.

La cuenca a la que pertenece el acuífero es la denominada Río Grijalva-Tuxtla Gutiérrez, la cual cubre una superficie aproximada del 22.3% del territorio total del estado de Chiapas. Destacando en esta la presencia de los ríos Ningunillo, Santo Domingo, Santa Catarina, La Venta y parte del Río Grijalva, a partir de la presa La Angostura.

3.4 Geomorfología

La zona presenta, geomorfológicamente, al norte y noroeste del área flancos de estructuras anticlinales y sinclinales, destacando el Sinclinal Copoya, con flancos escarpados; algunas de estas estructuras están cortadas por accidentes estructurales que también afectan parte de la sierra de Chiapas, esta última se presenta dentro del ciclo geomorfológico en una etapa de juventud, en donde los ríos y arroyos corren por valles angostos y profundos esculpiendo las formas de relieve abrupto y separando los valles por medio de angostos cañones.

Hacia la parte noreste de la zona, al pie de la Sierra Los Altos de Chiapas en donde afloran rocas ígneas extrusivas, los rasgos geomorfológicos se manifiestan como cerros con elevaciones considerables y pendientes escarpadas, afectadas por un drenaje de tipo radial.

Mientras que hacia la porción sur-occidental del área, en donde afloran las rocas más antiguas y el macizo granítico de Chiapas, la meteorización que ha producido el paso del tiempo ha sido intensa, dando lugar a la formación de suelos lateríticos y una topografía con cerros y montículos sensiblemente ondulados.

4. GEOLOGÍA

El marco geológico de Chiapas está conformado por litologías muy complejas con variaciones espacio-temporales muy marcadas en su distribución, las cuales cubren desde el Paleozoico hasta el Holoceno (Figura 2).

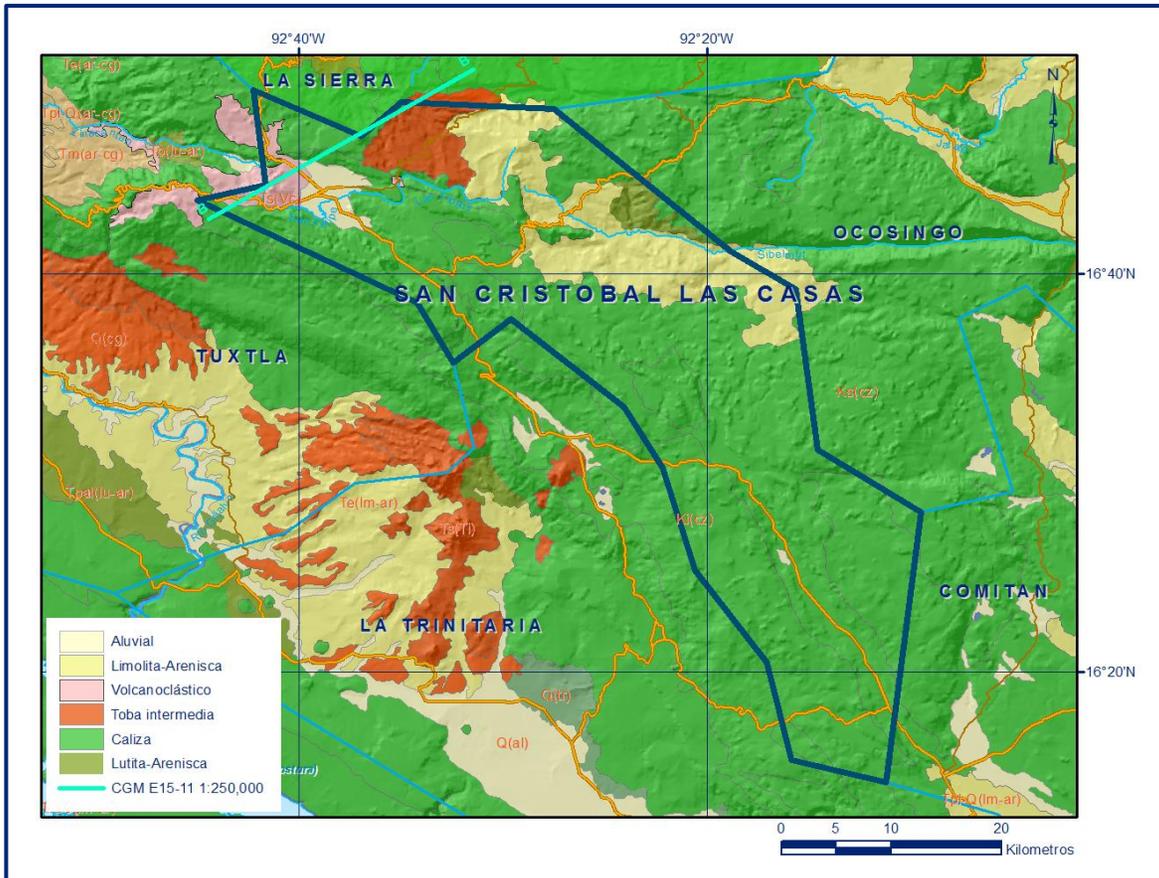


Figura 2. Geología general del acuífero

La base de la columna litoestratigráfica aflorante en el territorio Chiapaneco es de edad proterozoica cuyas exposiciones se restringen a pequeños afloramientos expuestos hacia la zona costera. Cubriendo de manera discordante a las rocas basales, existen también rocas Paleozoicas representadas por una serie detrítica perteneciente a las formaciones Paso Hondo, Vainilla y Grupera. Tales rocas se encuentran afectadas por intrusiones plutónicas que pertenecen al Batolito de Chiapas, lo que geográficamente se denomina como macizo granítico de Chiapas.

Cubriendo a la secuencia antes descrita, se tiene el depósito de rocas mesozoicas marinas representadas por una secuencia detrítico-calcareá que va del Triásico-Jurásico al Cretácico Superior, representada por las formaciones Todos Santos, Mogoñe, San Ricardo, Chinameca, Grupo Sierra Madre, Ocozocoautla y Méndez, las cuales afloran principalmente en la porción centro septentrional de la entidad, constituyendo zonas montañosas abruptas que fisiográficamente se conocen como Sierra Madre Oriental.

Sobre la secuencia de rocas mesozoicas se encuentra un paquete de rocas cenozoicas cuyo rango de depósito abarca del Paleoceno (Formación Soyaló) al Plioceno (Formación Tres Puentes). Las rocas paleocénicas son de origen marino y constituyen depósitos rítmicos tipo flysch.

Por su parte, las rocas eocénicas son de naturaleza mixta (continental y marina), representan capas rojas en el límite con el Oligoceno marino, cuyas rocas están representadas por calizas (Formación Macuspana) y rocas detríticas (Formación La Laja), mismas que afloran principalmente hacia el oriente del estado.

Por su parte, las rocas del Mioceno son de origen marino y están conformadas por una serie arcillo-calcárea representada por las Formaciones Encanto, Amate Inferior y Superior, Tuliján y Belem, que afloran en la porción septentrional del estado.

Finalmente, las rocas del Plioceno-Holoceno están constituidas por depósitos de limos, arenas, arcillas y depósitos piroclásticos derivados de las actividades de los volcanes Chichónal y Tacaná, así como por materiales aluviales y suelos residuales.

4.1 Estratigrafía

En la zona en la que se ubica el acuífero afloran rocas sedimentarias e ígneas. A continuación, se describen las principales unidades litológicas reconocidas en la zona de San Cristóbal Las Casas, de la más antigua a la más reciente:

CRETÁCICO INFERIOR

Formación San Ricardo. Corresponde a sedimentos que afloran sobre la Carretera Panamericana al noreste del puente sobre el río Las Flores, presentan variaciones desde calizas de plataforma interna a clásticos terrígenos de ambiente litoral, identificados en las inmediaciones de la localidad de Cintalapa.

El espesor de esta formación disminuye hacia el sureste hasta llegar a una zona de acuñamiento total al este de Tuxtla Gutiérrez, donde el Cretácico Medio descansa directamente sobre el granito (Basamento).

Cretácico Medio.

Formación Sierra Madre. Se ha dividido en dos Miembros: Cantelhá y Jolpabuchil, restringiendo el miembro Cantelhá al Cretácico Medio y Jolpabuchil al Cretácico Superior.

El nombre Cantelhá fue aplicado a un cuerpo de dolomitas que afloran sobre el río Cantelhá, mientras que el término Jolpabuchil se aplicó a una secuencia de calizas con pedernal depositadas en mares abiertos, posiblemente de plataforma externa.

Miembro Cantelhá. Con un espesor de 420 metros, esta es la unidad estratigráfica más desarrollada dentro de la sierra, aflora en una franja orientada de NW-SE a lo largo del homoclinal de la sierra y en las culminaciones de las estructuras del altiplano.

Está constituida por dolomitas con intercalaciones de calizas; estas intercalaciones permiten suponer un ambiente de depósito de plataforma interna de baja energía. Le subyace a las calizas Cintalapa y cubre en concordancia al Cretácico Inferior.

Las Calizas Cintalapa afloran desde el río Chalchijapan, al noreste de Tuxtla, hasta la frontera con Guatemala, presenta un espesor promedio de 750 metros, los cuales fueron medidos al norte del poblado Cintalapa.

Se caracterizan por una estratigrafía bien definida con intercalaciones de dolomita y calizas dolomíticas, las cuales se hacen más abundantes hacia el oriente de Tuxtla Gutiérrez.

Por sus características litológicas se puede inferir que las Calizas Cintalapa se depositaron en un ambiente de plataforma, de escasa profundidad, más somera al este y noroeste de la actual ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

Miembro Jolpabuchil. Se encuentra constituido por calizas con estratificación media a delgada, con la presencia de bandas y nódulos de pedernal con un espesor promedio de 190 metros hasta alcanza los 1,400 metros identificada al sur de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, esta unidad se encuentra aflorando en los alrededores de Tuxtla Gutiérrez, Chicoasén, Chiapa de Corzo y San Cristóbal de Las Casas.

CRETÁCICO SUPERIOR

Brechas Lomas Tristes. Yace en discordancia sobre la Formación Chinameca, está constituida por brechas y conglomerados con fragmentos de caliza del Cretácico Medio, que se hacen más finos a medida que son más jóvenes, presentando dos ciclos de depósito separados por un horizonte de areniscas finas e intercalaciones de lutitas. La estratificación es mala en su base, donde los sedimentos son más gruesos, pero mejoran hacia arriba hasta alcanzar los estratos de areniscas, para tornarse nula al iniciar otro ciclo sedimentario de clastos gruesos.

Formación Méndez. Constituida por estratos de margas, lutitas y una alternancia de lutitas y areniscas, esta formación sólo se encuentra en la porción occidental de la sierra, entre el vaso de la presa Netzahualcóyotl y el río Chalchijapa donde afloran lutitas de estratificación delgada que alternan con areniscas de grano fino.

La base del Cretácico Superior está formada por una brecha de fragmentos de calizas que gradualmente cambian a areniscas de grano fino. Sobre la brecha se depositó una secuencia de margas y areniscas bien estratificadas con capas de 10 a 30 cm. de espesor.

Le siguen margas de apariencia laminar, sobre las cuales existe una alternancia rítmica de margas y areniscas, coronadas por un conglomerado formado por fragmentos de calizas.

La Formación Méndez, al igual que el resto de las formaciones del Cretácico Superior, yace en discordancia sobre el Cretácico Medio y en el caso particular del área comprendida entre Malpaso, Río Nanchital y río Playas, reposa directamente sobre el

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Ocozocoautla. Designa al miembro arenoso conglomerático que aflora al W del poblado del mismo nombre. Al oriente de éste, aflora una secuencia sedimentaria terrígena cuya característica principal es la gran cantidad de cambios laterales que presenta. Descansa sobre las calizas de la Sierra Madre, en su parte inferior se presentan gravillas que subyacen a 190 metros de areniscas calcáreas, bien estratificadas; sobre éstas se presenta un espesor de 140 metros de lutitas arenosas con intercalaciones de areniscas calcáreas y calizas arenosas en capas de 10 a 20 cm. de espesor.

Dentro de la serie Ocozocoautla se identificó en su cima un cuerpo de 60 metros de areniscas calcáreas; así mismo, cabe señalar que hacia la localidad de Tuxtla Gutiérrez se presenta una interdigitalización de los depósitos de la Formación Angostura con los de la Formación Ocozocoautla, que se ha logrado identificar al oeste de la localidad de San Cristóbal de Las Casas.

Se le denomina **Formación Angostura** a la secuencia de sedimentos del Cretácico Superior que afloran en la depresión central y en el altiplano Chiapaneco, el nombre se toma de una localidad situada al SE de Tuxtla Gutiérrez en las márgenes del Río Grijalva. Esta formación aflora en la depresión central, abarcando parte de la zona de San Cristóbal Las Casas, desapareciendo hacia el noroeste del estado.

ROCAS CENOZOICAS

La Era Cenozoica estuvo enmarcada por el Macizo de Chiapas y la Plataforma de Yucatán entre las cuales evolucionó la Cuenca Terciaria del Sureste; los tiempos paleocénicos se iniciaron con un ciclo de sedimentación de carácter terrígeno sinorogénico que concluye al término del Oligoceno, por la reactivación de una nueva etapa de tectonismo.

Dichos sedimentos por lo general presentan un contacto de tipo discordante con los depósitos del Cretácico, representados por paquetes de brechas de matriz arenosa que empaquetan fragmentos de rocas cretácicas.

La Formación Lacandón hacia el sureste del estado se manifiesta constituida en su base por brechas con matriz calcárea-arcillosa, empaquetando fragmentos de calizas cretácicas. El ambiente que generó este depósito varió de aguas someras hacia la parte sur y de aguas profundas hacia el norte donde es nombrada Formación Sepur.

Durante el Eoceno y por efectos de la manifestación de esfuerzos compresionales acompañados de levantamientos corticales, se generan al sur de la sierra de Chiapas depósitos de sedimentos de ambiente continental conformados por lutitas y areniscas alternando con capas de conglomerado.

En conjunto esta unidad presenta un espesor total de 600 metros, y se conoce como Formación El Bosque.

Esta formación hacia la porción central de la sierra de Chiapas se interdigitaliza con sedimentos de terrígenos y carbonatos depositados en un ambiente de aguas marginales-litorales a los que se le llama Formación Lomut. A fines del Eoceno e inicios del Oligoceno se manifiesta una etapa de estabilidad tectónica que genera hacia la porción oriental de la sierra de Chiapas un “hiatus” sedimentario; mientras que hacia la porción central se generan depósitos de carbonatos de ambiente somero con el desarrollo de arrecifes, caracterizados por alternancias de calizas, brechas y lutitas arenosas, que en conjunto se denominan Formación Mompuyil.

Para el Mioceno existe una marcada inestabilidad tectónica manifestada por una regresión general de aguas marinas, como efecto del levantamiento de la sierra de Chiapas, generando grandes discordancias.

Para esta época se genera una cuenca somera en la Sierra de Chiapas, mientras que hacia el sureste se tienen facies palustres, litorales, deltáicas, lagunares y aluviales, en tanto que hacia la cuenca terciaria prosigue el depósito de sedimentos de aguas profundas.

El levantamiento de la sierra tuvo su máximo desarrollo en esta época, por ello durante el Plioceno y Pleistoceno la morfología de la zona no sufrió alteraciones importantes hasta la actualidad.

4.2 Geología Estructural

En respuesta a los efectos tectónicos acaecidos en el estado de Chiapas se formaron, por efecto de diversas deformaciones, provincias de carácter morfotectónico cuyos estilos son marcadamente diferentes.

La combinación de dichos efectos del tectonismo y en especial los que han actuado en la Sierra de Chiapas, dieron origen a la formación de cinco provincias de carácter morfotectónico cuyos límites se han fijado con base en trabajos realizados por geólogos de PEMEX.

Particularmente la zona donde se localiza el acuífero se encuentra en la denominada Provincia de Fallas de Transcurrencia, conocida también como Fosas y Pilares, que comprende las áreas de Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de Las Casas.

En dicha región se distinguen grandes lineamientos hasta de 200 Km de longitud que señalan el paso de las fallas que dan lugar a pilares (horts) armados por rocas carbonatadas cretácicas y fosas (grabens) azolvados con terrígenos principalmente terciarios.

En todos los casos las fallas están orientadas WNW-ESE, estructuralmente pertenecen al sistema de fallas de corrimiento horizontal en el que se identifican dos subsistemas. La porción occidental presenta una orientación noroeste a sureste, se extiende desde la presa de Malpaso hasta Ixtapa, está conformado por bloques vasculados y desplazados uno con respecto del otro, lo que dio origen a la formación de fosas tectónicas. Esta provincia alberga a las fosas denominadas Fortuna, Malpaso e Ixtapa, que se encuentran intensamente plegadas por efecto de las cabalgaduras de los pilares.

En la Fosa de Ixtapa, al NW de San Cristóbal de Las Casas, se aprecia que los pilares constituidos por roca caliza de edad cretácica que enmarcan la fosa comprimieron los sedimentos miocénicos alojados en ella, e incluso se advierte que las fallas tienen una actitud de tipo inverso. Este fenómeno se acentúa al WSW de San Cristóbal de Las Casas al desaparecer completamente la Fosa de Ixtapa, bajo los bloques de calizas y dolomitas cretácicas que las limitan.

4.3 Geología del subsuelo

Con base en la información recopilada se puede deducir que el acuífero se desarrolla principalmente sobre las márgenes de las principales corrientes donde se han desarrollado terrazas de geometría angosta principalmente constituidas por gravas y arenas, mientras que en las zonas de inundación se encuentran básicamente materiales limo-arenosos.

Esta unidad hidrogeológica se encuentra limitada por elevaciones topográficas principalmente de rocas calcáreas y conglomerados, con elevaciones de hasta 200 metros con respecto al nivel del valle; mientras que subterráneamente una secuencia de rocas calcáreas conforma su basamento. El acuífero en explotación se encuentra alojado en los materiales granulares constituidos, principalmente por gravas gruesas, arenas gruesas a finas, arcillas, limos y fragmentos de rocas calcáreas, que por sus características litológicas conforman un acuífero de tipo libre con un espesor promedio de 15 metros, y en algunas zonas alcanza hasta 50 metros.

El material sobre el que se desarrolla es producto de la erosión e intemperismo de las rocas existentes, dichos materiales presentan una buena permeabilidad; no obstante, la alteración de estas rocas ha generado el desarrollo de materiales limo-arcillosos, que le confieren cierta impermeabilidad.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información existente, el acuífero en explotación se encuentra alojado en los materiales clásticos no consolidados, de origen sedimentario que por sus características litológicas conforman un acuífero de tipo libre de espesor variable. Litológicamente pertenece a la unidad de depósitos continentales cuaternarios que se encuentran alojados en las inmediaciones de los ríos Amarillo y Grijalva, constituidos por arcillas, limos, arenas y gravas, desarrollando terrazas de geometría angosta.

El espesor de esta unidad es limitado, con un promedio de 5 a 17 metros y un espesor máximo de 50 metros, medidos al norte de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, por lo que se puede deducir que en general esta secuencia no constituye un acuífero de importancia, destinado básicamente para abastecer las necesidades de uso doméstico de comunidades rurales, por medio de excavaciones poco profundas y medios mecánicos de extracción.

Su principal fuente de recarga es la precipitación, no obstante, también captan aguas que provienen lateralmente de las aportaciones de rocas permeables localizadas en las partes topográficamente más altas, a través de los depósitos de talud y pie de monte.

5.2 Parámetros hidráulicos

Datos básicos para cuantificar la disponibilidad de agua subterránea y conocer el comportamiento de un acuífero, son los relativos a las propiedades hidráulicas del mismo, representadas por los coeficientes de permeabilidad, transmisividad y almacenamiento. Los estudios anteriores no han realizaron pruebas de bombeo y/o estimaciones de los parámetros hidráulicos; es por esto que resulta muy aventurado señalar los parámetros hidráulicos que tienen actualmente los acuíferos de la región debido a lo escaso de la información existente

No obstante, con base en consideraciones acerca del tipo y granulometría del acuífero, donde predominan los rellenos de material clástico de grano fino a medio, y tomando en cuenta que el acuífero es de tipo libre, se puede considerar que su coeficiente de almacenamiento es equivalente a su rendimiento específico, el cual varía en el rango de 0.15 a 0.3.

5.3 Piezometría

De acuerdo con la información existente, los niveles piezométricos se encuentran entre 4 y 15 metros de profundidad, explotándose el acuífero principalmente por medio de aprovechamientos de tipo noria.

No se cuantificó el total de aprovechamientos existentes dentro de la zona, por lo que su extracción total se desconoce.

Es importante señalar que en esta unidad geohidrológica no existe información piezométrica que permita elaborar los planos de configuración del nivel estático; sin embargo, la escasa información regional recabada señala que los niveles del agua subterránea se han mantenido estables.

Por otra parte, la abundancia de agua superficial hace que las fuentes de agua subterránea sean de poco interés en cuanto al monitoreo piezométrico.

5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Aunque se cuenta con escasos datos hidrogeoquímicos, en cuanto a la calidad del agua de los acuíferos, se considera que es apta para todo uso, cumpliendo con las normas de calidad establecidas para consumo humano. Sin embargo, no se descarta la posible contaminación antropogénica debido a la profundidad somera a la que se encuentra el nivel freático, la cercanía de los aprovechamientos a los núcleos de población, así como a las corrientes superficiales, las cuales en su mayoría actúan como cuerpos de captación de descargas de aguas residuales.

El tipo o familia de agua identificada, está en relación directa con la litología de la zona, en donde predominan las rocas de tipo granítico, en general las aguas presentan bajo contenido de sales lo que ratifica la poca disolución de las rocas por las que circula el agua subterránea.

Las escasas muestras analizadas en estudios anteriores muestran una ligera predominancia del magnesio y calcio sobre el sodio, encontrándose comúnmente mezclados, originando aguas mixtas.

5.5 Comportamiento hidráulico

Con base en lo expuesto en los apartados anteriores, se puede inferir el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero que se describe a continuación.

La recarga natural del acuífero es originada principalmente por infiltración de la lluvia y del escurrimiento superficial. Las áreas receptoras más importantes se localizan en las partes altas de las sierras, donde la precipitación pluvial es mayor y hay extensos afloramientos de rocas fracturadas, y en los flancos montañosos (pie de monte) donde predominan los materiales aluviales y coluviales de grano grueso. Como no hay manantiales importantes en los macizos montañosos, se deduce que la mayor parte del agua infiltrada se percola a profundidad para incorporarse al acuífero regional, que la transmite hacia las áreas de descarga bajo el control de la gravedad y de la estructura geológica.

Se supone que la recarga efectiva del acuífero es algo menor que el volumen infiltrado, ya que una parte de éste puede ser retenido en la zona no saturada, donde gran parte del agua infiltrada queda retenida en los primeros metros de relleno, para después evaporarse sin aportar recarga efectiva al acuífero.

La descarga natural del acuífero tiene lugar en varias formas: por evapotranspiración, a través de manantiales y, subterráneamente, hacia cuencas adyacentes.

La evapotranspiración de agua subterránea tiene lugar en las áreas donde los niveles freáticos están a menos de 10 m de la superficie del terreno, de manera que pueden ser alcanzados por las raíces de la vegetación nativa.

Con respecto a los manantiales, la información recopilada señala que existen manantiales hacia las inmediaciones de las sierras y contactos litológicos, no obstante, éstos no son permanentes y se agotan después de la época de lluvia. Las salidas hacia las cuencas o acuíferos adyacentes se realizan a través de los caudales base. De manera artificial a través de los aprovechamientos de aguas subterráneas como son los pozos y norias, distribuidos en el acuífero.

6. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

Considerando el gran volumen de precipitación existente en la zona y que los niveles del agua subterránea no han mostrado variaciones importantes, se consideró nulo el cambio de almacenamiento, por lo que la ecuación de balance se redujo a:

$$\text{RECARGA} = \text{DESCARGA}$$

Partiendo de la igualdad de la ecuación anterior, y considerando que del agua que se precipita como resultado de una o varias tormentas, parte de ésta se infiltra hasta alcanzar la superficie freática del acuífero y eventualmente aflora en una corriente superficial como gasto base.

En términos generales, este gasto es aportado por el acuífero durante la época de estiaje al escurrimiento superficial que alimenta dicha corriente. Técnicamente la determinación de su magnitud puede servir de fundamento para la definición del potencial del acuífero, conocida la variación de los gastos con respecto al tiempo en un río.

Esto es, si se dispone de varias estaciones hidrométricas, el método mencionado se aplicará a los tramos comprendidos entre ellas, para conocer la distribución de esta descarga a lo largo del cauce. A pesar de la imprecisión propia de este tipo de balances, el resultado anterior muestra el valor mínimo probable de recarga existente en el acuífero

La estación hidrométrica Puente Morelos se encuentra sobre el río Amarillo, a 2 km al este del poblado San Cristóbal de Las Casas. Se puede considerar que el volumen que pasa por esta estación es el volumen total que sale del acuífero, equivalente a **35.6 hm³/año**.

6.1 Entradas

Están representadas únicamente por la recarga vertical.

6.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

De esta manera, Rv= **35.6 hm³/año**.

6.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Se consideran nulas.

6.2 Salidas

De manera natural, todavía se presenta una salida subterránea por flujo base

$$Sfb = 35.6 \text{ hm}^3/\text{año}$$

6.2.1 Extracción por bombeo (B)

El valor de la extracción por bombeo, para fines del balance, se considera nula

6.3 Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$)

El cambio de almacenamiento es nulo

$$\Delta V(S) = 0$$

Solución de la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh \pm \Delta V(S) - E_h \\ R_v &= 0.0 + 35.6 - 0.0 - 0.0 \\ R_v &= 35.6 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total es la suma de todas las entradas:

$$R = 35.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

7. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

7.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **35.6 hm³/año**.

7.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de **DNC = 0.0 hm³ anuales**.

7.3 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 (REPGA), 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 **4,994,832 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

7.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 35.6 - 0.0 - 4.994832 \\ \text{DMA} &= 30.605168 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **30,605,168 m³ anuales**.

8. BIBLIOGRAFÍA

Norma Oficial Mexicana CNA. NOM-011-CNA-2000, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.