



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
CIVIL – OBRAS HIDRÁULICAS

“PLAN DE MANEJO DEL ACUÍFERO DE TEPALCINGO-AXOCHIAPAN”

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. JOSÉ LUIS MARTINEZ SALAZAR

TUTOR PRINCIPAL
M.I. JUAN CARLOS, VALENCIA, VARGAS,
FACULTAD DE INGENIERÍA

JIUTEPEC, MORELOS JULIO 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. García Villanueva Nahún Hamed

Secretario: M.I. Gutiérrez Ojeda Carlos

1er. Vocal: M. I. Valencia Vargas Juan Carlos

2do. Vocal: M. I. Pedroza González Edmundo

3er. Vocal: M.I. González Verdugo José A.

Lugar donde se realizó la tesis:

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería UNAM, Campus Morelos IMTA,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, México

TUTOR DE TESIS:

M.I. Juan Carlos Valencia Vargas

FIRMA

Índice

I. Introducción	5
II. Problemática.....	8
III. Justificación	10
IV. Objetivo	11
CAPÍTULO I.....	12
1. MARCO DE REFERENCIA	12
1.1. Marco legal	12
1.2. Estudios previos	13
1.3. Marco institucional	16
1.4. Marco físico	19
CAPÍTULO II.....	29
2. DIAGNÓSTICO	29
2.1. Agua subterránea	29
2.2. Agua superficial	40
2.3. Agua residual.....	41
2.4. Población y desarrollo socioeconómico	43
2.5. Uso de suelo.....	47
2.6. Recursos hídricos y su distribución territorial	49
2.7. Balance de agua subterránea	52
2.8. Disponibilidad media anual de agua subterránea	61
CAPÍTULO III.....	64
3. Pronostico.....	64
3.1. Proyecciones	64
3.2. Descripción de escenarios.....	67
CAPÍTULO IV.....	74

4. Medidas y acciones para disminuir la demanda y aumentar la oferta	74
4.1. Acciones para disminuir la demanda	74
4.2. Acciones para incrementar la oferta	75
CAPÍTULO V	78
5. Conclusiones y recomendaciones	78
5.1. Conclusiones	78
5.2. Recomendaciones	78
ANEXOS	80

Resumen

El acuífero de Tepalcingo-Axochiapan se encuentra en el estado de Morelos, clasificado durante los últimos años como sobreexplotado; por lo que se realizó el estudio para determinar su disponibilidad actual de agua subterránea. Utilizando la norma oficial mexicana nom-011-cna-2000 se determinó la recarga total media anual de agua subterránea es de 48.47 hm³ por año, una descarga natural comprometida de 5.54 hm³ por año y un volumen concesionado de agua subterránea de 41.97 hm³ por año, dando como resultado una disponibilidad media anual (das) de 0.96 hm³ por año para el año 2010. Posteriormente se proyectó la demanda de agua para determinar la disponibilidad actual dando como resultado una das de -0.29 hm³ por año, valor que va disminuyendo con el paso de los años hasta llegar a -11.79 hm³ por año para el 2050. Se realizó el análisis para disminuir la extracción de agua subterránea y así obtener una recuperación en el acuífero. Tecnificando el campo con diferentes métodos de riego se puede minimizar dicha extracción provocando una mayor disponibilidad de agua subterránea. Al tecnificar el campo con el método de goteo se obtiene una das de 5.60 hm³ por año para el 2050, mientras que utilizando el método por aspersión se obtiene una das de 2.95 hm³ por año para el mismo año.

I. Introducción

Según una de las estimaciones más aceptadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), poco más del 97% del volumen de agua existente en nuestro planeta es agua salada y está contenida en océanos y mares; mientras que apenas algo menos del 3% es agua dulce o de baja salinidad (Figura I. 1).

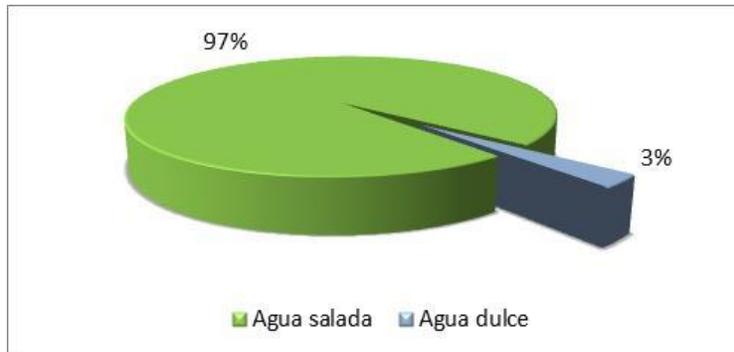


Figura I. 1 Porcentaje de agua dulce y salada en el planeta.

Del volumen total de agua dulce, estimado en unos 38 millones de kilómetros cúbicos, poco más del 75% está concentrado en casquetes polares, nieves eternas y glaciares; el 21% está almacenado en el subsuelo, y el 4% restante corresponde a los cuerpos y cursos de agua superficial (lagos y ríos).

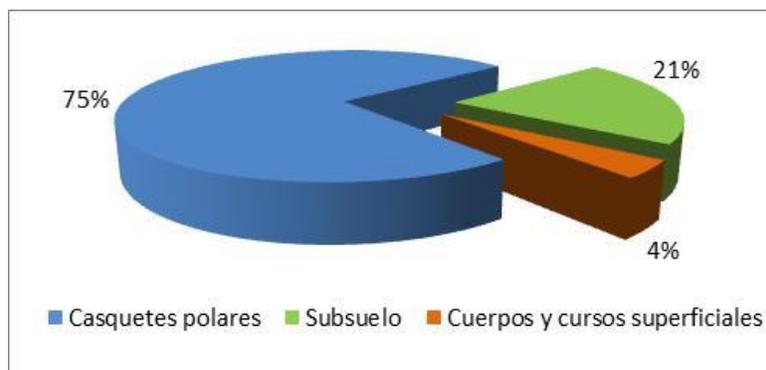


Figura I. 2 Porcentaje del agua dulce almacenada en el planeta.

De acuerdo a las Estadísticas del Agua en México 2013, de los 82.7 km³ concesionados para usos consuntivos el 38.4 % es de origen subterráneo.

Tabla I. 1. Usos agrupados consuntivos, según origen de tipo de fuente

Uso	Origen		Volumen total km ³
	Superficial km ³	Subterráneo km ³	
Agrícola	41.2	22.2	63.4
Abastecimiento público	4.7	7.3	12.0
Industria autoabastecida	1.4	1.9	3.3
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.6	0.4	4.0
Total	50.9	31.8	82.7
Porcentaje	61.5	38.5	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos de las Estadísticas del agua en México, 2013, CONAGUA

A pesar de que el 61.5% del agua concesionada México es de origen superficial, existen problemas de sobreexplotación en algunos acuíferos, por lo que la CONAGUA se ha dado a la tarea de regular el uso del agua subterránea.

A partir del año de 1970 el número de acuíferos sobreexplotados ha venido en aumento. En 1975 de los 653 acuíferos en los que se encuentra dividido el territorio Nacional ya se tenían 32 acuíferos en condiciones de sobreexplotación, 80 para el año de 1985, y 100 en diciembre de 2009, dentro de los cuales se encuentra el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan que es el tema de estudio para el presente documento.

II. Problemática

Se han realizado diversos estudios para determinar la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan dando como resultado déficit en su disponibilidad; no obstante, para el año 2013 el acuífero alcanzó un equilibrio como se aprecia en la figura siguiente que muestra la evolución de la disponibilidad del acuífero.

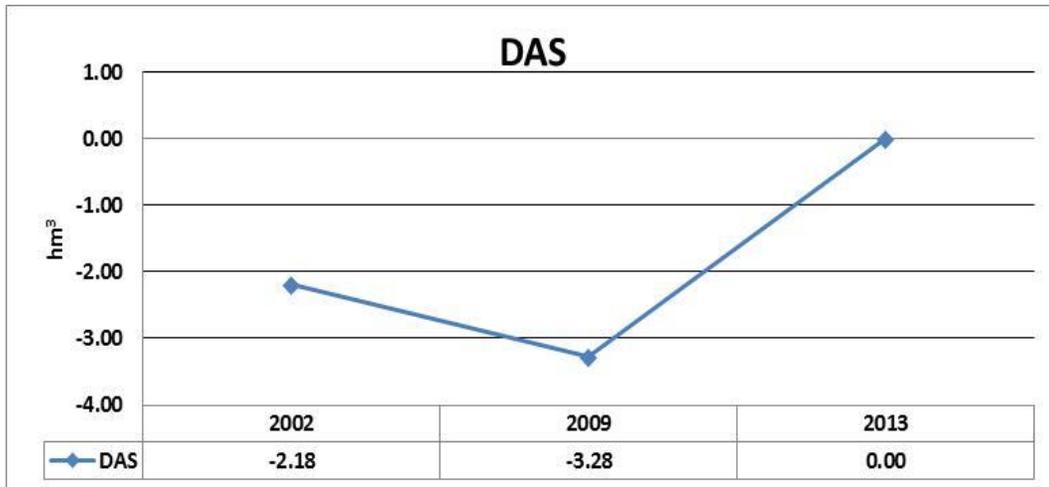


Figura II. 1 Histórico de la Disponibilidad de Agua Subterránea (DAS) en el Acuífero

Fuente: Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan 2002
Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan 2009
Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan 2013

En la región donde se encuentra el acuífero el agua superficial depende principalmente de los deshielos del volcán de Popocatepetl y, por efectos de la propia actividad volcánica, en los últimos años los escurrimientos han venido disminuyendo por lo que el uso del agua subterránea ha aumentado.

Considerando lo anterior, el mal uso del recurso hídrico y la falta de un control en su extracción por parte de los usuarios, han dado como resultado una explotación excesiva del agua en el acuífero.

Actualmente en la región del acuífero de Tepalcingo-Axochiapan se tiene el siguiente acuerdo para uso de agua superficial:

Tabla II.1 Decretos de veda CONAGUA

Número de registro	Estado	Fecha de publicación en el DOF	Nombre oficial	Fecha de registro
VSUP085	Puebla, Morelos, México	13-05.1949	Decreto que establece veda por tiempo indefinido para las aguas provenientes de los deshielos y las filtraciones de los volcanes Popocatepetl y del Ixtlacíhuatl	07-05-2004

Fuente: Vedas superficiales REPDA

Para uso de aguas subterráneas el acuífero presenta los siguientes tipos de veda:

- **Veda Tipo I:** Zonas de veda en las que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.
- **Veda Tipo II:** Zonas de veda en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.
- **Veda Tipo III:** Zonas de veda en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

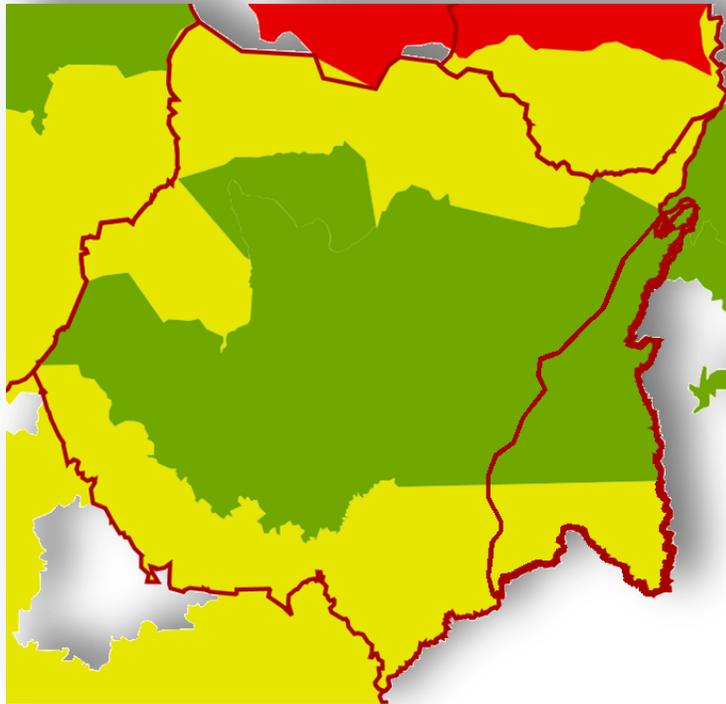


Figura II. 2 Zonas de veda de agua subterráneas, CONAGUA.

Para poder revertir el proceso de sobreexplotación en el acuífero, es necesario realizar un estudio adecuado que determine las condiciones actuales del acuífero así como las posibles soluciones para su recarga.

III. Justificación

Actualmente solo se han realizado trabajos para determinar la disponibilidad del agua subterránea del acuífero de Tepalcingo-Axochiapan, por lo que el mal uso y distribución del recurso continua con la misma tendencia, hoy en día la situación que se está viviendo por la falta de agua, ya sea porque se han agotado las fuentes de abastecimiento, por la sobreexplotación o el difícil acceso, obliga a sus representantes y a la población a buscar alternativas para administrarla.

Éste documento busca no solo mostrar la situación en la que se encuentra el acuífero, sino generar alternativas para aumentar la disponibilidad generando un balance del agua subterránea.

IV. Objetivo

Formular un plan para el manejo del acuífero Tepalcingo-Axochiapan, que garantice el equilibrio entre la oferta y la demanda de agua subterránea.

Objetivos particulares

- Estimación de la demanda actual y futura del uso del agua.
- Elaboración de escenarios:
 - Tendencia actual
 - Máxima tecnificación
- Implementación de alternativas de soluciones para su recarga y equilibrio.

CAPÍTULO I

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1. Marco legal

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1917), en el párrafo 5° del Artículo 27, establece que los recursos naturales del subsuelo son del dominio de la Nación. El agua subterránea puede ser libremente alumbrada hasta que se establezca una veda, reserva o reglamento por causas de interés público.

De acuerdo a la Ley de Aguas Nacional se tienen los siguientes artículos referentes a las aguas subterráneas.

- **Artículo 7 BIS.** Se declara de interés público

El mejoramiento permanente del conocimiento sobre la ocurrencia del agua en el ciclo hidrológico, en su explotación, uso o aprovechamiento y en su conservación en el territorio nacional, y en los conceptos y parámetros fundamentales para alcanzar la gestión integrada de los recursos hídricos, así como la realización periódica de inventarios de usos y usuarios, cuerpos de agua, infraestructura hidráulica y equipamiento diverso necesario para la gestión integrada de los recursos hídricos.

- **Artículo 15.** La planificación hídrica es de carácter obligatorio para la gestión integrada de los recursos hídricos, la conservación de recursos naturales, ecosistemas vitales y el medio ambiente. La formulación, implantación y evaluación de la planificación y programación hídrica comprenderá

III. Los subprogramas específicos, regionales, de cuencas hidrológicas, acuíferos, estatales y sectoriales que permitan atender problemas de escasez o contaminación del agua, ordenar el manejo de cuencas y acuíferos, o corregir la sobreexplotación de aguas superficiales y subterráneas; dichos subprogramas comprenderán el uso de instrumentos para atender los conflictos por la explotación, uso, aprovechamiento y conservación del agua en cantidad y calidad, la problemática de concesión,

asignación y transmisión de derechos de uso de agua en general para la explotación, uso, y aprovechamiento del agua, incluyendo su rehusó, así como el control, preservación y restauración de la misma...

- **Artículo 42.** Para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del subsuelo en las zonas reglamentadas o de veda decretadas por el Ejecutivo Federal, incluso las que hayan sido libremente alumbradas, requerirán de:
II. Un programa integral de manejo por cuenca y acuíferos a explotar.

1.2. Estudios previos

- Estudio geohidrológico de evaluación preliminar de la zona de Tepalcingo-Axochiapan en el estado de Morelos. Tacsá 1980.

Finalidad. Analizar el comportamiento de la calidad del agua y niveles del agua subterránea.

Conclusiones. Se concluye cualitativamente que existe poca disponibilidad de agua subterránea y se recomienda suspender la perforación de nuevos pozos y que solo se terminen los ya iniciados, hasta que se tenga mayor información sobre la disponibilidad hidráulica de la región.

- Estudio geohidrológico integral de los acuíferos de la porción oriental de estado de Morelos. Ininsa, 1982.

Finalidad. Realizar una revisión, integración y complementación de los trabajos realizados en la porción oriental del estado de Morelos.

Conclusión. No se efectúa ningún balance de agua subterránea en ese estudio.

- Reactivación de redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos de los valles de: Cuernavaca, Cuautla-Yautepec, Zacatepec y Tepalcingo-Axochiapan, estado de Morelos Lesser y Asociados S.A. de C.V, 2000.

Finalidad. La red de pozos piloto para medición piezométrica en los Valles mencionados.

Conclusión. Se trazaron las líneas de corriente que definieron la dirección predominante norte-sur del flujo subterráneo.

- Estudio de actualización geohidrológica en el acuífero Tepalcingo-Axochiapan en el estado Morelos Lesser y Asociados S.A. de C.V. 2006.

Finalidad. Actualizar el balance de agua subterránea y sustentar técnicamente la sobreexplotación del acuífero y su disponibilidad.

Conclusión. En el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan, no existe disponibilidad de agua subterránea, ya que el volumen concesionado es mayor que la recarga. Además de que existe sobreexplotación en el área de Tepalcingo-Axochiapan, lo que ocasiona el abatimiento de los niveles.

- Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de Tepalcingo-Axochiapan, estado de Morelos. Subdirección Técnica CONAGUA 2002.

Finalidad. Determinar la disponibilidad de agua subterránea.

Conclusión. Se obtiene un déficit de -2.18 hm^3 .

- Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de Tepalcingo-Axochiapan, estado de Morelos. Subdirección Técnica CONAGUA 2009.

Finalidad. Actualizar la disponibilidad de agua subterránea del acuífero.

Conclusión. Se obtiene un déficit de -3.28 hm^3 .

- Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de Tepalcingo-Axochiapan, estado de Morelos. Subdirección Técnica CONAGUA 2013.

Finalidad. Determinar la disponibilidad de agua subterránea del acuífero.

Conclusión. Se obtiene una disponibilidad de cero hectómetros cúbicos.

1.3. Marco institucional

Las instituciones encargadas de la gestión de los recursos hídricos, vinculadas directa o indirectamente, son las siguientes:

Instituciones vinculadas en la gestión de los recursos hídricos			
Federales: <ul style="list-style-type: none"> •Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) •Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) •Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) 	Estatales <ul style="list-style-type: none"> •Comisión Estatal del Agua (CEA) •Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) •Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SEDAGRO) 	Municipales <ul style="list-style-type: none"> •Organismos Operadores •Obras Públicas •Protección Civil 	Organizaciones no gubernamentales <ul style="list-style-type: none"> •Consejos ciudadanos

Tabla 1. 1 Instituciones vinculadas a los recursos hídricos.

Organismos nacionales

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es la Autoridad Hidráulica y constituye el Órgano Superior con carácter técnico, normativo y consultivo de la Federación, en materia de gestión integrada de los recursos hídricos.

Para el ejercicio de sus atribuciones, la CONAGUA se organiza en tres niveles:

- i. Nivel Central o Nacional. La estructura central de la CONAGUA consta de ocho Unidades o Subdirecciones Generales
- ii. Nivel Regional: 13 Gerencias Regionales, o unidades Hidrológico-Administrativas (Organismos de Cuenca), corresponden aproximadamente con las grandes cuencas hidrológicas.
- iii. Nivel Estatal, representado por 20 Gerencias Estatales. Son dependencias de las Gerencias Regionales respectivas.

Dentro de la CONAGUA, la gestión de las aguas subterráneas está distribuida entre tres Unidades Centrales:

- La Subdirección General Técnica, a través de su Gerencia de Aguas Subterráneas: para el desarrollo de la normativa de los aspectos técnicos de la gestión (monitoreo, exploración, estudios de evaluación, opiniones y dictámenes técnicos, planes de manejo, proyectos de ordenamiento), la asesoría a las unidades regionales/estatales, la validación e integración de información técnica obtenida por las mismas;
- La Subdirección General de Administración del Agua, para la atención de los aspectos administrativos de la gestión (permisos, títulos de concesión, registro público de derechos, sanciones, gravámenes...),
- La Subdirección General Jurídica, para los aspectos legales (aplicación de la LAN).

En materia de aguas subterráneas, la CONAGUA realiza un amplio proceso de ordenamiento:

- La regularización (titulación) de los usuarios,
- La formación del Registro Público de los Derechos de Agua (REPGA),
- La definición formal de las unidades de gestión (acuíferos),
- La actualización de los estudios para cuantificar los volúmenes renovables
- La calidad del agua, la determinación y publicación oficial de la disponibilidad de agua,
- La formulación de los planes de manejo de los acuíferos
- La elaboración de sus proyectos de ordenamiento.

La gestión de los recursos se lleva a cabo a través de las Gerencias Regionales (Organismos de Cuenca), los Consejos de Cuenca y los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) respectivos, en los que participan representantes de las diferentes entidades que comparten el acuífero.

Los COTAS: órganos auxiliares de los Consejos, integrados por representantes de los usuarios del agua de un acuífero específico, de las dependencias oficiales y de los demás sectores de la sociedad que tengan competencia o interés en la administración del mismo, tienen como función colaborar con la CONAGUA en la

formulación, ejecución y seguimiento de programas y acciones encaminadas a la preservación de los acuíferos.

En el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan no se cuenta con un Comité Técnico de Agua Subterránea.

1.4. Marco físico

Ubicación y delimitación geográfica

La Región Hidrológica número 18, Río Balsas, que incluye parcialmente a los estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero, México, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala, Veracruz, Distrito Federal y la totalidad del estado de Morelos, a su vez esta región se divide en las subregiones del Alto, Medio y Bajo Balsas.

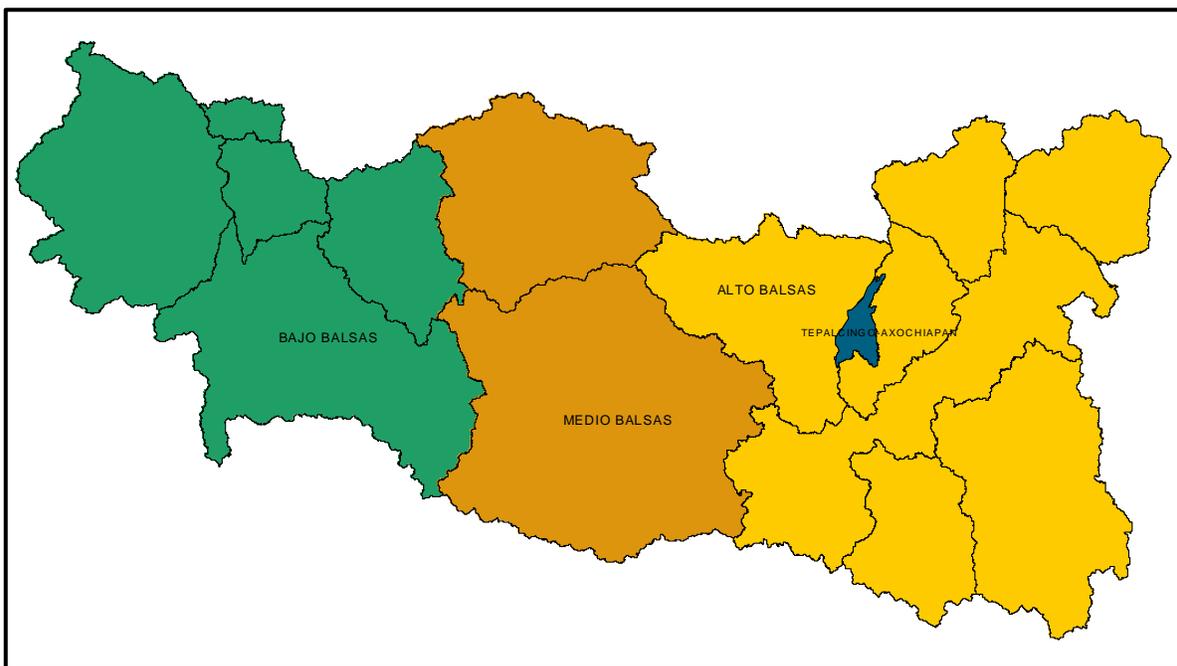


Figura 1. 1 Ubicación del acuífero dentro de la Región Hidrológica número 18.

La subregión en la que se localiza el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan, es la del Alto Balsas, ubicado en la zona oriente del Estado de Morelos, tiene sus límites al norte con el volcán Popocatepetl, al oeste con la sierra de Huautla, al este con pequeñas elevaciones o lomeríos derivados de la prolongación del volcán Popocatepetl y al sur con su zona de descarga que confluye con el río Nexapa.

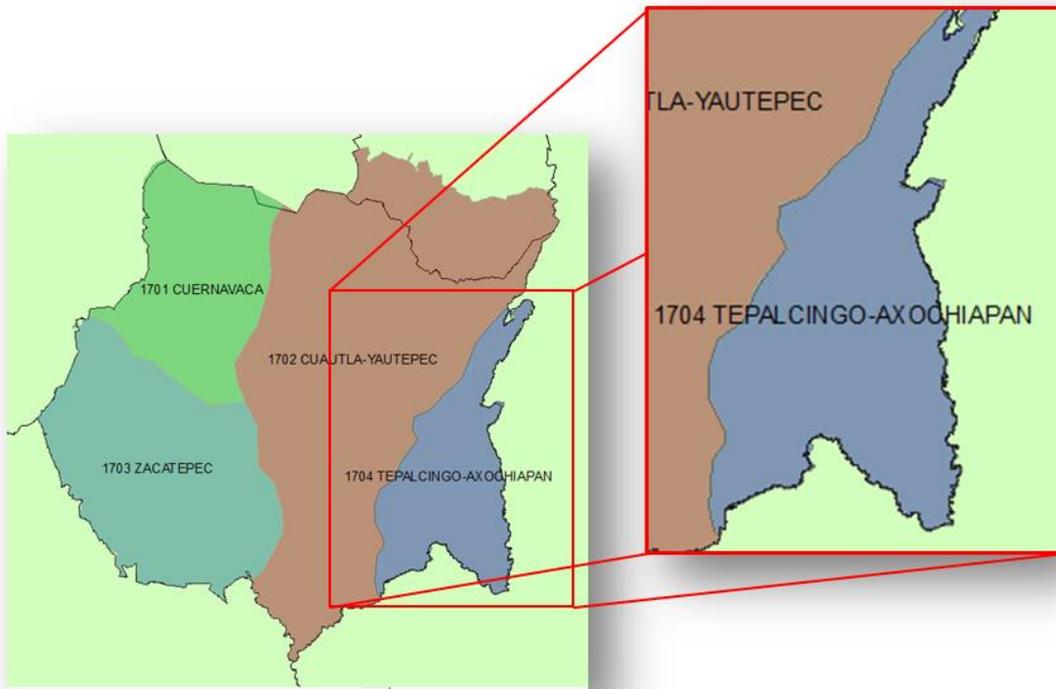


Figura 1. 2 Localización de los acuíferos del estado de Morelos

La delimitación y ubicación geográfica oficial del acuífero fue publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 28 de agosto de 2009 (*Anexo 1 Delimitación geográfica del Acuífero de Tepalcingo-Axochiapan*)

El acuífero tiene una superficie total de 672.98 km² delimitado como se muestra en la Figura 1. 3, a su vez está conformado por 10 municipios que se encuentran total o parcialmente dentro de su territorio (Figura 1. 4) y se desglosan en la Tabla 1. 2.

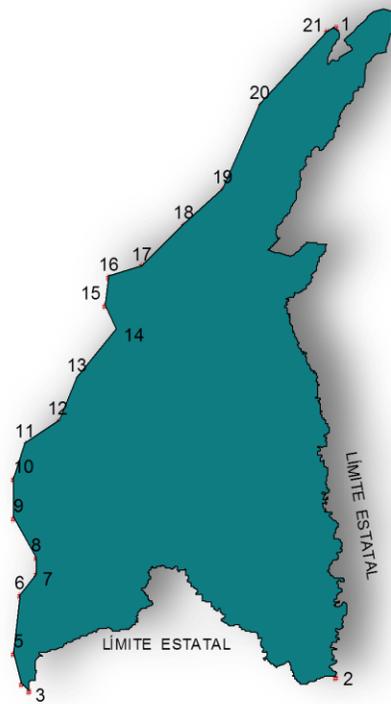


Figura 1. 3 Polígono del acuífero Tepalcingo-Axochiapan



Figura 1. 4 Municipios dentro del acuífero Tepalcingo-Axochiapan

Tabla 1. 2 Municipios dentro del acuífero.

Clave	Nombre	Área (km ²)		Aportación al acuífero (%)
		Total Municipal	Dentro del acuífero	
17003	Axochiapan	143.37	143.37	21.30
17004	Ayala	373.63	0.35	0.05
17010	Jantetelco	88.83	88.83	13.20
17013	Jonacatepec	106.32	98.60	14.65
17016	Ocuilco	98.39	0.860	0.13
17019	Tepalcingo	367.44	231.52	34.40
17022	Tétela del Volcán	92.66	39.01	5.80
17033	Temoac	38.18	28.04	4.17
17025	Tlaquiltenango	543.72	4.67	0.69
17032	Zacualpan de Amilpas	50.82	37.74	5.61
TOTAL		1903.36	672.98	100.00

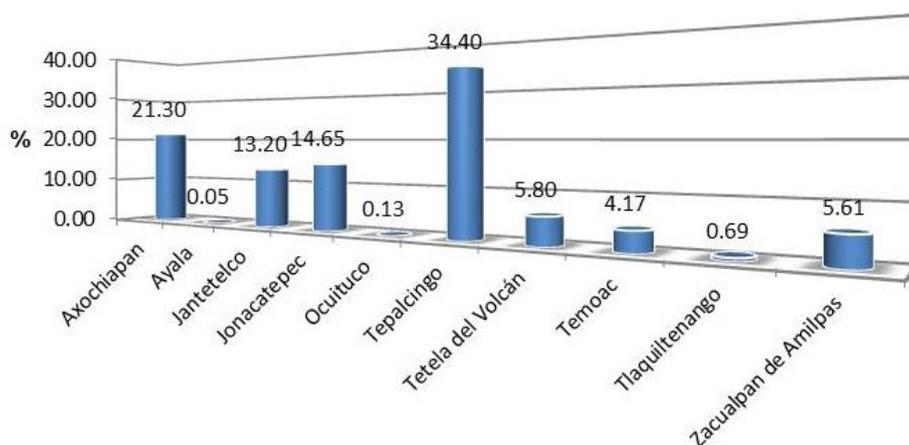


Figura 1. 5 Porcentaje territorial de los municipios dentro del acuífero de Tepalcingo-Axochiapan

Climatología

El clima de una región está controlado por una serie de elementos como: temperatura, humedad, presión, vientos y precipitaciones principalmente.

De acuerdo a la información de las unidades climáticas publicada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el acuífero se presentan tres tipos de clima, el que predomina es el cálido subhúmedo con lluvias en verano Aw0(w) y una humedad baja; los otros dos climas son de tipo semicálido subhúmedo con lluvias en verano A(C)w1(w) y de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano C(w2)(w); dicha distribución se aprecia en la Figura 1. 6 y Tabla 1. 3.



Figura 1. 6 Clasificación de los climas en el acuífero

Tabla 1. 3 Descripción del clima y su porcentaje con respecto al acuífero

Tipo de clima		Superficie km ²	% del acuífero
Clave	Descripción		
C(w2)(w)	Templados subhúmedo con lluvias en verano;	38.15	5.7
A(C)w1(w)	Semicálido subhúmedo con lluvias en verano	78.99	11.7
Aw0(w) y	Cálido subhúmedo con lluvias en verano	555.84	82.6
Total		672.98	100.0

Como se aprecia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Figura . 6 los diferentes climas forman cinturones que gradúan de Norte a Sur, conforme se desciende del volcán.

Precipitación pluvial

Dentro del acuífero se encuentran 7 estaciones climatológicas actualmente en funcionamiento y 6 más cerca de sus límites (**Figura 1. 7**) con períodos de observación que oscilan desde el año 1955 al 2011, de estos datos se obtuvo el valor medio anual de la precipitación por medio de los polígonos de Thiessen.

Tabla 1. 4 Estaciones climatológicas dentro y cercanas al acuífero.

Dentro del acuífero		Fuera del acuífero	
ID	Nombre	ID	Nombre
17015	Tepalcingo	17046	Hueyapan E-4 Tetela del Volcán
17020	Tlacotepec, Zacualpan	17048	Puente de Ocuituco E-5
17021	Tlacualera, Tlacualera	17055	Tenango, Jonacatepec
17028	Jonacatepec, Jonacatepec	17057	El Limón, Tepalcingo
17030	Axochiapan, Axochiapan	17060	Alpanocan, Tetela del Volcán
17036	Lagunillas de Rayón	17063	Tecajec, Yecapixtla
17045	Huecahuasco E-7, Ocuituco		

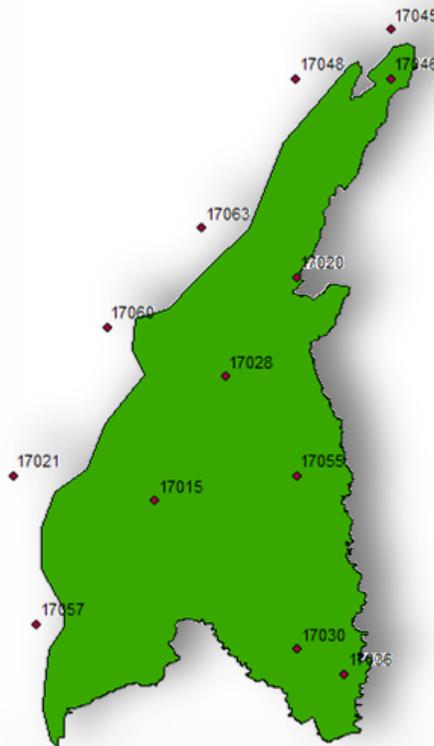


Figura 1. 7 Distribución de las estaciones climatológicas en funcionamiento

De acuerdo a la información analizada de las mismas estaciones, el acuífero recibe una precipitación media anual promedio de **849 mm**, valor mayor a los 830.8 mm presentados a nivel nacional en 2014, lo cual equivale a un volumen promedio anual precipitado de **571.5 hm³** (*Anexo 2 Determinación de la precipitación media en el acuífero*).

En la figura siguiente se muestran los promedios mensuales para cada estación climatológica, media anual en el acuífero y a nivel nacional (2013).

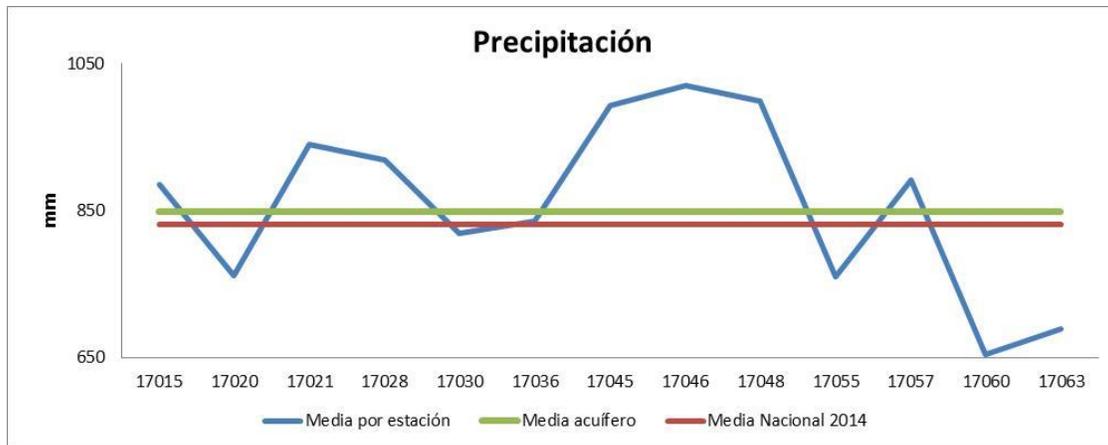


Figura 1. 8 Precipitación media por estación climatológica y media anual.

Temperatura

Para la determinación de la temperatura media en el acuífero se utilizó el método de las isotermas (Ecuación 1), tomando como base los registros de la temperatura media anual de cada estación climatológica antes mencionada.

$$\bar{t}_{med} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} (\bar{t}_i A'_i)$$

Ecuación 1

Del análisis resulta una temperatura media para el acuífero de 20.5 °C, en la Tabla 1. 5 se muestra el resultado del análisis.

Tabla 1. 5 Temperatura media (Isotermas)

Temperatura media °C (tm)	Área km ²	(tm)*(A)
16.5	11.23	185.3
17.5	15.02	262.8
18.5	20.43	378.0
19.5	103.66	2021.3
20.5	274.75	5632.29
21.5	205.87	4426.2
22.5	42.03	945.6
Σ=	672.98	13851.6
Temperatura media		20.5

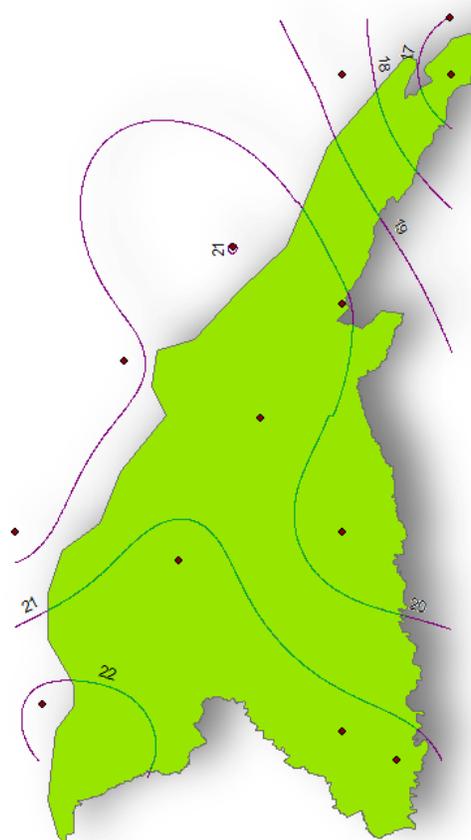


Figura 1. 9 Isolíneas de temperatura (isotermas)

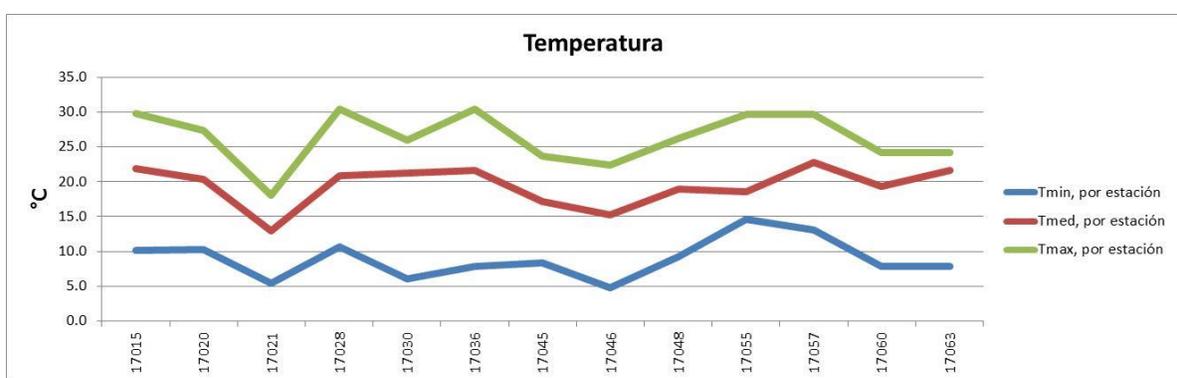


Figura 1. 10 Temperatura media anual por estación climatológica

Evapotranspiración

Para la determinación de la evapotranspiración se empleó el método Turc (Ecuación 2), el cual considera la precipitación y temperatura media anual.

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}; \text{valida para } P > 0.31L$$

Ecuación 2

$$L = 300 + 2T + 0.05T^3$$

Ecuación 3

Dónde:

ET= Evapotranspiración real, mm/año

P= Precipitación media anual, mm/año

T= Temperatura media anual, en °C

Al aplicar el método anterior se tiene una evapotranspiración media de 550.9 mm/año (Tabla 1. 6) lo cual representa el 64.9% de la precipitación media anual nacional. El volumen evapotranspirado dentro de la superficie del acuífero es de 370.73 hm³.

Tabla 1. 6 Determinación de la Evapotranspiración

Estación	Temperatura	Precipitación	L	Evapotranspiración
	(°C)	(mm)		(mm/año)
17015	21.9	885.4	869.0	636.0
17020	20.3	762.5	758.9	551.8
17021	12.9	940.0	433.1	396.9
17028	20.9	919.0	798.3	616.1
17030	21.3	819.9	824.4	596.5
17036	21.6	836.0	847.1	610.7
17045	17.2	993.2	588.8	513.2
17046	15.2	1019.7	506.0	457.8
17048	18.9	998.9	675.4	568.5
17055	18.5	760.7	653.5	506.6
17057	22.8	891.2	938.2	663.8
17060	19.4	654.1	702.1	491.9
17063	21.6	689.5	847.1	551.6
Promedio=				550.9

En la Figura 1. 11 se muestran los valores medios de la precipitación y la evapotranspiración media anual en el acuífero.

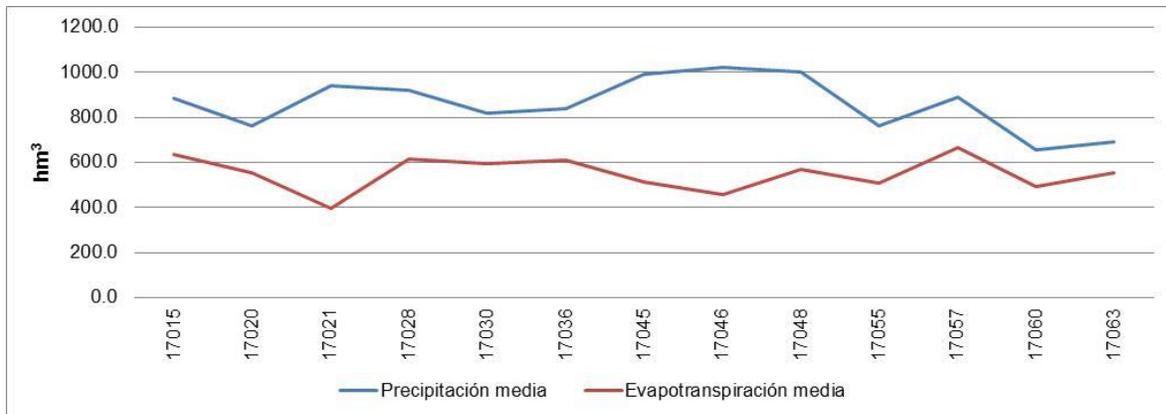


Figura 1. 11 Precipitación y evapotranspiración media anual en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan

CAPÍTULO II

2. DIAGNÓSTICO

2.1. Agua subterránea

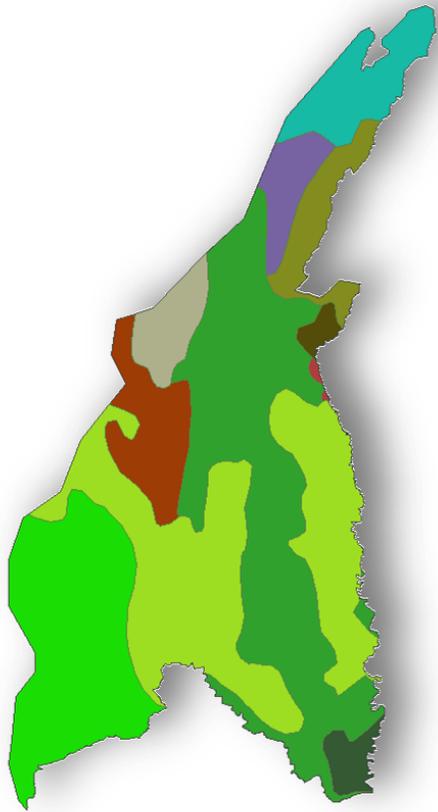
Geología

Los estudios geológicos realizados por dependencias oficiales y privadas en la zona del acuífero, así como las cartas geológicas de esta zona editadas por el INEGI, permitieron definir el marco geológico en que se mueve el agua subterránea.

Tipo de suelo

Tabla 2. 1 Tipo de suelo

Clave	Nombre	
Vp+Vc/3	Vertisol Vertisol	
Vp+I/3/L	Vertisol Litosol	
Vp+Hh/3	Vertisol Feozem	
Vp+Hh/3/P	Vertisol Pélico Feozem	
Vp/3/P	Vertisol	
Re+To+Tm/1	Regosol Andosol	
Hh+To+Rc/1	Feozem Andosol	
Hh+I+Re/2/L	Feozem Litosol	
Hh+Be+Vp/2/D	Feozem Cambisol	
E+Vp/2/PC	Rendzina Vertisol	
E+Rc/3/L	Rendzina Regosol	



Estratigrafía

El marco geológico de la zona de estudio está compuesto por rocas que abarcan del Paleozoico al Reciente. De acuerdo a su origen, se encuentran principalmente rocas ígneas y sedimentarias, y en una pequeña proporción rocas metamórficas.

Las rocas más antiguas son las metamórficas y las más jóvenes son los depósitos clásticos continentales y el aluvión. La descripción de cada una de las formaciones Geológicas y/o grupos geológicos se hace una continuación, de la más antigua a la más reciente.

A. Esquistos Acatlán (Pmet). Estas rocas sólo se observan en un afloramiento aislado en el extremo suroriente de Axochiapan.

B. Formación Morelos (Kim). Está constituida por calizas y dolomitas de color gris claro y crema, en capas de hasta 3 metros de espesor. Llega a presentar fósiles y en algunas zonas abundantes nódulos de pedernal de color gris y rojizo. Incluye fracturas y huellas de disolución.

C. Formación Cuautla (Ksc). El nombre de la formación Cuautla fue propuesto por Fries en el año de 1960 para designar una secuencia de calizas que se presentan en capas delgadas y medidas en las serranías bajas al poniente de la ciudad Cuautla. Según Fries, la formación consta de tres facies principales que son: la primera y más antigua corresponde a una sucesión gruesa de capas de caliza de estratificación mediana a gruesa del tipo de banco calcáreo; la segunda es una sucesión más delgada de capas de calizas de estratificación delgada a mediana; y la tercera facie que corresponde a una sucesión muy delgada de capas de calizas clásticas de estratificación delgada a mediana.

Son rocas marinas del Cretácico Superior constituidas por calizas con lentes y nódulos de pedernal, así como fósiles silicificados. Esta formación junto con la Morelos, por efectos orogénicos sufrió una intensa deformación produciendo fracturamiento, que en muchos sitios fueron resellados por calcita.

D. Grupo Balsas (Teob). En general este grupo consiste en conglomerados, sedimentos clásticos de grano fino, tobas y corrientes lávicas. Hacia su base, en el contacto con las rocas cretácicas, generalmente se encuentran conglomerados formados por fragmentos calcáreos, en una matriz arcillosa de color rojo, conocidos en forma genérica como conglomerados rojos. Aflora en una amplia zona al NE y SE del área de estudio. Hacia el noreste incluye conglomerados de color rojizo con fragmentos semiredondeados de caliza proveniente de las Formaciones Morelos y Cuautla. En el sureste predominan tobas híbridas de color crema, las cuales tienen pequeños fragmentos angulosos y subredondeados de caliza y lutitas, incluidos en una matriz tobacea de tipo rilótico de grano muy frío, depositado en un medio lacustre. Se presenta estratificado en capas de hasta de 2 metros de espesor. Su espesor es muy variable, del orden de 600 metros. Se le ha considerado una edad Eoceno –Oligoceno.

E. Formación Tlayca (Tomtl). Con este nombre se describe a una secuencia volcánica terciaria, constituida principalmente por ignimbritas y brechas volcánicas que descansan sobre el Grupo Balsas. De forma masiva y compacta, de coloración rosado claro, masiva, suave, con la característica de que al intemperizar produce formas redondeadas. La localidad tipo se ubica a medio kilómetro del poblado de Tlaica, en el cerro El Colorado.

F. Grupo Tepexco. Fue descrito por Fries en la población de Tepexco; está formado por andesitas y brechas andesíticas, parecida al Grupo Ixtlilco solo que un poco más oscura, se presentan en estructura masiva. En este grupo las rocas ígneas intrusivas cuyas áreas de afloramiento son muy restringidas; son rocas de naturaleza impermeable (granodioritas) y se encuentran en el área de estudio, cerca del poblado de Joncatepec y son denominados “Troncos Ígneos de Chalcatzingo”

G. Grupo Ixtlilco (Tomi). Este grupo está representado por derrames volcánicos, con interestratificaciones de tobas híbridas; las primeras presentan diferentes colores y texturas y las segundas un color que varía de gris a rojizo.

Afloran en las inmediaciones de los poblados de El Salitre, Chinameca, Huitzililla, descansa sobre la Formación Tlayca. Su edad se considera del Mioceno.

H. Formación Cuayuca (Mcc). Consiste en una secuencia de capas lacustres de yeso que descansan sobre capas arcillosas. El yeso es de color crema claro en capas de unos 30 cm de espesor, es suave y sus capas están poco plegadas. La mayor parte de los yesíferos han estado bajo explotación comercial. El principal afloramiento de la Formación CuayucaYesífera se encuentra al norte de Ahuehutzingo. Otros pequeños afloramientos de yeso se localizan en las cercanías de Teotlacico y Tzicatlán. Por su posición estratigráfica se considera que esta formación tiene una edad Mioceno. Sus afloramientos se restringen al área de valle entre las poblaciones de Tepalcingo y Axochiapan

I. Formación Tlayecac. (Tptl). Esta formación está constituida por materiales volcánicos de diferente constitución que se ubican al pie de monte del volcán Popocatepetl, dada su composición y distribución litológica es muy semejante a la Formación Cuernavaca, la diferencia es la presencia de fragmentos volcánicos de diferente composición (andesita, basalto, riodacita, etc.), sus fragmentos van desde milímetros hasta 1 o 2 metros de diámetro, empacados en una matriz tobacea, su distribución es caótica y muy rara vez se le observa estratificación.

J. Formación Popocatepetl (Qhp). Materiales volcánicos que constituyen el cuerpo del volcán Popocatepetl, se encuentra constituido por materiales ígneos extrusivos de diferente composición dando lugar a la presencia de coladas basálticas, andesíticas y riodacíticas, con intercalaciones de materiales piroclásticos.

K. Depósitos Clásticos Continentales. (PQdc).- Son materiales de tipo conglomerático estratificados, constituidos por fragmentos de basaltos y andesita débilmente empacados en arena arcillosa, su espesor es variable aumentando hacia la parte central en donde llega a ser superior de los 180 metros.

L. Aluvión (Qal). Consiste de fragmentos de rocas empacados en arenas de textura media a gruesa y gravas, tiene poco espesor y ocupa áreas restringidas y principalmente en las vegas de los ríos y arroyos del área.

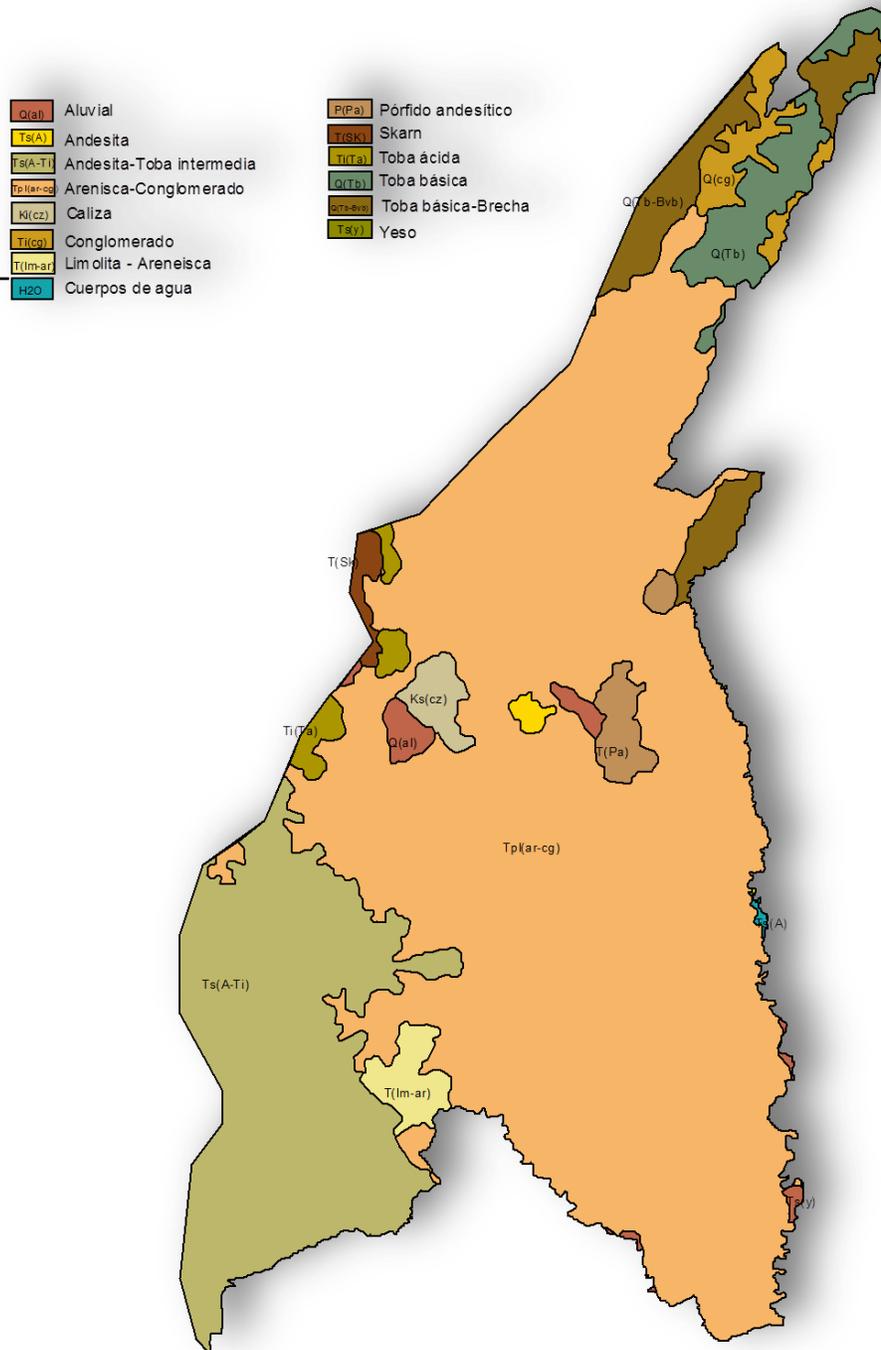


Figura 2. 1. Geología superficial del área de estudio

Geología del subsuelo

La geología del subsuelo se puede determinar de dos maneras; una directa y otra indirecta; la primera a través de cortes litológicos obtenidos de la perforación de pozos profundos y la segunda mediante estudios geofísicos.

En el Estudio Integral de los Acuíferos de la Porción Oriental del Estado de Morelos 1982, la empresa ININSA realizó 20 sondeos eléctricos verticales de los cuales los resultados sobre el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan son los siguientes:

- ***Unidades geohidrológicas***

En el estado de Morelos se presentan tres tipos de unidades geohidrológicas o tipo de acuíferos, cada unidad geohidrológica o acuífero está constituido por uno o varios tipos de roca que se caracterizan en mayor o menor grado por almacenar, conducir y ceder agua subterránea.

La primera unidad geohidrológica se ubica en materiales de los periodos Terciario y Cuaternario, la segunda unidad geohidrológica se ubica a mayor profundidad en materiales Terciarios y del Cretácico Superior y la tercera unidad geohidrológica y más profunda se ubica en materiales del Cretácico.

La primera unidad geohidrológica, definida también como acuífero libre, se ubica en este acuífero en materiales de las Formaciones Tlayecac, Depósitos Clásticos Continentales y Chichinautzin. Las dos primeras de regular permeabilidad y de tipo granular mientras que la tercera de alta permeabilidad y de tipo fracturado, sobre estos materiales se encuentran alojadas las obras de captación que explotan las aguas del subsuelo mediante pozos profundos norias y manantiales. Este tipo de acuífero tiene pocas descargas naturales mediante manantiales.

La Formación Tlayecac y los Depósitos Clásticos Continentales en los valles del Plan de Amilpas y Tepalcingo-Axochiapan presentan espesores promedio de 150 metros, la Formación Chichinautzin en la porción Norte presenta espesores que rebasan los 300 metros, determinando su espesor la ubicación respecto al valle.

La segunda unidad geohidrológica, definida como un acuitado, se asocia con los materiales del Grupo Balsas y la Formación Cuayuca, materiales que tienen la capacidad de almacenar agua pero no fácilmente la ceden y funcionan como basamento del acuífero libre y barrera impermeable entre el acuífero libre y la tercera unidad. La Formación Cuayuca se localiza en las inmediaciones de Axochiapan y su presencia ocasiona que el nivel piezométrico del acuífero libre sea más somero entre 10 a 50 m dependiendo de la zona. Extensos bancos de yesos se ubican en la margen izquierda del río San Francisco, en la localidad de Cuayuca, así como al poniente del valle en la margen derecha del río Tepalcingo en la localidad de Guadalupe.

La tercera unidad geohidrológica se encuentra debajo del Grupo Balsas y la Formación Cuayuca. Constituye un acuífero regional o profundo, se encuentra semiconfinado y se aloja en materiales calizos de las formaciones Morelos y Cuautla, siendo además el basamento de la secuencia geohidrológica.

- ***Características hidráulicas***

- ✓ Acuífero Libre
- ✓ Espesores: 80 y 200m
- ✓ Coeficiente de transmisividad: 0.00010 a 0.012 m²/s
- ✓ Conductividad hidráulica: 4.05x10⁻⁶ m/s a 4.05x10⁻⁵ m/s (arenas finas a gruesas)
- ✓ Coeficiente de almacenamiento: 0.01
- ✓ Rendimiento específico (Sy): 0.001

Funcionamiento del sistema acuífero

Las entradas de agua al acuífero del valle de Tepalcingo-Axochiapan tiene su origen principalmente a la precipitación de la lluvia que incide en él y una pequeña fracción a los deshielos del volcán Popocatepetl, las cuales dan lugar a los procesos de escurrimiento y de infiltración, que influenciados principalmente por aspectos hidrológicos y geológicos determinan la presencia del agua superficial y subterránea.

Al sur de volcán Popocatepetl, su forma acunada, la precipitación genera una recarga de agua que transita de las partes altas a las bajas con dirección preferencial del flujo subterráneo de Norte-Sur, hasta llegar a la zona de Jonacatepec y Jantetelco, zona donde se represa el agua subterránea incrementando significativamente los niveles piezométricos durante la temporada de lluvias por el estrangulamiento generado por los intrusivos de los cerros del Camello y del Mono, que durante la temporada de estiaje generan fuertes abatimientos estacional para la zona. Finalmente circula con dirección Sur hacia la confluencia con el río Nexapa zona donde descarga naturalmente como flujo base.

En la ladera del volcán los niveles piezométricos se ven afectados por el gran desnivel que se presenta en relación con el valle en donde, por esta razón en esta zona se presentan los niveles más profundos para este acuífero. En la zona acuífera de Tepalcingo el nivel del agua subterránea tiende a ir subiendo conforme se transita hacia la confluencia del río Nexapa con el río Tepalcingo, debido a la profundidad a que se presentan los materiales del basamento.

Adicionalmente se tiene la puesta en operación de las presas Los Carros y Cayehuacan cuyos almacenamientos han inducido una recarga, modificando los niveles piezométricos en la zona aledaña a dichas estructuras.

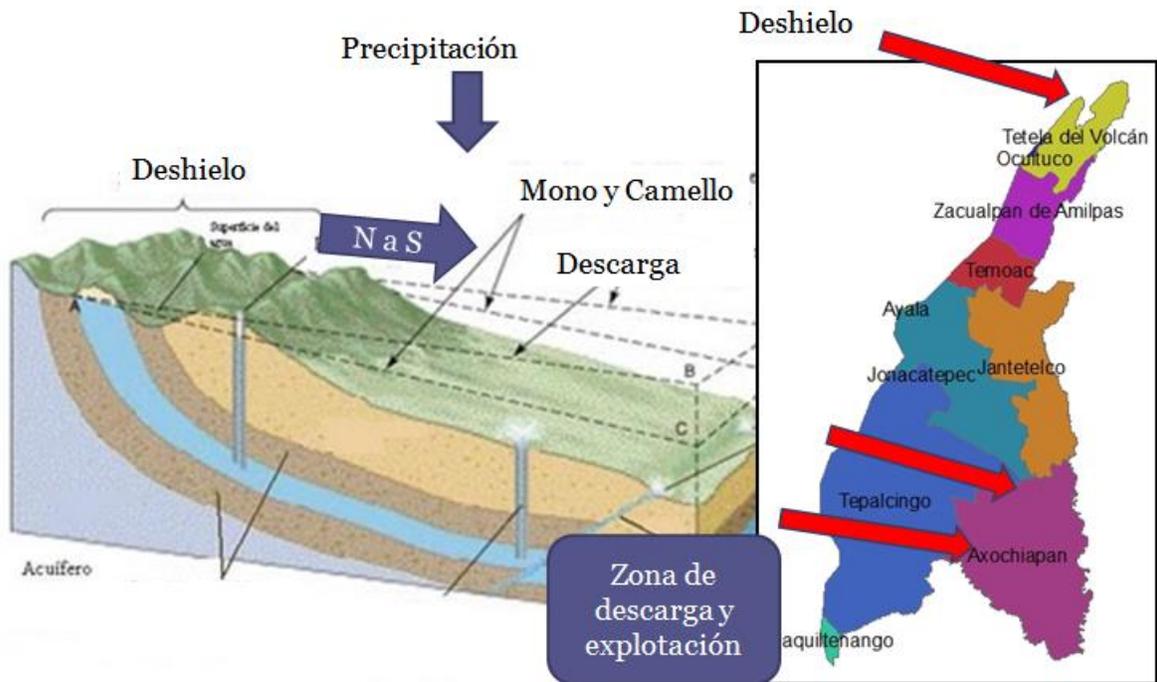


Figura 2. 2 Funcionamiento del acuífero

Calidad del agua subterránea

Del estudio realizado por el área técnica de la CONAGUA para evaluar si existía algún efecto por hidrotermalismo en la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento de agua potable por la actividad volcánica en las poblaciones localizadas en la zona de influencia del volcán dentro del estado de Morelos (Tetela del Volcán, Temoac, Zacualpan de Amilpas y Ocuilco). Los resultados fueron los siguientes:

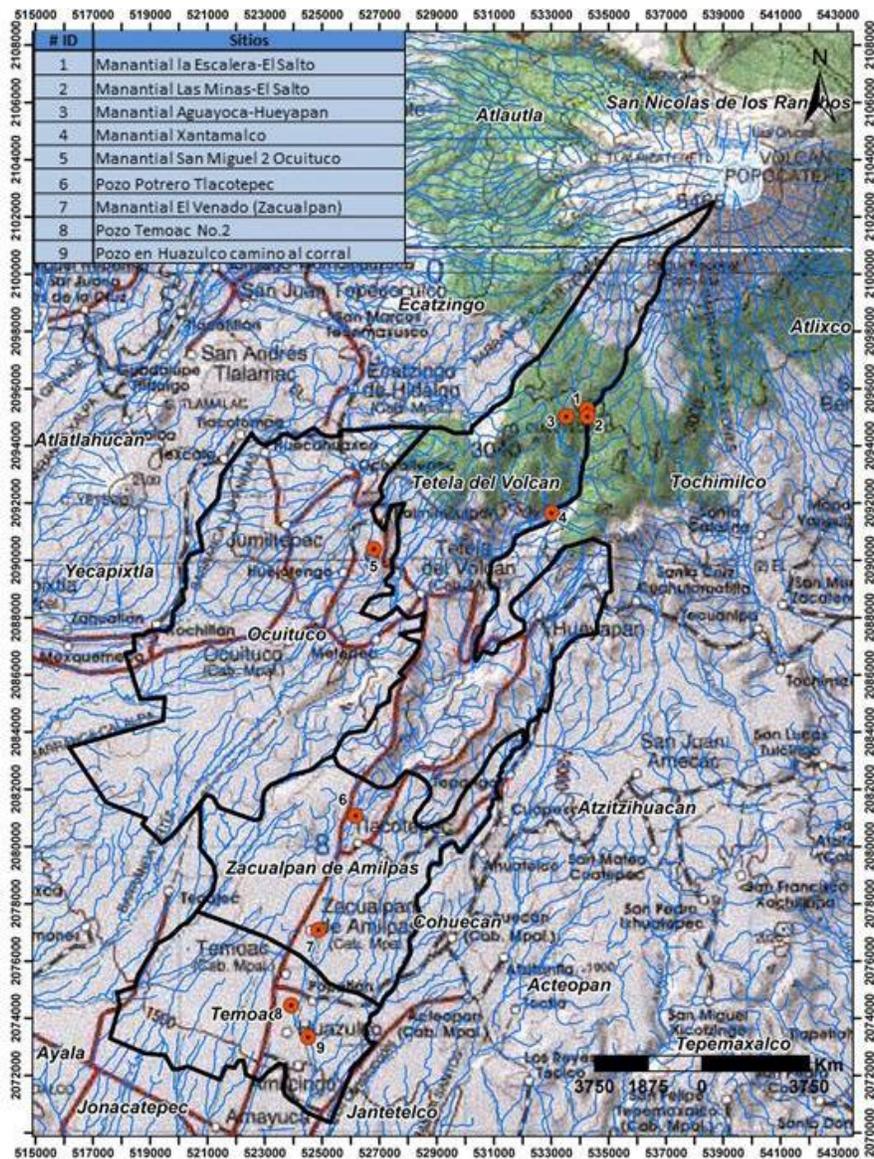


Figura 2. 3 Localización de los sitios de estudio, Fuente: Dirección Técnica CONAGUA

Tabla 2. 2 Resultados de los parámetros analizados

Parámetros analizados	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Flúor • Boro • Sulfatos • Parámetros de la NOM-127-SSA1-1994 “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización” 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos los parámetros de la NOM-127-SSA1-1994 cumplen con los límites establecidos en la misma. • Los coliformes totales se encuentran fuera del límite para todas las fuentes muestreadas, ya que deben ser no detectables. • La concentración de nitratos cumplen con los límites establecidos (10 mg/l). • Las concentraciones de metales pesados, arsénico total, fierro total y plomo total, se encuentran dentro de los límites establecidos. • Los parámetros de sulfuros totales y sulfatos totales, indicadores de actividad volcánica, cumplen con el límite permisible de la norma de Salud. • Para el caso del boro total, sus concentraciones se encuentran como no detectables, es decir menores a 0.1 mg/l. • Los parámetros de pH y temperatura no han sufrido alteración por la actividad volcánica.

Fuente: Dirección Técnica CONAGUA

De acuerdo a los resultados obtenidos por la dirección técnica, se concluye que las aguas no se encuentran afectadas conforme a lo establecido por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994 y por los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua para fuentes de abastecimiento de agua potable (CECA-1999). Con respecto a la influencia ejercida por el Volcán Popocatepetl en las fuentes de abastecimiento de los municipios no se confirma efecto alguno por hidrotermalismo.

2.2. Agua superficial

Hidrografía

Determinado por factores geomorfológicos, la red hidrográfica del acuífero Tepalcingo-Axochiapan define un arreglo muy particular, en donde en la ladera del volcán presenta un arreglo hidrográfico de tipo radial, para pasar en la ladera al tipo dendrítico en donde la dirección preferencial es norte-sur, como lo atestiguan los colectores de la zona, la barranca Amatzinac, los ríos Tepalcingo y San Francisco en Morelos y el río Nexapa en Puebla, todos afluentes del río Atoyac y pertenecientes al sistema hidrológico del río Balsas.

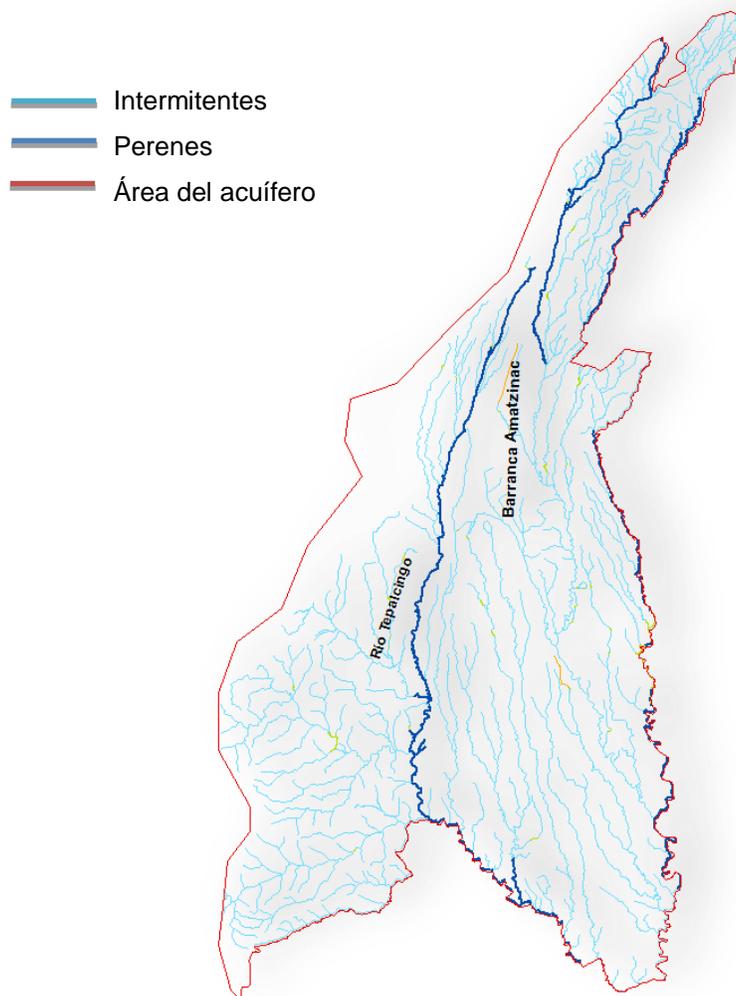


Figura 2. 4 Hidrografía del acuífero

Los arroyos y barrancas de la región son de régimen intermitente y el sistema de drenaje es paralelo; son pocos los manantiales, y en el caso de los manantiales Termas de Atotonilco, se dan en la ladera del cerro Cuachi en el valle de Tepalcingo. Como algo excepcional se presenta el manantial termal de Ixtlatala, el cual aflora en la margen izquierda del río San Francisco, en el valle de Tepalcingo-Axochiapan.

2.3. Agua residual

Plantas de tratamiento de aguas residuales

En el estado de Morelos se cuenta con un total de 50 plantas de tratamiento de agua residual, con una capacidad instalada de 2,777.7 l/s, de la cual solo se tratan 1,810.6 l/s.

Dentro del acuífero de Tepalcingo-Axochiapan hay cinco plantas de tratamiento de aguas residuales (funcionando), con una capacidad instalada de 84 l/s del cual se tratan 66 l/s.

Tabla 2. 3 Plantas de tratamiento de agua residual, 2011.

	Plantas en Funcionamiento	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)
Acuífero Tepalcingo-Axochiapan	5	84	66
Morelos	50	2777.7	1810.6
% respecto a Morelos	10.0	3.0	3.6

Fuente: Inventario nacional de plantas de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación

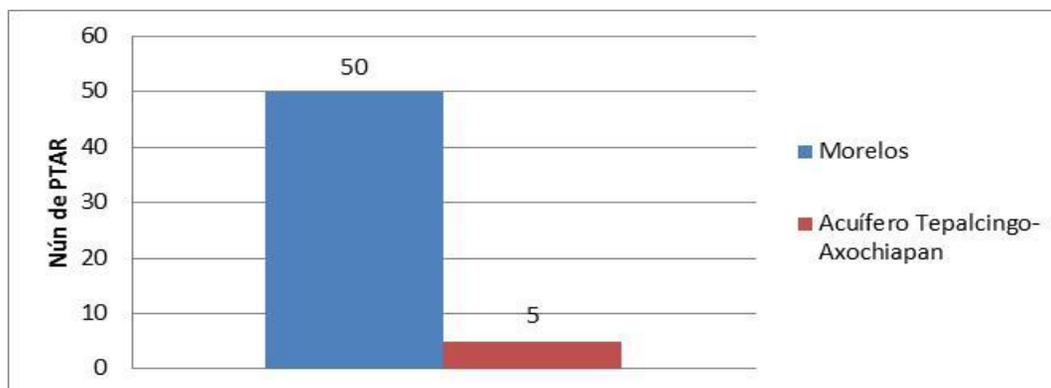


Figura 2. 5 Número de plantas de tratamiento de agua residual

Tabla 2. 4 Características de las plantas de tratamiento

Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor
Axochiapan	Axochiapan	Axochiapan	Lodos activados	30	20	Barranca de los Ahuehuetes
Jantetelco	Amayuca	Amayuca	Lodos activados	5	5	Barranca Amayuca
	Jantetelco	Jantetelco (Amatzinac)	Anaerobio	-	-	Barranca Amatzinac
	Jantetelco	Jantetelco (Bordo el Jaguey)	Anaerobio	-	-	Bordo el Jaguey
Zacualpan de Amilpas	Tlacotepec	Monte la Era	Lodos activados	12	11	Barranca Amatzinac
	Tlacotepec	Zacualpan de Amilpas	Lodos activados	12	10	Barranca Amatzinac
Tepalcingo	Tepalcingo	Tepalcingo	Anaerobio	25	20	Barranca s/n
Total				84	66	

Fuente: Inventario nacional de plantas de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación



Figura 2. 6 Capacidad instalada de tratamiento en el acuífero Tepalcingo-Axochiapan (tratado y sin tratar)

De acuerdo a estudios realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se adopta como aportación de aguas negras el 75% de la dotación de agua potable, considerando que el 25% restante se consume antes de llegar a las atarjeas. Por lo tanto, la aportación de aguas negras en el acuífero es de 6.04 hm³ de los 8.05 hm³ de la demanda anual de agua potable para uso doméstico, lo que

representa que solo se trata el 34.5% del volumen de aguas negras producidas en la zona, y el 65.5% (3.95 hm³) restante va a dar a las barranca y ríos.

2.4. Población y desarrollo socioeconómico

Como se mencionó en el sección 1.4, tres de los diez municipios que integran el acuífero aportan muy poca superficie, misma en la que no se tiene población, dos municipios que su superficie total está dentro del acuífero, y por otro lado, 5 municipios aportan una superficie parcial, para todos estos municipios se contemplan solo las localidades que se encuentran dentro del área del acuífero.

En la Tabla 2. 5 se muestra la población que aporta cada municipio dando como resultando un total de 123,112 habitantes dentro del acuífero Tepalcingo-Axochiapan.

Tabla 2. 5 Población dentro del acuífero, INEGI 2010

Municipio	Superficie municipal (km ²), 2005	Aportación de superficie al acuífero (km ²)	Población 2010	Aportación al acuífero (%)
Axochiapan	143.37	143.37	33,695	27.37
Ayala	373.63	0.35	--	--
Jantetelco	88.83	88.83	15,646	12.71
Jonacatepec	106.32	98.60	14,604	11.86
Ocuituco	98.39	0.86	--	--
Tepalcingo	367.44	231.52	19,881	16.15
Tétela del Volcán	92.66	39.01	16,677	13.55
Temoac	38.18	28.04	14,030	11.40
Tlaquiltenango	543.72	4.67	--	--
Zacualpan de Amilpas	50.82	37.74	8,579	6.97
Total	1,903.36	672.98	123,112	100.00

Para el año 2010 de las 128 localidades que se encuentran dentro del área de influencia del acuífero de Tepalcingo-Axochiapan, 17 de ellas cuentan con una población mayor a 2,500 personas, por lo que se denominan localidades urbanas, las 111 localidades restantes cuentan con una población menor a la citada anteriormente, considerándose como localidades rurales.

Tabla 2. 6 Población urbana y rural en el acuífero

Municipio	Población 2010	
	Rural	Urbana
Axochiapan	8,303	25,392
Jantetelco	5,714	9,932
Jonacatepec	3,299	11,305
Tepalcingo	1,379	18,502
Tetela del Volcán	---	16,677
Temoac	869	9,314
Zacualpan de Amilpas	---	8,579

Para la determinación de la demanda de agua se utilizó el estudio “Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe Evaluación de los recursos hídricos: Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas, IMTA 2006.

En la Tabla 2. 7 se muestra la dotación que asignada dependiendo del tipo de clima y número de habitantes por rango de población:

Tabla 2. 7 Dotaciones para estimación de los volúmenes de uso doméstico L/hab/día

Población con agua entubada número de habitantes	Clima cálido	Clima Templado	Clima Frío
De 2,500 a menos	125	100	75
De 2,500 a 15,000	175	150	125
De 15,000 a 30,000	200	175	150
De 30,000 a 70,000	225	200	175
De 70,000 a 150,000	275	250	225
De 150,000 a 500,000	350	300	250
De 500,000 o más	400	350	300
Habitantes con servicio de hidrante público			60 l/hab/día
Habitantes con otro tipo de servicios (pipas, acarreo, manual, etc)			40 l/hab/día

Fuente: Balance hídrico integrado por cuenca hidrológica IMTA

Tomando en cuenta la clasificación anterior para la asignación de la dotación tenemos que en el año 2010 se utilizó un volumen de **5.56 hm³** para uso doméstico.

Tabla 2. 8 Volumen de agua requerido uso doméstico

Población con agua entubada rango de habitantes	Clima cálido		Clima Templado		Volumen Total (l/día)
	Población	Dotación	Población	Dotación	
De 2,500 a menos	15,749	125	-	100	1,968,625
De 2,500 a 15,000	53,696	175	15,628	150	11,741,000
De 15,000 a 30,000		200	-	175	0
Habitantes con otro tipo de servicios (pipas, acarreo, manual, etc)			38,039	40	1,521,560
Total (diario), litros.					15,231,185
Total anual, hm³					5.56

Población en viviendas particulares habitadas

De acuerdo al censo de población y vivienda, realizado en el año de 2010, el número total de viviendas es de 30,310, por lo que el índice de hacinamiento es de **4.1 hab/viv**, mayor al 3.9 presentado en el estado de Morelos.

Tabla 2. 9 Población en viviendas particulares habitadas

Municipio	Población Total 2010	Población en viviendas particulares habitadas	Viviendas particulares habitadas	%
Axochiapan	33,695	33,656	8,137	26.8
Jantetelco	15,646	15,623	3,902	12.9
Jonacatepec	14,604	14,429	3,680	12.1
Tepalcingo	19,881	19,878	5,085	16.8
Tetela del Volcán	16,677	16,658	3,878	12.8
Temoac	14,030	14,012	3,383	11.2
Zacualpan de Amilpas	8,579	8,563	2,245	7.4
Total	123,112	122,819	30,310	100

Cobertura de abastecimiento de agua potable y drenaje

De acuerdo al censo realizado por el INEGI 2010, la situación actual que se vive en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan con base al abastecimiento de agua potable se considera como muy buena, ya que el 99.53% cuenta con algún tipo de abastecimiento de agua, si se considera de los resultados del censo INEGI 2010 como cobertura de abasto de agua solo a las viviendas con servicio dentro de la vivienda entonces el 68.7% de la población cuenta con este servicio.

En el caso de la cobertura de drenaje en el acuífero 87.83% cuenta con servicio de drenaje, 11.61% no cuenta con el servicio y el 0.56% no especifico.

Tabla 2. 10 Concentrado de cobertura de agua potable y drenaje en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan, INEGI 2010

Municipio	Población Total 2010	Población en viviendas particulares habitadas	Viviendas particulares habitadas	Agua potable			Drenaje		
				Con servicio		Viviendas sin servicio de agua potable	Viviendas con servicio	Viviendas sin servicio	No específico
				Dentro de la vivienda	Fuera de la vivienda				
Axochiapan	33,695	33,656	8,137	5,760	2,333	44	7465	603	69
Jantetelco	15,646	15,623	3,902	2,589	1,291	22	3652	225	25
Jonacatepec	14,604	14,429	3,680	2,204	1,463	13	3437	224	19
Tepalcingo	19,881	19,878	5,085	3,697	1,372	16	4,579	495	11
Tétela del Volcán	16,677	16,658	3,878	3,635	226	17	2,441	1,428	9
Temoac	14,030	14,012	3,383	2,146	1,215	22	2,977	380	26
Zacualpan de Amilpas	8,579	8,563	2,245	810	1,427	8	2,071	164	10
Total	123,112	122,819	30,310	20,841	9,327	142	26,622	3,519	169
				68.76%	30.77%	0.47%	87.83%	11.61%	0.56%
				100.00%			100.00%		



Figura 2. 7 Cobertura de agua potable y alcantarillado

2.5. Uso de suelo

En el acuífero la mayor parte del territorio es destinado al uso agrícola, riego y temporal, con el 76.2%, el 22.2% es de selva baja caducifolia, 1.2% es de bosque de pino-encino, y el porcentaje restante es rea urbana con el 0.4%.

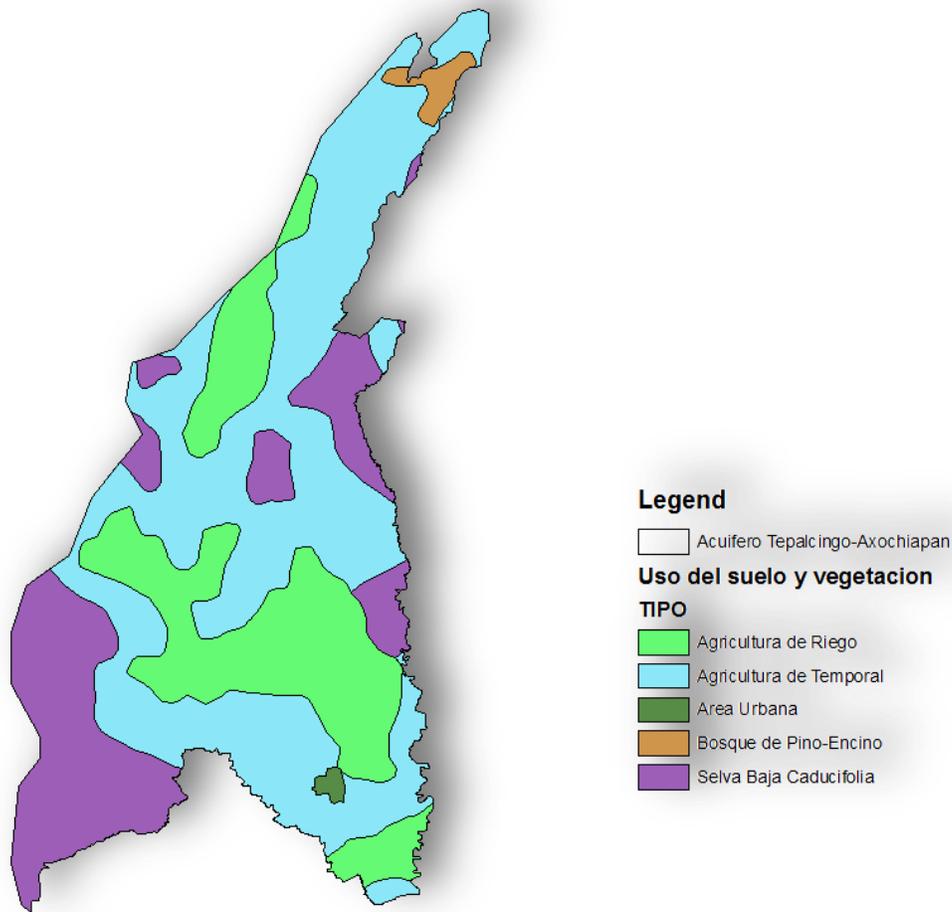


Figura 2. 8 Uso de suelo y vegetación en la superficie del acuífero de Tepalcingo-Axochiapan

Sector agrícola

Como se puede observar en la figura anterior la mayor parte del territorio del acuífero es destinado al uso agrícola con 508.84 km² lo que representa el 75.61% de la superficie del acuífero, desglosando por el tipo de agricultura se tiene que el 66 % de la agricultura es de temporal y el 34% restante es de riego.

Tabla 2. 11 Superficie agrícola

Tipo	Área (km2)
Agricultura de riego	172.02
Agricultura de temporal	336.82
Total	508.84

Figura 2. 9 Porcentajes del tipo de agricultura

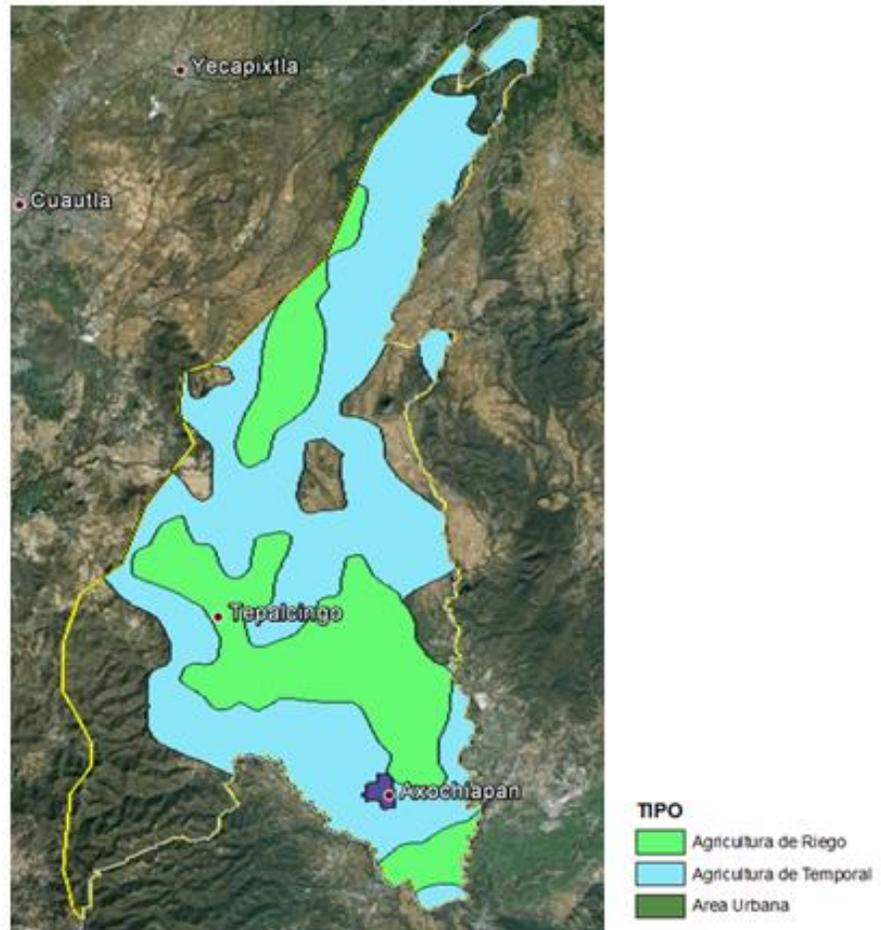
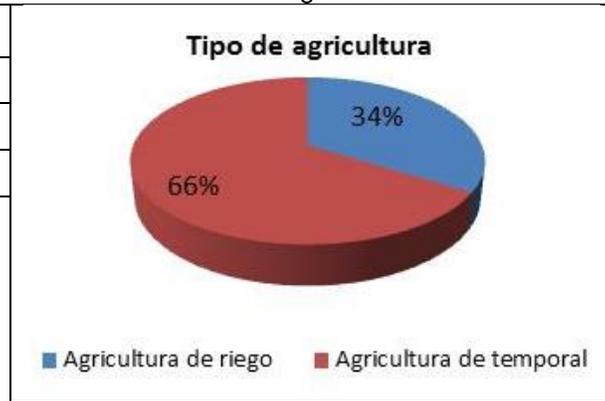


Figura 2. 10 Uso de suelo, agricultura de riego y temporal, del acuífero de Tepalcingo-Axochiapan

En el acuífero el sistema de riego rodado o por gravedad es el que predomina, y en una menor cantidad tecnificado, por lo que este sistema no es representativo en la zona.

2.6. Recursos hídricos y su distribución territorial

Agua superficial

De acuerdo al Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Morelos, CONAGUA 2010 el volumen de extracción de agua superficial en la cuenca es de **34 hm³** del cual el principal usuario es el uso agrícola con el 87% (29.6 hm³) y seguido por el uso de servicios con el 13% (4.4 hm³).

Del volumen superficial el 81% (27.28 hm³) de la extracción proviene de barrancas y ríos, 15.3 % (5.2 hm³) de manantiales y el 3.7% (1.52 hm³) de presas y bordos.

Agua Subterránea

En el estudio “Actualización Geohidrológica del Acuífero Tepalcingo-Axochiapan en el Estado de Morelos” elaborado por la Universidad de Chapingo para CONAGUA 2010, se realizó un censo a los aprovechamientos de agua subterránea en el acuífero. Los resultados de dicho censo se muestran en la Tabla 2. 12.

Tabla 2. 12 Distribución de los aprovechamientos por municipio

Municipios	Aprovechamientos registrados	Aprovechamientos censados	Aprovechamientos sin censar
Axochiapan	106	98	10
Jantetelco	142	145	7
Jonacatepec	32	27	4
Tepalcingo	67	70	5
Zacualpan de Amilpas	3	6	0
Temoac	11	8	3
Total	361	354	29

Fuente: Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Gestora de Servicios Tecnológicos

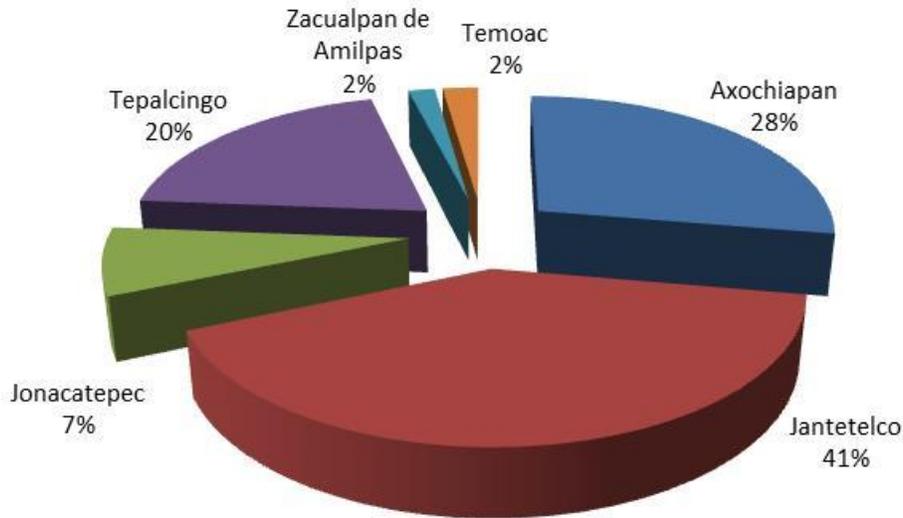


Figura 2. 11 Porcentaje de aprovechamientos por municipio

Como se muestra en la tabla anterior en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan se tienen 361 aprovechamiento registrados, de los cuales 354 se encuentran censados y los 29 restantes no.

De los 354 aprovechamientos censados se tienen los siguientes usos:

- 160 se destinan al uso agrícola,
- 123 al uso doméstico,
- 6 al industrial,
- 42 son de uso público urbano,
- 13 de uso pecuario y
- 10 para servicios,

En tabla siguiente se desglosa la distribución por uso y ubicación.

Tabla 2. 13 Uso de los aprovechamiento en el acuífero

MUNICIPIO	Uso del agua por aprovechamientos						Total
	Agrícola	Doméstico	Industria I	Pecuario	Público urbano	Otros	
Axochiapan	58	15	4	0	18	3	98
Jantetelco	37	85	1	6	10	6	145
Jonacatepec	11	9	1	4	2	0	27

Tabla 2. 13 Uso de los aprovechamiento en el acuífero

MUNICIPIO	Uso del agua por aprovechamientos						Total
	Agrícola	Doméstico	Industrial	Pecuario	Público urbano	Otros	
Tepalcingo	51	10	0	1	8	0	70
Zacualpan de Amilpas	2	4	0	0	0	0	6
Temoac	1	0	0	2	4	1	8
Total	160	123	6	13	42	10	354

Fuente: Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Gestora de Servicios Tecnológicos

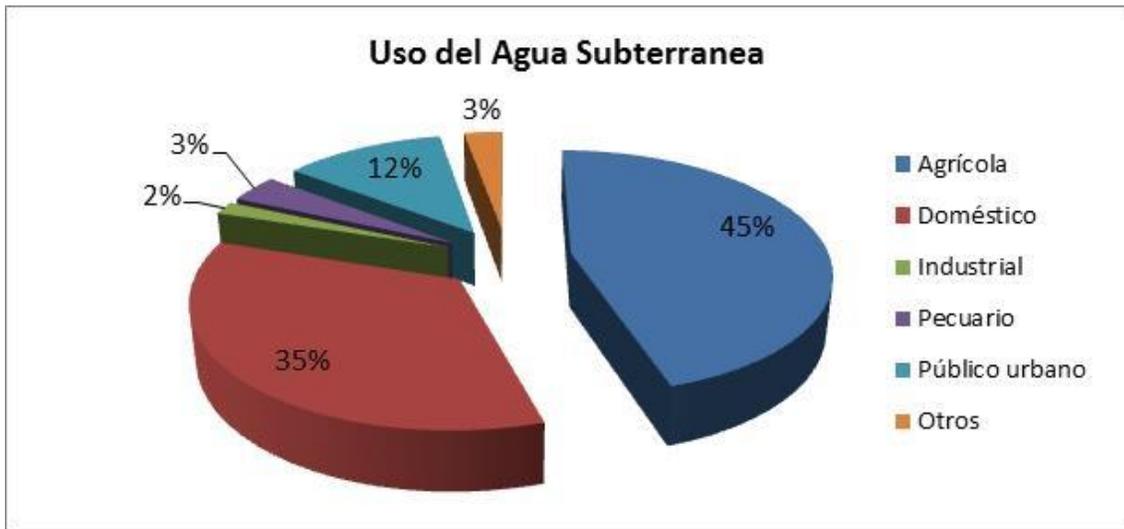


Figura 2. 12 Porcentaje de los aprovechamientos por tipo de uso

Volumen extraído

De los resultados del censo y del registro del REPDA, los aprovechamientos se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes cuatro grupos:

- Aprovechamientos censados y activos
- Aprovechamientos censados e inactivos
- Aprovechamientos no censados
- Aprovechamientos irregulares

El volumen de extracción de los aprovechamientos censados y activos por municipio se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. 14 Volumen extraído por municipio.

Municipio	Volumen de extracción (hm ³ /año)
Axochiapan	15
Jantetelco	2.23
Jonacatepec	1.3
Tepalcingo	10.59
Zacualpan de Amilpas	0.01
Temoac	0.9
Total	30.03

Fuente: Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Gestora de Servicios Tecnológicos

El volumen de los aprovechamientos censados y activos corresponde a 30.03 hm³/año; el volumen de los 29 aprovechamientos no censados se consideró igual al registrado en el REPDA (6.42 hm³/año). Además el estudio estima un volumen de extracción de usuarios con pozos y norias clandestinas con un valor de 5.52 hm³/año. Haciendo un volumen total aproximado de **41.97 hm³/año** para todo el acuífero.

Tabla 2. 15 Volumen total de extracción

Volumen censado, hm ³	No censados (REPDA), hm ³	Estimación volumen clandestino, hm ³	Volumen total de extracción, hm ³
30.03	6.42	5.52	41.97

Fuente: Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Gestora de Servicios Tecnológicos

Del volumen subterráneo el usuario que mayor cantidad de agua demanda es el sector agrícola con el 88% (36.93 hm³) del volumen extraído, seguido por el uso público urbano con el 11% (4.0 hm³) y el 1% restante para uso industrial (0.4 hm³).

2.7. Balance de agua subterránea

De acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000 el método para determinar la recarga total media anual de agua subterránea se determina de la siguiente mediante el balance aguas subterráneas.

$$R_T = \Delta V(S) - D_T$$

Ecuación 4

Dónde:

R_T = Recarga total (suma de todas las entradas)

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

D_T = Descarga total (suma de todas las salidas)

La Ecuación 4 se puede representar de la siguiente manera:

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

Ecuación 5

Dónde:

Rv= Recarga vertical

Eh=Entrada por flujo subterráneo horizontal

Ri= Recarga inducida

B= Bombeo

Sh= Salida por flujo subterráneo horizontal

Dm= Descarga de manantiales

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

Recarga vertical

La recarga vertical es una variable que mayor incertidumbre implica en la determinación del balance hidráulico, para esto tomando en consideración que es posible calcular el cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ y los demás parámetros, la ecuación anterior se deja en función esta variable, quedando la siguiente expresión:

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

Ecuación 6

Caudal horizontal

Para calcular el volumen de agua horizontal se aplica la ley de Darcy, esta establece que el caudal de flujo subterráneo (Q), está dada por:

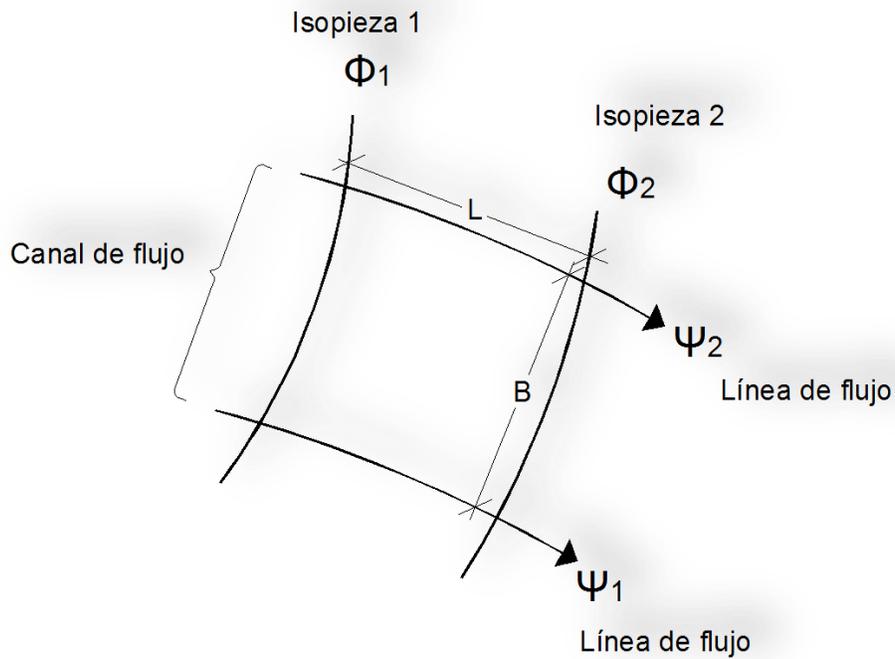


Figura 2. 13 Configuración ley de Darcy

$$Q = TB \frac{d\phi}{L}$$

Ecuación 7

Dónde:

Q=Caudal que pasa por el canal de flujo

T= Transmisividad

B= Ancho del canal de flujo

$d\phi/L$ = Gradiente hidráulico de la celda denominado con la letra i

Φ_1 y Φ_2 , son las cargas hidráulicas definidas por curvas de igual elevación del nivel estático en metros sobre el nivel del mar en las secciones de entrada o salida del flujo, y

L es la longitud entre dichas curvas de igual potencial hidráulico (equipotenciales)

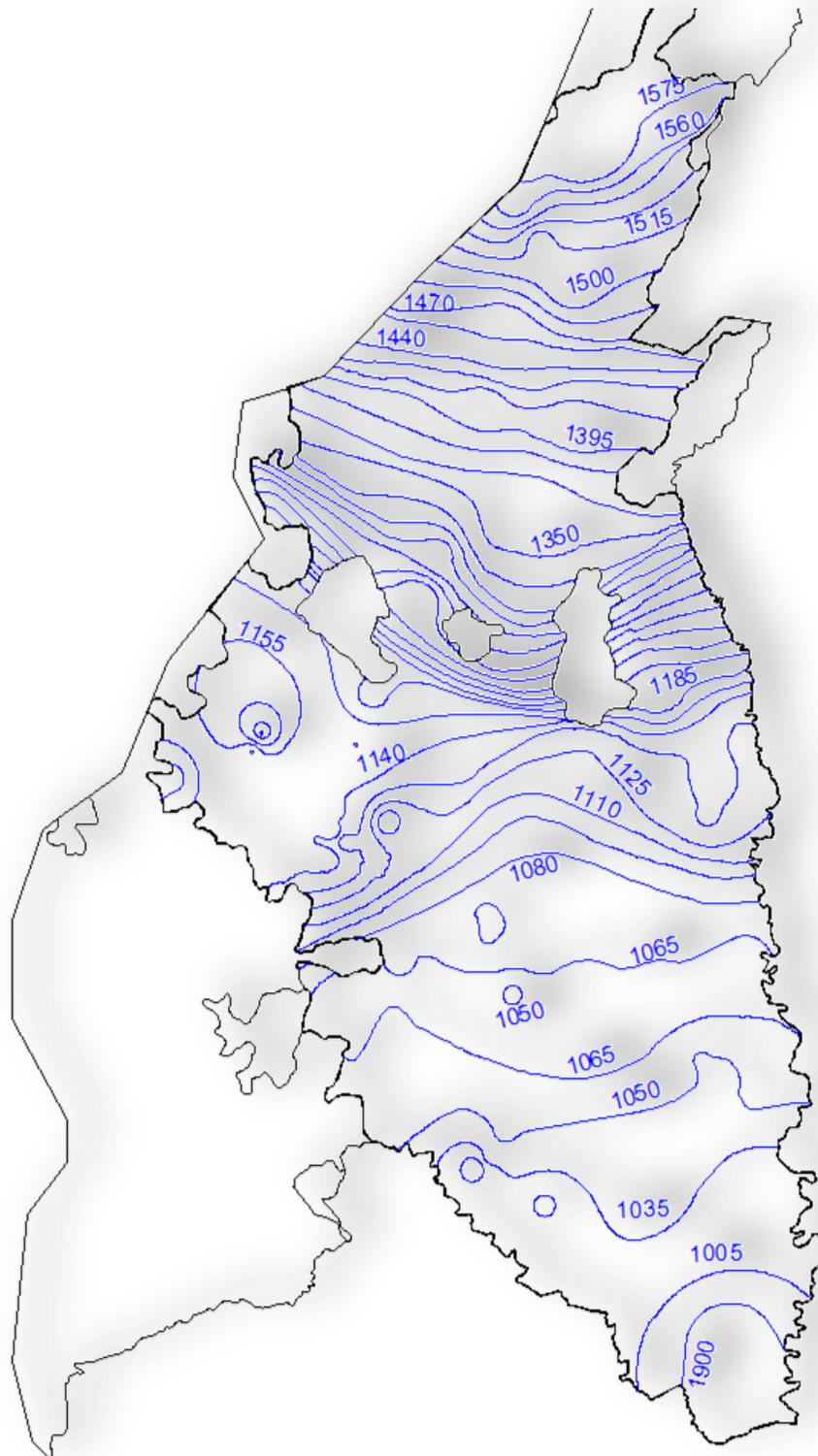


Figura 2. 14 Distribución de las cargas hidráulicas en el acuífero

- **(Eh) Entradas horizontales**

En la siguiente figura se muestra la sección utilizada para el cálculo de las entradas horizontales del flujo subterráneo en el acuífero.

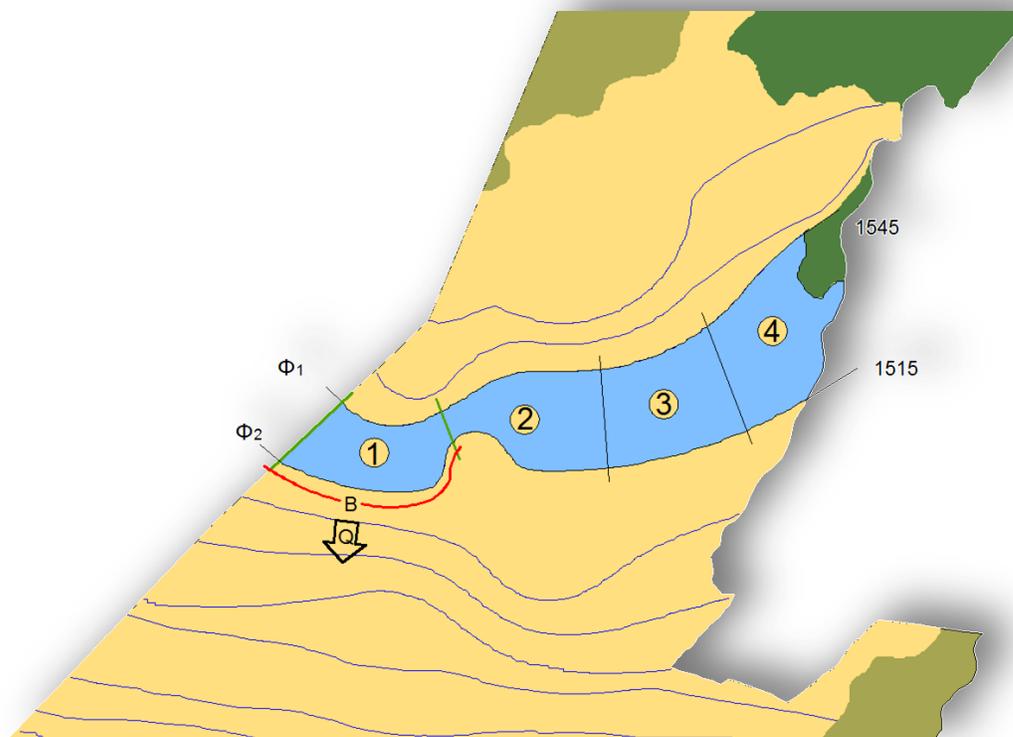


Figura 2. 15 Área seleccionada para el cálculo de las entradas subterráneas horizontales.

De acuerdo al cálculo realizado en la tabla siguiente se muestran los valores obtenidos en cada tubo, la suma de estos da un volumen total de entradas horizontales de flujo subterráneo de **12.20 hm³/año**.

Tabla 2. 16 Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2010)

Tubo	ϕ_1 (msnm)	ϕ_2 (msnm)	L (m)	i (m/m)	T (m ² /s)	Ancho tubo B (m)	Q entrada (m ³ /día)	Volumen (hm ³ /año)
1	1545	1515	443	0.0677	0.001	2027	0.137	4.33
2	1545	1515	443	0.0677	0.001	2203	0.149	4.70
3	1545	1515	823	0.0365	0.001	1780	0.065	2.05
4	1545	1515	1353	0.0222	0.001	1606	0.036	1.12
Volumen de entradas subterráneas horizontales								12.20

- **(Sh) Salidas horizontales**

El igual que las entradas horizontales de flujo subterráneo se aplicó la misma metodología para calcular las salidas horizontales de flujo subterráneo.

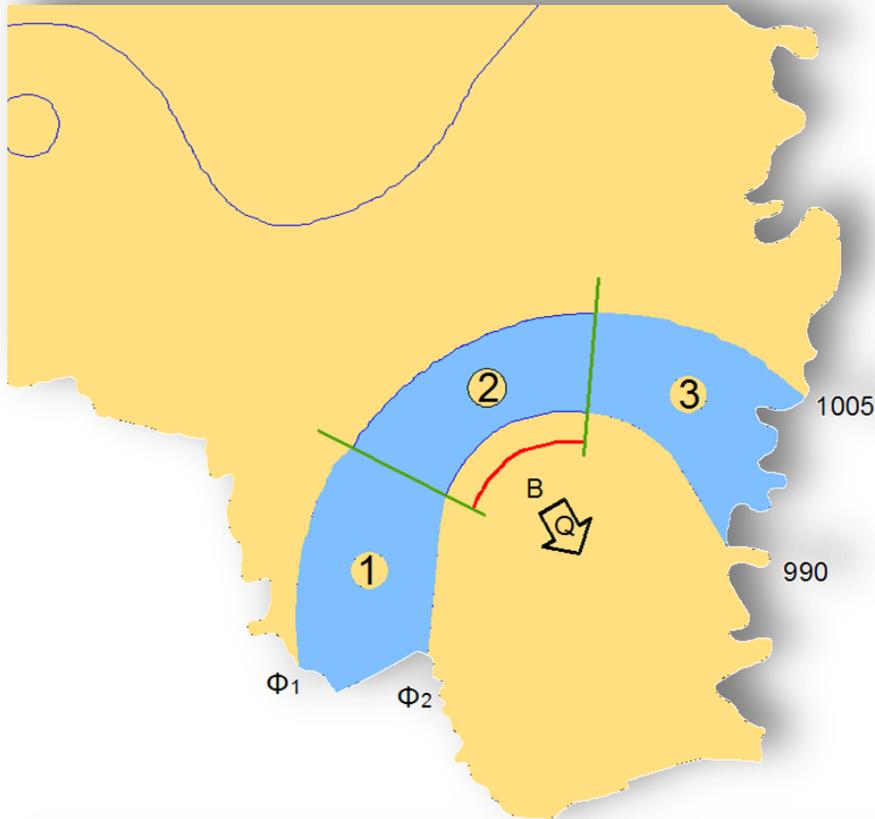


Figura 2. 16 Área seleccionada para el cálculo de las salidas subterráneas horizontales.

Tabla 2. 17 Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2010)

Tubo	ϕ_1 (msnm)	ϕ_2 (msnm)	L (m)	i (m/m)	T (m ² /s)	Ancho tubo B (m)	Q entrada (m ³ /día)	Volumen (hm ³ /año)
1	1005	990	1086	0.0138	0.001	2205	0.030	0.96
2	1005	990	943	0.0159	0.001	2369	0.038	1.19
3	1005	990	1032	0.0145	0.001	2083	0.030	0.95
Volumen de salidas subterráneas horizontales								3.10

(Ri) Recarga inducida

Cierta cantidad del volumen de agua utilizado en los sistemas de riego no es usado como uso consuntivo, una parte de este se infiltra y eventualmente alcanza los niveles freáticos, para que esto ocurra depende de un conjunto de factores, como las propiedades del suelo, condiciones climáticas y de la profundidad del nivel estático. A este acontecimiento se le conoce como retorno de riego, y de acuerdo a estudios realizados por Jacob Bear (1970) el valor varía entre 20 y 40%. Para el caso de México los porcentajes recomendados son los siguientes:

Tabla 2. 18 Porcentaje de retornos

Uso del agua	Rango de %
Urbano	70-80
Agrícola	5-15
Industrial	5-15
Pecuario	50-60
Acuícola	80-90

Fuente: Evaluación de los recursos hídricos: Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrológicas, IMTA.

En la zona del acuífero no se tiene información de la las láminas de riego de los cultivos, por lo que se considera un valor del 10% del volumen utilizado para para uso agrícola (66.53 hm³). Por lo que el volumen asignado a la recarga inducida es de **6.653 hm³**.

(Dm) Descarga de manantiales

De acuerdo a con la información de Conagua la descarga de los manantiales en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan es de **5.2 hm³** anuales.

(B) Bombeo

Como se mencionó en la sección 2.6 el volumen de extracción de agua subterránea en el acuífero es de **41.97 hm³/año**.

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

Para el calcular el cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la evolución del nivel estático en acuífero el periodo 2004-2010.

Para el cálculo del cambio de almacenamiento se utiliza la siguiente expresión.

$$\text{Cambio de almacenamiento} = (\text{Abatimiento}_{\text{prom}})(A)(S) = \Delta V(S)$$

Ecuación 8

Tabla 2. 19 Cálculo del cambio de almacenamiento (2010)

Evolución (m)	Abatimiento promedio (m)	Área (km ²)	S	$\Delta V(S)$
-2 a -4	-3	43.3	0.01	-1.3
-2 a -10	-6	5.3	0.01	-0.3
-4 a -10	-7	58.2	0.01	-4.1
-10	-10	21.7	0.01	-2.2
-10 a -20	-15	13.8	0.01	-2.1
-20	-20	1.2	0.01	-0.2
-10 a -30	-20	13.9	0.01	-2.8
-30	-30	4.4	0.01	-1.3
0	0	509.2	0.01	-
Área de balance		671	Total	-14.3
			Promedio	-1.8

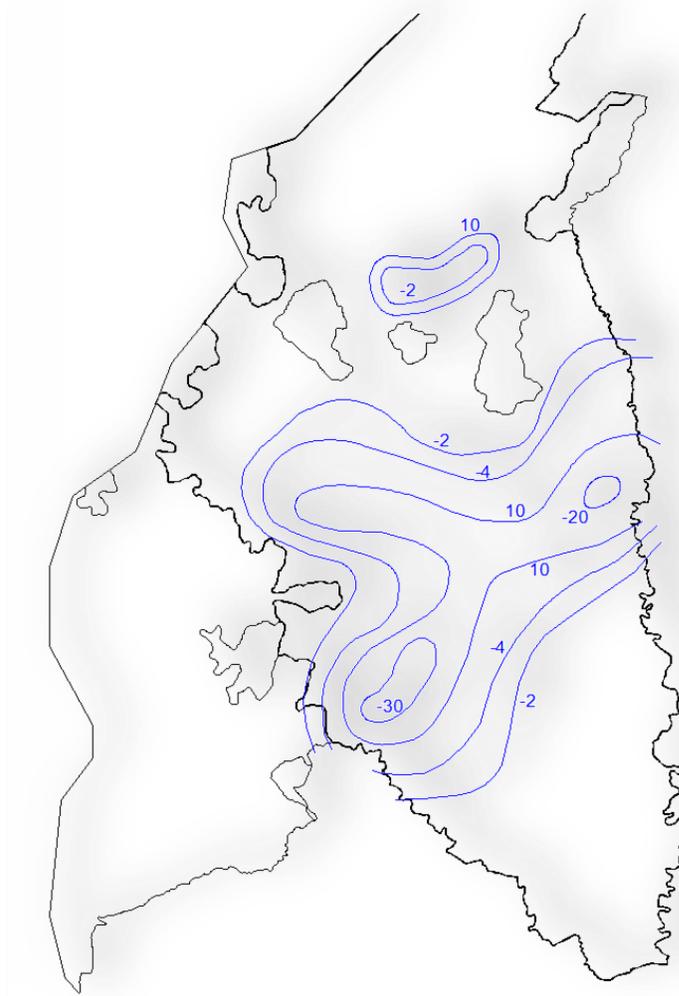


Figura 2. 17 Evolución del nivel estático en m (2004-2010)

Solución a la ecuación de balance

Ya calculadas las variables de la ecuación de balance se procede a determinar la recarga vertical mediante la siguiente ecuación:

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

$$Rv = 41.97 + 3.1 + 5.2 - 12.2 - 6.653 - 1.8$$

$$Rv = 29.617 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la recarga total es la suma de todas las entradas

$$Rt = Rv + Eh + Ri$$

$$Rt = 29.617 + 12.2 + 6.653$$

$$Rt = 48.47 \text{ hm}^3/\text{año}$$

2.8. Disponibilidad media anual de agua subterránea

El cálculo de la disponibilidad media anual de agua subterránea debe realizarse de acuerdo a lo que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, la cual dice que la determinación de esta disponibilidad se hace aplicando la expresión siguiente:

$$DAS = RTMA - DNC - VCAS$$

Ecuación 9

- DMAAS: Disponibilidad media anual de agua subterránea
- RTMA: Recarga total media anual
- DNC: Descarga natural comprometida
- VCAS: Volumen concesionado de agua subterránea

(RTMA) Recarga total media anual

La recarga total media anual, tal como se calculó, corresponde a todos los volúmenes que ingresan al acuífero. El valor de la recarga total es de **48.47 hm³/año**.

(DNC) Descarga natural comprometida

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las salidas por flujo subterráneo que se deben conservar para no afectar a los

acuíferos adyacentes y finalmente las descargas naturales por evapotranspiración que permitan sostener el gasto ecológico.

Para este caso, con el estudio de Actualización Geohidrológica, se constató que los manantiales existentes en el área no interfieren en el funcionamiento y/o comportamiento del acuífero, por lo que los volúmenes de sus descargas se consideraron nulos en la determinación de la DNC.

Por otra parte, el fenómeno de la evapotranspiración solamente se presenta en el área de influencia de las descargas de los manantiales, en el resto del área los niveles freáticos tienen profundidades mayores de 10 metros con respecto a la superficie del terreno, por esta razón, también el volumen evapotranspirado se consideró nulo.

De tal manera que la descarga natural comprometida (DNC), se determinó sumando únicamente el flujo base de los ríos Tepalcingo y Amatzinac (2.44 hm^3) y el flujo subterráneo de salida ($3.1 \text{ hm}^3/\text{año}$) hacia el acuífero adyacente que se localiza al sur del área evaluada; resultando para este caso una descarga natural comprometida de **5.54 $\text{hm}^3/\text{año}$** .

(VCAS) Volumen concesionado de agua subterránea

El volumen concesionado de agua subterránea, se determina sumando los volúmenes anuales de agua, asignados y concesionados por la Comisión Nacional del Agua mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) para la explotación, uso o aprovechamientos de agua del acuífero.

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el REPDA, de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte a 31 diciembre de 2009 es de $34.82 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Sin embargo para el cálculo de la disponibilidad se tomó el volumen de agua explotado en el año 2010 (**41.97 hm^3**).

(DAS) Disponibilidad media anual de agua subterránea 2010

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.

Por lo que la disponibilidad media de agua subterránea para el año 2010 es de:

$$DAS = 48.47 - 5.54 - 41.97$$

$$**DAS = 0.96 \text{ hm}^3/\text{año}**$$

Esto significa que en el año 2010 se tenía una disponibilidad de 0.96 hm³/año, a pesar de que es un volumen positivo no garantiza la sostenibilidad futura.

CAPÍTULO III

3. Pronostico

3.1. Proyecciones

Proyección de la demanda uso público urbano.

Para la proyección de la población se tomarán los datos históricos obtenidos de los censos de población y vivienda elaborados por el INEGI. En el *Anexo 3 Proyección de la población* se evalúan los siguientes métodos:

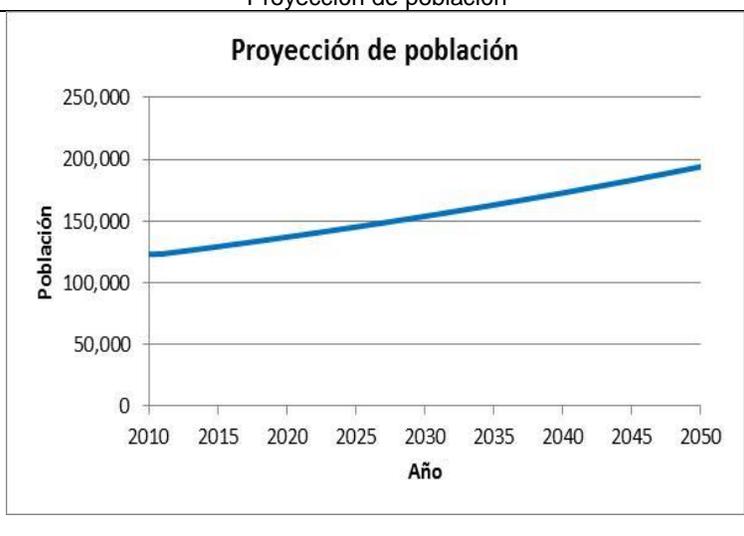
- Proyección lineal
- Proyección exponencial
- Proyección logarítmica
- Proyección potencial

De los resultados obtenidos en las proyecciones se seleccionó el ajuste exponencial, en la tabla y figura siguiente se muestran los valores obtenidos.

Tabla 3. 1
Proyección de la población

Año	Población	Tasa de crecimiento
2010	123112	1.47%
2015	129,386	1.17%
2020	137,108	1.17%
2025	145,291	1.17%
2030	153962	1.17%
2035	163,151	1.17%
2040	172,888	1.17%
2045	183,207	1.17%
2050	194,141	1.17%

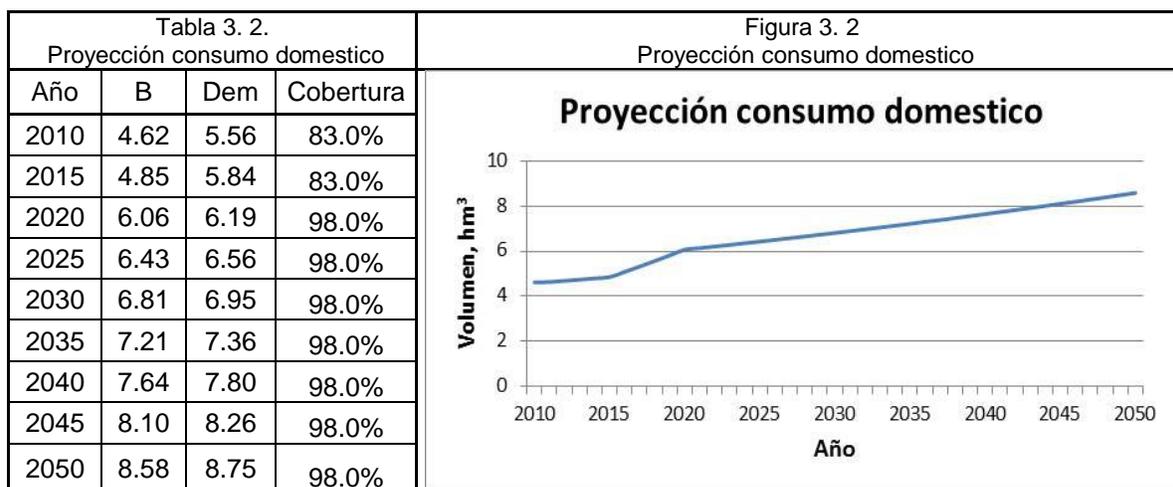
Figura 3. 1
Proyección de población



De acuerdo a los resultados del censo poblacional INEGI 2010 la cobertura de agua potable fue del 68.76% este porcentaje solo aplica a las viviendas particulares habitadas con servicio de agua dentro de la vivienda. En ese año el

volumen explotado fue de 4.62 hm³, sin embargo el volumen requerido para satisfacer a toda la población fue de 5.56 hm³, quiere decir que la cobertura de agua potable en el año 2010 fue del 83%. Considerando que del año 2010 al 2015 no hubo desarrollo en la infraestructura de abasto agua para el uso público, la cobertura del año 2010 se considera igual a legar al año 2015.

Ya para el año 2016 la cobertura de agua potable en el acuífero debe ir en aumento, con la finalidad de llegar 98% de esta, por lo que se proyecta un aumento de 3% anual, así en el año 2020 se tendría esa cobertura.



Proyección uso agrícola

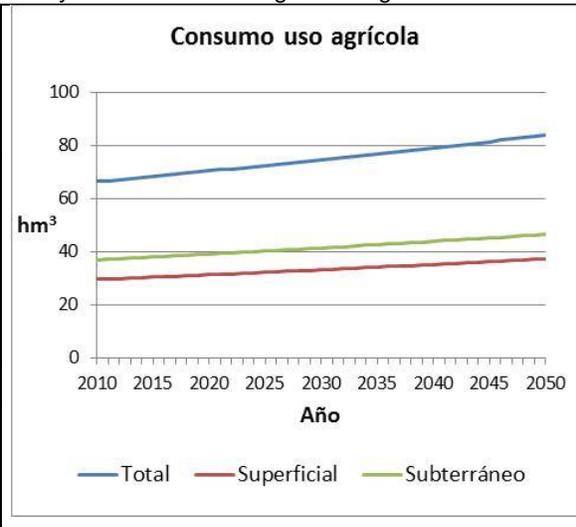
De acuerdo al estudio “El futuro del sector agropecuario en México basada en Nueva Visión de Agricultura” realizado por la Food and Agriculture Organization (FAO, por sus siglas en inglés) se espera que la demanda global de alimentos se incremente en un 70% para el año 2050. Además el mismo estudio estima una expansión de tierras para la producción agrícola de 5 a 7% por cada década (comparable 2010-2020).

Tomando en cuenta un crecimiento del 6% por cada década, y el volumen de agua superficial y subterráneo utilizado para uso agrícola en el año 2010 (66.53 hm³) como base de las proyecciones, se estima el siguiente aumento el volumen consumido:

Tabla 3. 3
Proyección volumen uso agrícola

Año	Superficie km ²	Volumen, hm ³		
		Total	Superficial	Subterráneo
2010	508.84	66.53	29.60	36.93
2015	524.11	68.53	30.49	38.04
2020	539.37	70.52	31.38	39.15
2025	555.55	72.64	32.32	40.32
2030	571.73	74.75	33.26	41.50
2035	588.89	77.00	34.26	42.74
2040	606.04	79.24	35.25	43.99
2045	624.22	81.62	36.31	45.30
2050	642.40	83.99	37.37	46.62

Figura 3. 3
Proyección volumen asigna uso agrícola 2010-2050



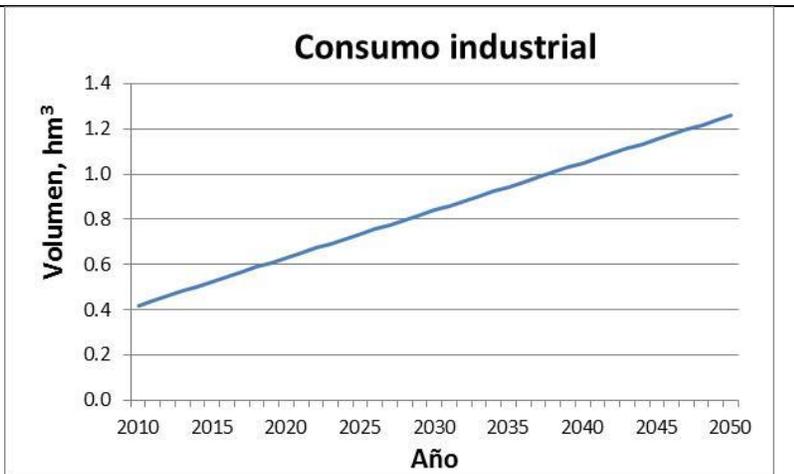
Proyección uso industrial

De acuerdo a un estudio realizado la empresa consultora, (Aregional) la actividad económica en el país crecerá 3.8% promedio anual, los estados que presentaran un mayor crecimiento son Morelos, Nuevo León, Puebla, Quintana Roo, Sinaloa, Sonora, y Zacatecas con un porcentaje mayor al 5%, tomando en cuenta este crecimiento la demanda del volumen de agua para el uso industrial presentará la siguiente evolución.

Tabla 3. 4
Volumen uso industrial proyectado

Año	Volumen
2010	0.42
2020	0.63
2030	0.84
2040	1.05
2050	1.26

Figura 3. 4
Volumen uso industrial proyectado



Cambio climático

En los últimos años el cambio climático ha sido uno de los aspectos ambientales ha alcanzado mayor eco social. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizó el estudio “Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático” en el que se proyectan las variaciones en la temperatura y precipitación para los estados de la Republica de acuerdo al escenario SERES A2. Considerando estos cambios en el estado de Morelos se presentaran las siguientes variaciones en la temperatura y precipitación:

Tabla 3. 5 Variación climática (2061-2090), escenario SERES A2

	Invierno	Verano	Anual
Precipitación (%)	-20.69	-13.76	-12.84
Temperatura (°C)	+2.75	+3.24	+3.09

De acuerdo a estas variaciones la precipitación presentará la siguiente disminución:

Tabla 3. 6 Variación precipitación (2061-2090), escenario SERES A2

Precipitación actual	% disminuido	Precipitación ante el cambio climático
849 mm	12	747.12 mm

En cuanto a la temperatura media presentada (20.5 °C) esta disminuirá a 17.41°C

3.2. Descripción de escenarios

Para la elaboración de los escenarios en los cuales se proyectara la de manda de agua para estimar la disponibilidad futura en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan se tomó como año limite el 2050.

- **Tendencia actual**

Este escenario tiene como objetivo conocer la disponibilidad futura de agua subterránea en el acuífero, considera que la demanda de agua de los diferentes usuarios aumenta en función de su crecimiento y que no se realiza modernización ni cambio en los hábitos de la población.

De acuerdo a la norma NOM-011-CNA-2000 para determinar el la disponibilidad de agua se requiere el volumen concesionado de agua subterránea (VCAS), este volumen es obtenido sumando el volumen que se le concesiona a cada usuario con aprovechamientos de agua subterránea, para este análisis la disponibilidad futura se evaluará utilizando el volumen requerido para cubrir la demanda de los sectores público urbano, agrícola e industrial.

De acuerdo a la proyección de la demanda de agua de los sectores agrícola, público urbano e industrial se obtiene el volumen requerido de agua subterránea.

Tabla 3. 7 Determinación del volumen total requerido

Año	Público urbano	Agricultura	Industria	Vt de extracción
2010	4.62	36.93	0.42	41.97
2015	4.85	38.04	0.52	43.42
2020	6.06	39.15	0.63	45.84
2025	6.43	40.32	0.73	47.48
2030	6.81	41.50	0.84	49.15
2035	7.21	42.74	0.94	50.90
2040	7.64	43.99	1.05	52.68
2045	8.10	45.31	1.15	54.56
2050	8.58	46.63	1.26	56.46

Para determinar la recarga total se parte de que las recarga vertical y la entrada horizontal son constantes, y que solo la recarga inducida varia, este volumen esta en función del volumen total de utilizado para uso agrícola.

Tabla 3. 8 Determinación de la recarga total

Año	Rt	=	Rv	+	Eh	+	Ri
2010	48.47	=	29.617	+	12.2	+	6.653
2015	48.67	=	29.617	+	12.2	+	6.853
2020	48.87	=	29.617	+	12.2	+	7.052
2025	49.08	=	29.617	+	12.2	+	7.264
2030	49.29	=	29.617	+	12.2	+	7.475
2035	49.52	=	29.617	+	12.2	+	7.700
2040	49.74	=	29.617	+	12.2	+	7.924
2045	49.98	=	29.617	+	12.2	+	8.162
2050	50.22	=	29.617	+	12.2	+	8.399

La descarga natural comprometida (DNC) se considera constante al considerar que el flujo base y la salida horizontal del flujo subterráneo no presenta variación alguna al ser valores medios.

Tabla 3. 9 Proyección de DAS (Tendencia actual)

Año	DAS	=	Rt	-	DNC	-	Vt de extracción
2010	0.96	=	48.47	-	5.54	-	41.97
2015	-0.29	=	48.67	-	5.54	-	43.42
2020	-2.51	=	48.87	-	5.54	-	45.84
2025	-3.94	=	49.08	-	5.54	-	47.48
2030	-5.39	=	49.29	-	5.54	-	49.15
2035	-6.92	=	49.52	-	5.54	-	50.90
2040	-8.48	=	49.74	-	5.54	-	52.68
2045	-10.12	=	49.98	-	5.54	-	54.56
2050	-11.79	=	50.22	-	5.54	-	56.46

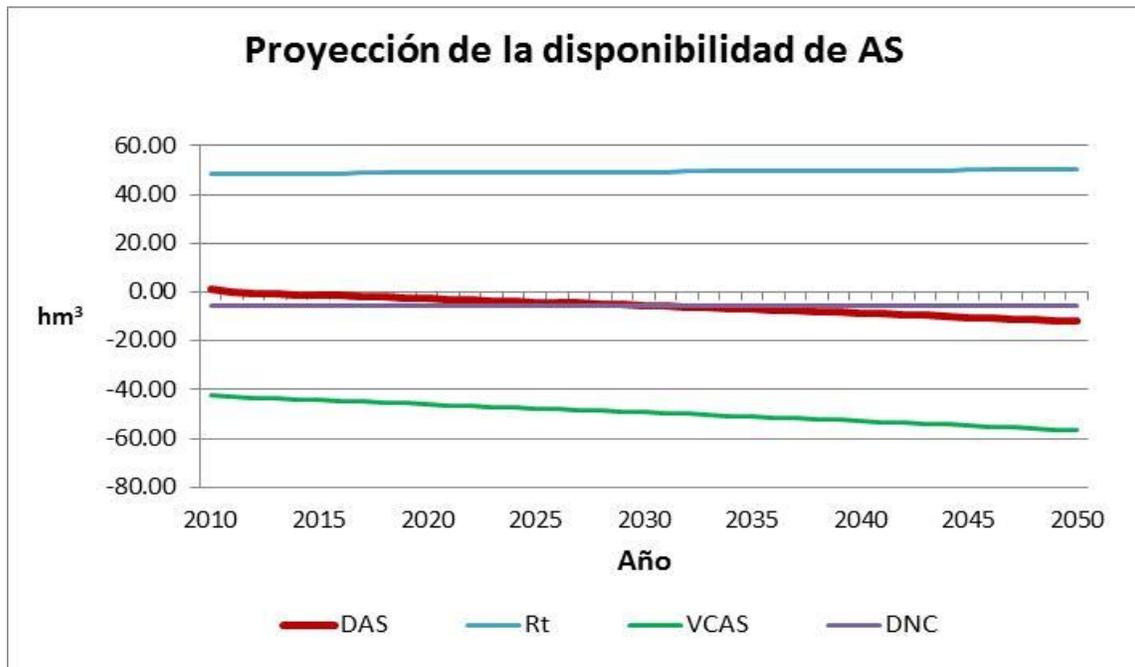


Figura 3. 5 Proyección de la Disponibilidad de Agua Subterránea en el Acuífero de Tepalcingo-Axochiapan

Como se puede observar, al seguir con la tendencia actual la disponibilidad de agua subterránea disminuye cada, de tal manera que en el año 2015 el acuífero presenta nuevamente un déficit de 1.28 hm^3 , y así para el año 2050 el déficit estimado será de 11.96 hectómetros cúbicos.

- **Máxima tecnificación**

Para analizar este escenario, que tiene como objetivo conocer el comportamiento del acuífero, se consideran solo las acciones de mejora en la tecnificación de los sistemas de riego para el uso agrícola, debido a que el sector público urbano no puede reducir su volumen de extracción, ya que el volumen estimado para este sector es el volumen necesario para cubrir con sus necesidades (sección 2.4 y 3.1). Y en el caso del sector industrial, el volumen utilizado solo representa el 0.1% del volumen total extraído por lo que no es significativo.

En la tabla siguiente se muestran los porcentajes de eficiencia dependiendo el método de riego.

Tabla 3. 10 Eficiencia de los métodos de riego

Método de riego	Eficiencia (%)
Gravedad	30 – 70
Aspersión	80 – 85
Goteo	Mayor a 90

Para el siguiente análisis se considera que del 100% del volumen extraído para uso agrícola el 30% del volumen total se desperdicia. Para esto si se tecnifican los sistemas de riego actuales, suponiendo un crecimiento del 20% anual, el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan presentaría la siguiente evolución en su disponibilidad:

En el análisis se considera que existe disponibilidad de agua superficial, por lo que del total del volumen utilizado para uso agrícola el porcentaje de agua extraído superficialmente se mantiene, o en su caso aumenta en las proyecciones, para así poder recargar el acuífero.

Para las proyecciones se propone un crecimiento del 4% anual hasta alcanzar el 100% de tecnificación en el año 2040.

Tabla 3. 11

Análisis de la disponibilidad de agua subterránea. Tecnificando la agricultura por sistema de Aspersión

ST	Año	Vol. Extraído, hm ³			Vt Extraído	Rv hm ³	Eh hm ³	Ri hm ³	Rt hm ³	DNC hm ³	DAS hm ³
		Público Urbano	Agricultura	Industria							
0%	2010	4.62	36.93	0.42	41.97	29.62	12.2	6.653	48.47	5.54	0.96
0%	2011	4.63	37.16	0.44	42.23	29.62	12.2	6.693	48.51	5.54	0.74
0%	2012	4.69	37.38	0.46	42.52	29.62	12.2	6.733	48.55	5.54	0.49
0%	2013	4.74	37.60	0.48	42.82	29.62	12.2	6.773	48.59	5.54	0.23
0%	2014	4.79	37.82	0.50	43.12	29.62	12.2	6.813	48.63	5.54	-0.03
0%	2015	4.85	38.04	0.52	43.42	29.62	12.2	6.853	48.67	5.54	-0.29
5%	2016	5.08	37.73	0.55	43.35	29.62	12.2	6.839	48.66	5.54	-0.24
10%	2017	5.32	37.40	0.57	43.29	29.62	12.2	6.824	48.64	5.54	-0.19
15%	2018	5.56	37.07	0.59	43.23	29.62	12.2	6.809	48.63	5.54	-0.14
20%	2019	5.81	36.74	0.61	43.16	29.62	12.2	6.793	48.61	5.54	-0.09
25%	2020	6.06	36.40	0.63	43.09	29.62	12.2	6.777	48.59	5.54	-0.04
30%	2021	6.14	36.06	0.65	42.85	29.62	12.2	6.762	48.58	5.54	0.19
35%	2022	6.21	35.72	0.67	42.60	29.62	12.2	6.747	48.56	5.54	0.42
40%	2023	6.28	35.37	0.69	42.35	29.62	12.2	6.731	48.55	5.54	0.66
45%	2024	6.35	35.02	0.71	42.08	29.62	12.2	6.714	48.53	5.54	0.91
50%	2025	6.43	34.66	0.73	41.82	29.62	12.2	6.697	48.51	5.54	1.16
55%	2026	6.50	34.29	0.76	41.55	29.62	12.2	6.679	48.50	5.54	1.41
60%	2027	6.58	33.92	0.78	41.27	29.62	12.2	6.661	48.48	5.54	1.67
65%	2028	6.65	33.53	0.80	40.98	29.62	12.2	6.641	48.46	5.54	1.93
70%	2029	6.73	33.15	0.82	40.69	29.62	12.2	6.621	48.44	5.54	2.20
75%	2030	6.81	32.75	0.84	40.40	29.62	12.2	6.601	48.42	5.54	2.48
80%	2031	6.89	32.36	0.86	40.11	29.62	12.2	6.582	48.40	5.54	2.75
85%	2032	6.97	31.97	0.88	39.81	29.62	12.2	6.562	48.38	5.54	3.03
90%	2033	7.05	31.56	0.90	39.51	29.62	12.2	6.541	48.36	5.54	3.31
95%	2034	7.13	31.15	0.92	39.20	29.62	12.2	6.520	48.34	5.54	3.59
100%	2035	7.21	30.73	0.94	38.89	29.62	12.2	6.498	48.32	5.54	3.89
100%	2036	7.30	30.31	0.97	38.57	29.62	12.2	6.476	48.29	5.54	4.18
100%	2037	7.38	29.88	0.99	38.24	29.62	12.2	6.453	48.27	5.54	4.49
100%	2038	7.47	29.44	1.01	37.91	29.62	12.2	6.429	48.25	5.54	4.80
100%	2039	7.55	28.99	1.03	37.57	29.62	12.2	6.404	48.22	5.54	5.11
100%	2040	7.64	28.54	1.05	37.23	29.62	12.2	6.379	48.20	5.54	5.43
100%	2041	7.73	28.11	1.07	37.51	29.62	12.2	6.417	48.23	5.54	5.19
100%	2042	7.82	28.88	1.09	37.79	29.62	12.2	6.455	48.27	5.54	4.94
100%	2043	7.91	29.05	1.11	38.07	29.62	12.2	6.493	48.31	5.54	4.70
100%	2044	8.00	29.22	1.13	38.36	29.62	12.2	6.532	48.35	5.54	4.45
100%	2045	8.10	29.39	1.15	38.64	29.62	12.2	6.570	48.39	5.54	4.20
100%	2046	8.19	29.56	1.18	38.93	29.62	12.2	6.608	48.43	5.54	3.96
100%	2047	8.28	29.74	1.20	39.22	29.62	12.2	6.647	48.46	5.54	3.71
100%	2048	8.38	29.91	1.22	39.50	29.62	12.2	6.685	48.50	5.54	3.46
100%	2049	8.48	30.08	1.24	39.79	29.62	12.2	6.723	48.54	5.54	3.21
100%	2050	8.58	30.25	1.26	40.08	29.62	12.2	6.761	48.58	5.54	2.95

ST= Porcentaje Superficie Tecnificada; **Vt**=Volumen total; **Rv**=Recarga vertical; **Eh**=Entrada horizontal; **Ri**=Recarga inducida; **Rt**=Recarga total; **DNC**=Descarga natural comprometida; **DAS**=Disponibilidad de agua subterránea.

Tabla 3. 12
Análisis de la disponibilidad de agua subterránea. Tecnificando la agricultura por sistema de Goteo

ST	Año	Vol. Extraído, hm ³			Vt Extraído	Rv	Eh	Ri	Rt	DNC	DAS
		Público Urbano	Agricultura	Industria							
0%	2010	4.62	36.93	0.42	41.97	29.62	12.2	6.653	48.47	5.54	0.96
0%	2011	4.63	37.16	0.44	42.23	29.62	12.2	6.693	48.51	5.54	0.74
0%	2012	4.69	37.38	0.46	42.52	29.62	12.2	6.733	48.55	5.54	0.49
0%	2013	4.74	37.60	0.48	42.82	29.62	12.2	6.773	48.59	5.54	0.23
0%	2014	4.79	37.82	0.50	43.12	29.62	12.2	6.813	48.63	5.54	-0.03
0%	2015	4.85	38.04	0.52	43.42	29.62	12.2	6.853	48.67	5.54	-0.29
5%	2016	5.08	37.63	0.55	43.26	29.62	12.2	6.829	48.65	5.54	-0.15
10%	2017	5.32	37.21	0.57	43.10	29.62	12.2	6.805	48.62	5.54	-0.01
15%	2018	5.56	36.78	0.59	42.93	29.62	12.2	6.780	48.60	5.54	0.12
20%	2019	5.81	36.35	0.61	42.77	29.62	12.2	6.754	48.57	5.54	0.26
25%	2020	6.06	35.91	0.63	42.60	29.62	12.2	6.728	48.54	5.54	0.41
30%	2021	6.14	35.47	0.65	42.25	29.62	12.2	6.703	48.52	5.54	0.73
35%	2022	6.21	35.02	0.67	41.90	29.62	12.2	6.677	48.49	5.54	1.05
40%	2023	6.28	34.57	0.69	41.54	29.62	12.2	6.651	48.47	5.54	1.39
45%	2024	6.35	34.11	0.71	41.17	29.62	12.2	6.623	48.44	5.54	1.73
50%	2025	6.43	33.64	0.73	40.80	29.62	12.2	6.595	48.41	5.54	2.07
55%	2026	6.50	33.17	0.76	40.42	29.62	12.2	6.567	48.38	5.54	2.42
60%	2027	6.58	32.68	0.78	40.03	29.62	12.2	6.537	48.35	5.54	2.78
65%	2028	6.65	32.19	0.80	39.64	29.62	12.2	6.507	48.32	5.54	3.14
70%	2029	6.73	31.69	0.82	39.24	29.62	12.2	6.476	48.29	5.54	3.51
75%	2030	6.81	31.18	0.84	38.83	29.62	12.2	6.444	48.26	5.54	3.89
80%	2031	6.89	30.68	0.86	38.42	29.62	12.2	6.413	48.23	5.54	4.27
85%	2032	6.97	30.16	0.88	38.01	29.62	12.2	6.382	48.20	5.54	4.65
90%	2033	7.05	29.64	0.90	37.59	29.62	12.2	6.350	48.17	5.54	5.03
95%	2034	7.13	29.11	0.92	37.17	29.62	12.2	6.317	48.13	5.54	5.43
100%	2035	7.21	28.58	0.94	36.73	29.62	12.2	6.283	48.10	5.54	5.83
100%	2036	7.30	28.03	0.97	36.29	29.62	12.2	6.248	48.07	5.54	6.23
100%	2037	7.38	27.48	0.99	35.84	29.62	12.2	6.213	48.03	5.54	6.65
100%	2038	7.47	26.91	1.01	35.39	29.62	12.2	6.176	47.99	5.54	7.07
100%	2039	7.55	26.34	1.03	34.92	29.62	12.2	6.139	47.96	5.54	7.49
100%	2040	7.64	25.76	1.05	34.45	29.62	12.2	6.101	47.92	5.54	7.92
100%	2041	7.73	25.92	1.07	34.72	29.62	12.2	6.138	47.95	5.54	7.70
100%	2042	7.82	26.07	1.09	34.98	29.62	12.2	6.175	47.99	5.54	7.47
100%	2043	7.91	26.23	1.11	35.25	29.62	12.2	6.211	48.03	5.54	7.24
100%	2044	8.00	26.38	1.13	35.52	29.62	12.2	6.248	48.06	5.54	7.01
100%	2045	8.10	26.54	1.15	35.79	29.62	12.2	6.284	48.10	5.54	6.78
100%	2046	8.19	26.69	1.18	36.06	29.62	12.2	6.321	48.14	5.54	6.54
100%	2047	8.28	26.85	1.20	36.33	29.62	12.2	6.358	48.17	5.54	6.31
100%	2048	8.38	27.00	1.22	36.60	29.62	12.2	6.394	48.21	5.54	6.07
100%	2049	8.48	27.15	1.24	36.87	29.62	12.2	6.431	48.25	5.54	5.84
100%	2050	8.58	27.31	1.26	37.15	29.62	12.2	6.467	48.28	5.54	5.60

ST= Porcentaje Superficie Tecnificada; **Vt**=Volumen total; **Rv**=Recarga vertical; **Eh**=Entrada horizontal; **Ri**=Recarga inducida; **Rt**=Recarga total; **DNC**=Descarga natural comprometida; **DAS**=Disponibilidad de agua subterránea.

De acuerdo a los resultados del análisis anterior los resultados comienzan a obtenerse a corto plazo, en el caso de tecnificación por aspersión en el año 2021 el acuífero comienza a tener disponibilidad, para el caso de tecnificación por goteo los resultados se dan en el año 2018.

En la gráfica siguiente se muestra la evolución de la disponibilidad con la tendencia actual y la tecnificación por aspersión y goteo.

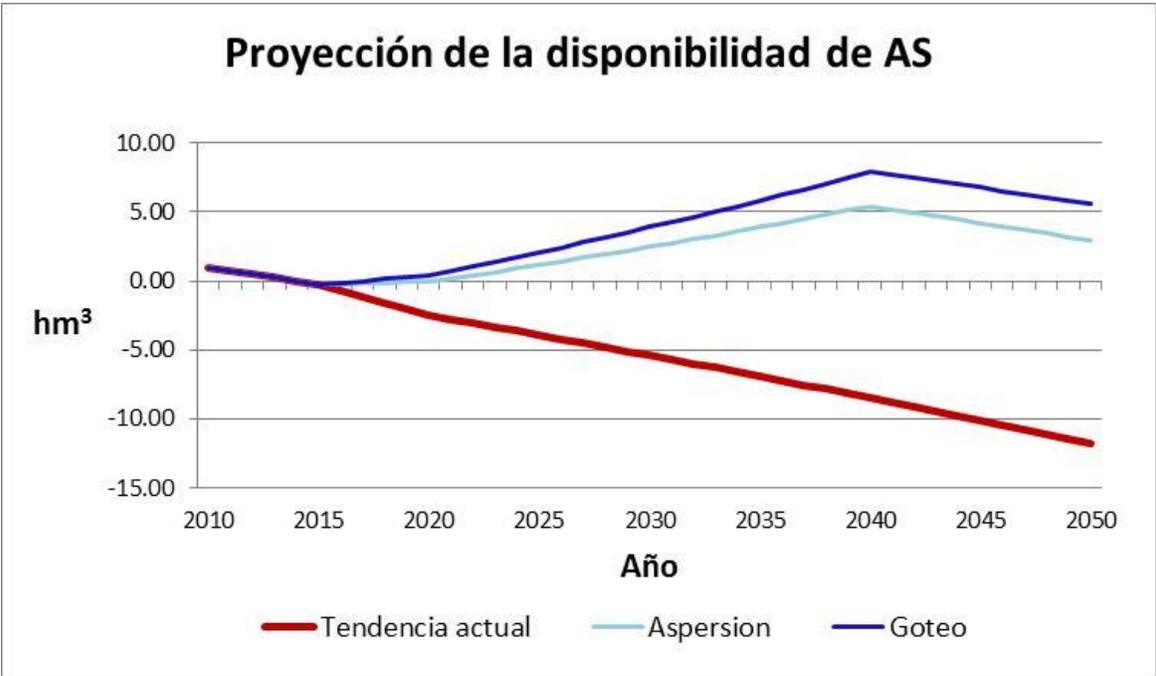


Figura 3. 6 Comparación de los sistemas de tecnificación

No obstante a la recuperación que obtendrá el acuífero con el sistema de tecnificación, en el año 2041 la condición de recuperación del acuífero comenzará a obtener una disminución en la disponibilidad de agua subterránea, por lo que a la par de los sistemas de tecnificación que se implanten se deben de ir tomando otras medidas estructurales y no estructurales para reducir la demande y aumentar la disponibilidad. En el capítulo siguiente se describen las acciones a tomar.

CAPÍTULO IV

4. Medidas y acciones para disminuir la demanda y aumentar la oferta

4.1. Acciones para disminuir la demanda

Para lograr la estabilización del acuífero de Tepalcingo-Axochiapan se ha supuesto la reducción de extracciones del acuífero, esto mediante la aplicación de usos eficientes del agua. Para esto solo se disminuirá la extracción para el uso agrícola, hasta igualar la recarga total con la extracción, ya que el uso público urbano se considera como prioritario, por lo que se mantienen los volúmenes requeridos por este sector.

- **Sobre el uso público urbano**

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el volumen requerido para uso público urbano, requerido para satisfacer la demanda de los usuarios, no se modificará. Sin embargo se deben de tener acciones referentes al abasto de agua en las cuales se involucre a la población y a los sistemas operadores, dividiéndolas los siguientes grupos:

Acciones necesarias para los organismos operadores de agua potable

- Reglamentar la prestación de los servicios
- Campañas con la ciudadanía para crear conciencia en los usuarios para fomento del ahorro del agua
- Elaborar sistemas tarifarios escalonados que para cubrir los gastos, y generar sanciones a los usuarios que tengan un alto consumo y recompensar aquellos que factura bajos consumos.
- Implementación de Servicios de Telemetría y Automatización en Redes de agua potable Proyectos Integrales de Mejora de Eficiencias, que garanticen una optimización del sus equipos.
- Generar incentivo a los municipios que traten las aguas residuales adecuadamente con el fin de mejorar la calidad de las aguas superficiales hasta el grado de ser aptas para su uso.
- Inspecciones periódicas en sus redes de distribución, conducción y tomas domiciliarias para evitar las fugas de agua.

- Gestionar programas, con apoyos federales o estatales, en los que se intercambie regaderas convencionales por regaderas ahorradoras de agua
- Instalación de micromedidores en los predios

Acciones que tienen que realizar los usuarios

- Revisión del funcionamiento y consumo de agua de regaderas, retretes, lavadoras de ropa, etc.
- Instalación de muebles y accesorios de bajo consumo en industrias, comercios, oficina, casas habitación y departamentos
- **Sobre el uso agrícola**

Como se muestra en las proyecciones la acción primordial para garantizar una recuperación del acuífero es la tecnificación de los sistemas de riego. Para eso el gobierno Federal y estatal en conjunto con la CONAGUA debe invertir recursos económicos para lograr esa tecnificación.

Además no solo se depende esta acción para resarcir los daños, sino también considerar lo siguiente:

- Tener un control estricto de los derechos de agua con el fin de imponer sanciones en los casos de faltas en lo estipulado en el título de concesión.
- Monitoreo continuo y de los aprovechamientos ilegales con el fin de clausurarlos.
- Elaborar sistemas tarifarios escalonados que para cubrir los gastos, y generar sanciones a los usuarios que tengan un alto consumo y recompensar aquellos que factura bajos consumos.

4.2. Acciones para incrementar la oferta

Actividades principales

- Realizar un inventario de aprovechamientos de agua subterránea con el fin de identificar aquellos que se encuentren inactivo, o que no existan.
- De acuerdo a lo anterior identificar los aprovechamientos que carezcan de equipos de medición para el control de los volúmenes de extracción, además de vigilar su correcta instalación y funcionamiento.

- Determinar los requerimientos de riego dependiendo del sistema utilizado, tipo de cultivo en particular, del tipo de suelo, pendiente del terreno, entre otros factores.
- Determinar las dotaciones en el uso público urbano para cada sistema operador.
- Actualizaciones periódicas de la disponibilidad del agua.

Fomento de la cultura del ahorro del agua

- Difusión con la población del acuífero cual es la problemática actual y futura del uso del agua y de su disponibilidad
- Promover el ahorro del agua en sector público urbano y el agrícola en relación con aspectos de costo y beneficio.

Disminuir la demanda e incrementar la oferta de agua

- Inversión para la construcción de plantas de tratamiento de agua residual y el fomento del uso del agua residual tratada.
- Investigación de mercado de productos agrícolas ya que es de suma importancia conocer los diversos cultivos que son viables de desarrollar en esta región desde un punto de vista de alto.
- Protección y conservación de zonas de recarga del acuífero y fomentar la recarga artificial (ollas, canales de absorción, presas de gaviones, acompañadas con reforestación apropiada, etc.).
- Realizar un programa de desarrollo urbano integral en el acuífero este programa deberá definir los usos del suelo más adecuados, zonas de recarga, zonas urbanas, delimitar las áreas actuales y de crecimiento, con base en disponibilidades de agua locales, proponer zonas industriales.
- Reforestación con especies locales en áreas críticas y mantenimiento adecuado de las plantaciones
- Lucha contra la tala ilegal

Acciones para mejorar y proteger la calidad de las aguas superficiales y subterráneas

- Sanear todas las aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
- Sanear los basureros no tecnificados

- Control estricto del uso de agroquímicos
- Optimizar los sistemas de recolección y deposición final tanto de los desechos sólidos urbanos como de los desechos peligrosos

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que actualmente el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan se encuentra sobreexplotado, no obstante, existen métodos viables para incrementar dicha disponibilidad.

En el presente documento se propuso la tecnificación en el sector agrícola, concluyendo que aplicando dicho método se revierte la situación actual logrando recargar el acuífero dando disponibilidad de agua subterránea a partir del año 2018, para el caso de la implementación de sistemas riego por goteo, y 2021 con sistemas de riego por aspersión.

No obstante a la recuperación que obtiene el acuífero al tecnificar los sistemas de riego el acuífero en el año 2041 vuelve a presentar una disminución en la disponibilidad debido al crecimiento y desarrollo que lograra alcanzar el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan.

5.2. Recomendaciones

- Para continuar con la organización de usuarios en el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan, es indispensable realizar un consenso con los representantes de los comités de usuarios que tienen aprovechamientos subterráneos en este acuífero para integrar el Comité Técnico de Aguas Subterráneas del acuífero del valle de Tepalcingo-Axochiapan.
- Se recomienda que para el cálculo de la disponibilidad media anual de agua subterránea, emitida en la NOM-011-CNA-2000, se considere usar el valor obtenido de las extracciones por bombeo, ya que este volumen suele ser mayor que el volumen concesionado, y en estas situaciones se subestima el valor real de la disponibilidad media anual del agua subterránea.
- Se recomienda la construcción de plantas tratadoras de agua residual, que tengan la capacidad necesaria para cubrir los volúmenes de agua producidos.

- Se recomienda la formación de un organismo operador que se encargue de los servicios de abasto de agua en el municipio de Tétela del Volcán, siendo esta zona la que tiene uno de los mayores problemas en el manejo del agua; lo cual garantizará un buen uso y repartición del agua, asegurando que el volumen no utilizado recargue al acuífero.
- Realizar un estudio integral entre agua subterránea y superficial.
- Se recomienda realizar un estudio específico de los efectos del cambio climático que se presentarán en la superficie del acuífero de Tepalcingo-Axochiapan.

ANEXOS

Anexo 1 Delimitación geográfica del Acuífero de Tepalcingo-Axochiapan

Vértices del polígono del acuífero Tepalcingo-Axochiapan (SAMARNAT 2009)							
Vértice	Longitud oeste			Latitud norte			Observaciones
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos	
1	98	42	25.9	18	53	46.4	Del 1 al 2 por el límite estatal
2	98	42	23.3	18	26	40.4	Del 2 al 3 por el límite estatal
3	98	55	10	18	26	5.4	
4	98	55	28	18	26	23.2	
5	98	55	48.8	18	27	40.9	
6	98	55	33.2	18	30	6	
7	98	54	51.8	18	30	57.8	
8	98	54	51.8	18	31	39.2	
9	98	55	48.8	18	33	17.6	
10	98	55	48.8	18	34	56.1	
11	98	55	17.7	18	36	24.1	
12	98	53	54.8	18	37	21.1	
13	98	53	8.2	18	39	9.9	
14	98	51	29.7	18	41	9.1	
15	98	52	0.8	18	42	11.2	
16	98	51	50.5	18	43	23.7	
17	98	50	27.6	18	43	49.6	
18	98	48	44	18	45	33.3	
19	98	47	5.5	18	47	1.3	
20	98	45	32.3	18	50	33.7	
21	98	42	46.5	18	53	35	
1	98	42	25.9	18	53	46.4	

Anexo 2 Determinación de la precipitación media en el acuífero

Para el cálculo de la precipitación se utilizó el método de los Polígonos de Thiessen, este método calcula la lluvia media como un promedio pesado de la precipitación que se registra en cada estación, usando el área de influencia correspondiente como peso:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi}$$

Donde

A_i es el área de influencia de la estación i

A_T es el área total de la cuenca.

A continuación se muestra la figura en la que aparecen la ubicación de las estaciones climatológicas y la porción de área de influencia que le corresponde.

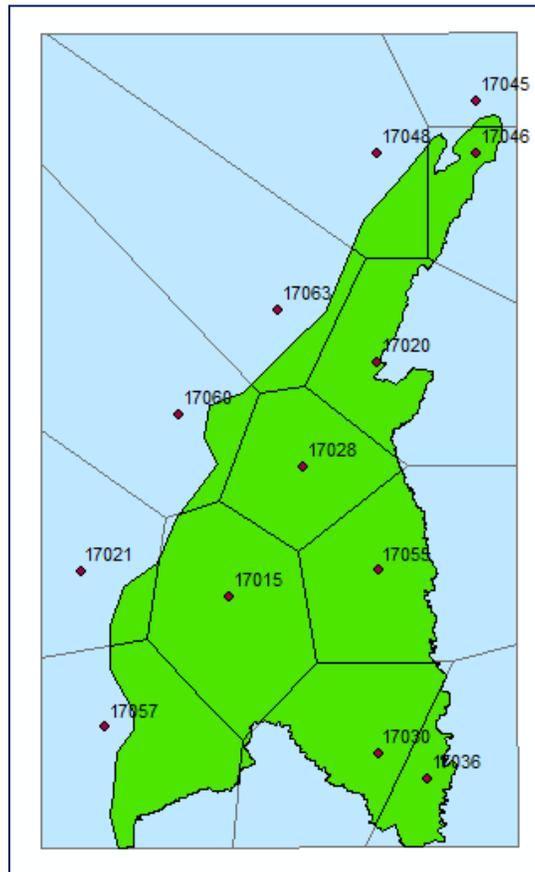


Figura 1 Localización de estaciones climatológicas y área de polígonos de Thiessen

Para el cálculo de la precipitación se tomó en cuenta un periodo de veinticinco años (1996-2010), por lo que la precipitación media anual es de **849 mm**.

En la tabla siguiente se muestra el desglose de la lluvia en el periodo indicado por estación climatológica:

Est.	Ai	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Precipitación media por estación
17015	134.59	842	758	647	806	1244	729	789	739	761	1044	954	913	848	991	797	1070	826	1049	1107	788	869	1117	859	949	640	885
17020	64.12	410	377	794	833	1073	841	983	863	761	1059	998	394	1072	807	558	853	720	715	439	664	481	649	798	947	973	763
17021	11.74	770	996	948	699	1172	1175	1204	849	776	1002	746	980	1012	960	688	1003	684	1003	1068	847	786	959	1008	1119	1043	940
17028	89.11	552	467	720	808	1157	857	1121	787	763	1067	1056	765	1076	1084	895	949	939	1123	851	763	959	1062	899	1150	1107	919
17030	82.78	427	410	813	836	1040	733	807	698	657	976	656	926	789	849	794	1009	870	877	783	725	832	1055	1108	959	869	820
17036	30.32	648	610	833	841	1022	712	779	680	653	994	618	896	991	1394	618	952	708	1020	1026	595	741	992	822	884	871	836
17045	1.61	759	423	846	780	1194	1125	1042	1141	1055	103	908	1037	924	1317	992	1174	913	1446	1114	899	1089	1143	954	1250	1204	993
17046	23.79	783	423	850	776	1205	1149	1049	1166	1086	1229	1668	1069	1103	1063	1007	1049	867	1194	997	787	1000	1006	833	1029	1106	1020
17048	24.92	459	285	835	799	1146	1031	1012	1054	942	820	1227	876	893	974	813	925	1207	1129	1269	872	1369	1306	1027	1051	1649	999
17055	96.33	306	270	739	813	1135	820	958	780	703	967	887	725	867	920	696	874	775	879	774	642	725	710	694	785	573	761
17057	77.10	839	847	599	880	931	739	869	703	783	1010	747	993	1026	969	693	1014	685	1014	1083	859	794	971	1025	1137	1071	891
17060	17.76	502	444	783	813	1105	862	997	824	631	898	814	566	648	656	513	628	557	635	537	468	521	523	464	549	415	654
17063	18.82	909	650	857	880	952	758	892	895	690	1173	859	317	850	787	600	770	617	691	523	542	534	384	344	413	352	689
Prom	672.98	601	537	737	823	1111	810	920	787	751	1018	912	807	930	962	746	959	808	963	886	733	808	941	866	956	860	849

Anexo 3 Proyección de la población

El método utilizado para el cálculo de la población de proyecto es el denominado como “**mínimos cuadrados**”¹, este procedimiento consiste en calcular a población de proyecto a partir de un ajuste de los resultados de los censos en los años anteriores, a una recta o curva, de tal modo que los puntos pertenecientes a éstas, difieran lo menos posible de los datos observados. Existen cuatro posibles ajustes (lineal, exponencial, logarítmica y potencial).

A continuación se presentan los modelos de ajuste, sus respectivas expresiones de cálculo y los correspondientes resultados.

Ajuste Lineal:

La ecuación de la recta a ajustar es:

$$P = a + bt$$

Donde:

$$a = \frac{\sum P_i - b \sum t_i}{N}$$

$$b = \frac{N \sum t_i P_i - \sum t_i \sum P_i}{N \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2}$$

$$r = \frac{N \sum t_i P_i - \sum t_i \sum P_i}{\sqrt{[N \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2][N \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2]}}$$

	Año (t_i)	Hab. (P_i)	t_iP_i	t_i²	P_i²	Tasa
1	1990	94,323	187,702,770	3,960,100	8,896,828,329	
2	1995	106,168	211,805,160	3,980,025	11,271,644,224	2.39%
3	2000	110,790	221,580,000	4,000,000	12,274,424,100	0.86%
4	2005	111,272	223,100,360	4,020,025	12,381,457,984	0.09%
5	2010	123,112	247,455,120	4,040,100	15,156,564,544	2.04%
	10,000	545,665	1,091,643,410	20,000,250	59,980,919,181	

¹ Abastecimiento de agua potable. Enrique César Valdez, Facultad de Ingeniería, UNAM, Noviembre de 1990. México DF.

$$N = 5$$

$$\sum t_i = 10,000$$

$$\sum P_i = 545,665$$

$$\sum t_i P_i = 1,091,643,410$$

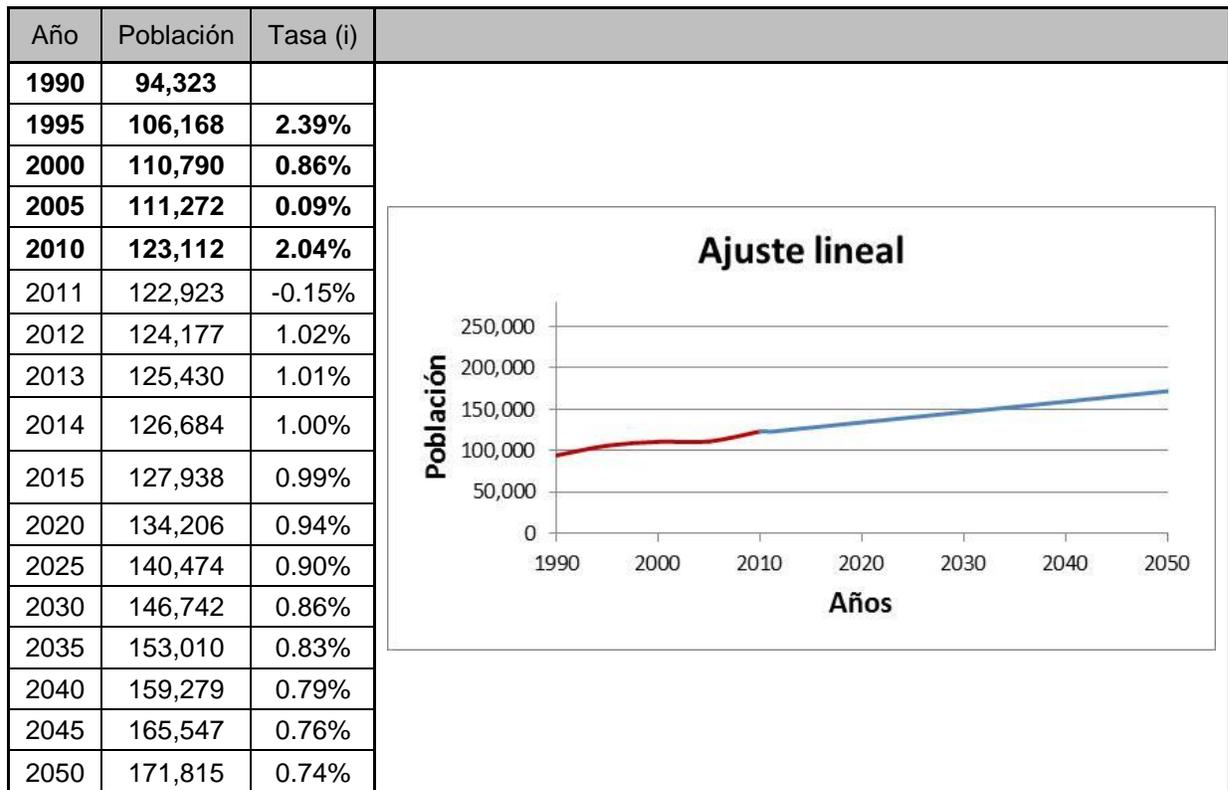
$$\sum t_i^2 = 20,000,250$$

$$\sum P_i^2 = 59,980,919,181$$

$$a = -2,398,147.00$$

$$b = 1,253.64$$

$$r = 0.9549362629$$



Ajuste Exponencial:

La ecuación de la recta a ajustar es:

$$P = ae^{bt}$$

Donde:

$$a = e^{\left[\frac{\sum \ln P_i - b \sum t_i}{N} \right]}$$

$$b = \frac{N \sum t_i \ln P_i - \sum t_i \sum \ln P_i}{N \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2}$$

$$r = \frac{N \sum t_i (\ln P_i) - \sum t_i \sum \ln P_i}{\sqrt{[N \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2][N \sum (\ln P_i)^2 - (\sum \ln P_i)^2]}}$$

Núm.	Año (t _i)	Hab. (P _i)	ln P _i	t _i (ln P _i)	t _i ²	(ln P _i) ²
1	1990	94323	11.4544803	22,794.41588	3,960,100	131.2051199
2	1995	106168	11.572778	23,087.69216	3,980,025	133.9291912
3	2000	110790	11.6153918	23,230.78359	4,000,000	134.9173266
4	2005	111272	11.6197329	23,297.56453	4,020,025	135.0181934
5	2010	123112	11.7208498	23,558.90808	4,040,100	137.3783198
Suma	10000	545,665	57.9832329	115969.3642	20000250	672.4481509

N = 5

∑ t_i = 10,000

∑ P_i = 545,665

∑ ln P_i = 57.98323288

∑ t_i (ln P_i) = 115,969.4

∑ t_i² = 20,000,250

∑ ln P_i² = 672.4481509

a = 9.24798E-06

b = 0.011593876

r = 0.9518

Año	Población	Tasa (i)
1990	94,323	
1995	106,168	2.39%
2000	110,790	0.86%
2005	111,272	0.09%
2010	123,112	2.04%
2011	123,523	0.33%
2012	124,963	1.17%
2013	126,420	1.17%
2014	127,894	1.17%
2015	129,386	1.17%
2020	137,108	1.17%
2025	145,291	1.17%
2030	153,962	1.17%
2035	163,151	1.17%
2040	172,888	1.17%
2045	183,207	1.17%
2050	194,141	1.17%



Ajuste Logarítmico:

La ecuación de la recta a ajustar es:

$$P = a + b(\ln t)$$

Donde

$$a = \frac{\sum P_i - b \sum \ln t_i}{N}$$

$$b = \frac{N \sum \ln t_i P_i - \sum \ln t_i \sum P_i}{N \sum (\ln t_i)^2 - (\sum \ln t_i)^2}$$

$$r = \frac{N \sum (\ln t_i) P_i - \sum \ln t_i \sum P_i}{\sqrt{[N \sum (\ln t_i)^2 - (\sum \ln t_i)^2][N \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2]}}$$

Núm.	Año (t _i)	Hab. (P _i)	ln t _i	(ln t _i) P _i	P _i ²	(ln t _i) ²
1	1990	94323	7.59588992	716,467.1247	8,896,828,329	57.6975436
2	1995	106168	7.59839933	806,706.8600	11,271,644,224	57.7356724
3	2000	110790	7.60090246	842,103.9835	12,274,424,100	57.7737182
4	2005	111272	7.60339934	846,045.4513	12,381,457,984	57.8116815
5	2010	123112	7.60589	936,376.3298	15,156,564,544	57.8495627
Suma	10000	545,665	38.004481	4,147,699.7493	59,980,919,181	288.868178

$$N = 5$$

$$\sum t_i = 10,000$$

$$\sum P_i = 545,665$$

$$\sum \ln t_i = 38.004$$

$$\sum (\ln t_i) P_i = 4,147,700$$

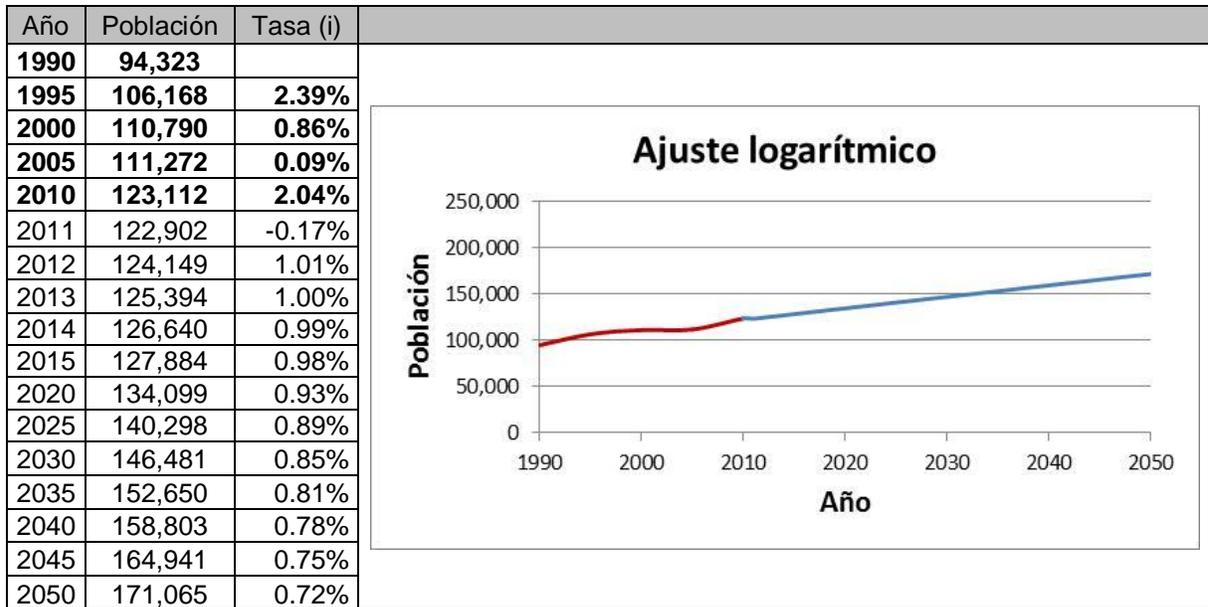
$$\sum P_i^2 = 59980919181$$

$$\sum \ln t_i^2 = 288.868$$

$$a = 1.895E+07$$

$$b = 2.507E+06$$

$$r = 0.9550149549$$



Ajuste Potencial:

La ecuación de la recta a ajustar es:

$$P = at^b$$

Donde:

$$a = e^{\left[\frac{\sum \ln P_i - b \sum \ln t_i}{N} \right]}$$

$$b = \frac{N \sum (\ln t_i)(\ln P_i) - \sum \ln t_i \sum \ln P_i}{N \sum (\ln t_i)^2 - (\sum \ln t_i)^2}$$

$$r = \frac{N \sum (\ln t_i)(\ln P_i) - \sum \ln t_i \sum \ln P_i}{\sqrt{[N \sum (\ln t_i)^2 - (\sum \ln t_i)^2][N \sum (\ln P_i)^2 - (\sum \ln P_i)^2]}}$$

Núm.	Año (t _i)	Hab. (P _i)	ln t _i	ln P _i	(ln t _i) (ln P _i)	(ln t _i) ²	(ln P _i) ²
1	1990	94323	7.59589	11.4545	87	57.697544	131.20512
2	1995	106168	7.598399	11.5728	88	57.735672	133.92919
3	2000	110790	7.600902	11.6154	88	57.773718	134.91733
4	2005	111272	7.603399	11.6197	88	57.811682	135.01819
5	2010	123112	7.60589	11.7208	89	57.849563	137.37832
Suma	10000	545,665	38.00448	57.9832	441	288.86818	672.44815

N = 5

$\sum t_i = 10000$

$\sum P_i = 545,665$

$\sum \ln t_i = 38.004$

$\sum \ln P_i = 57.983$

$\sum (\ln t_i)(\ln P_i) = 440.726$

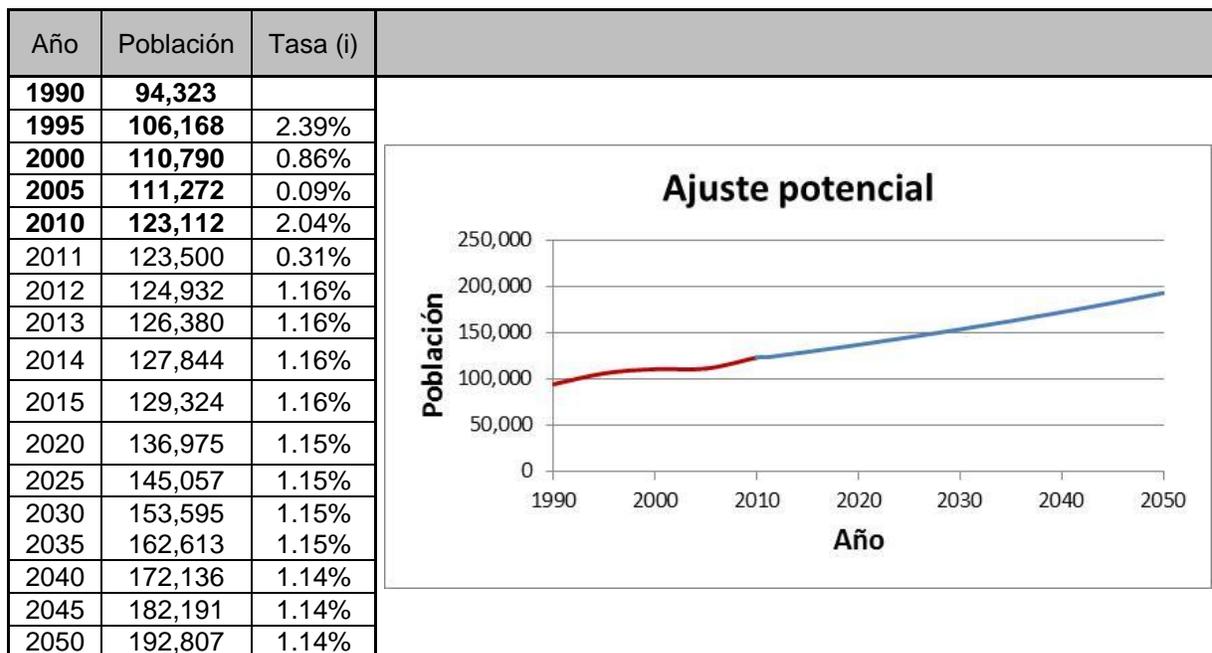
$\sum (\ln t_i)^2 = 288.868$

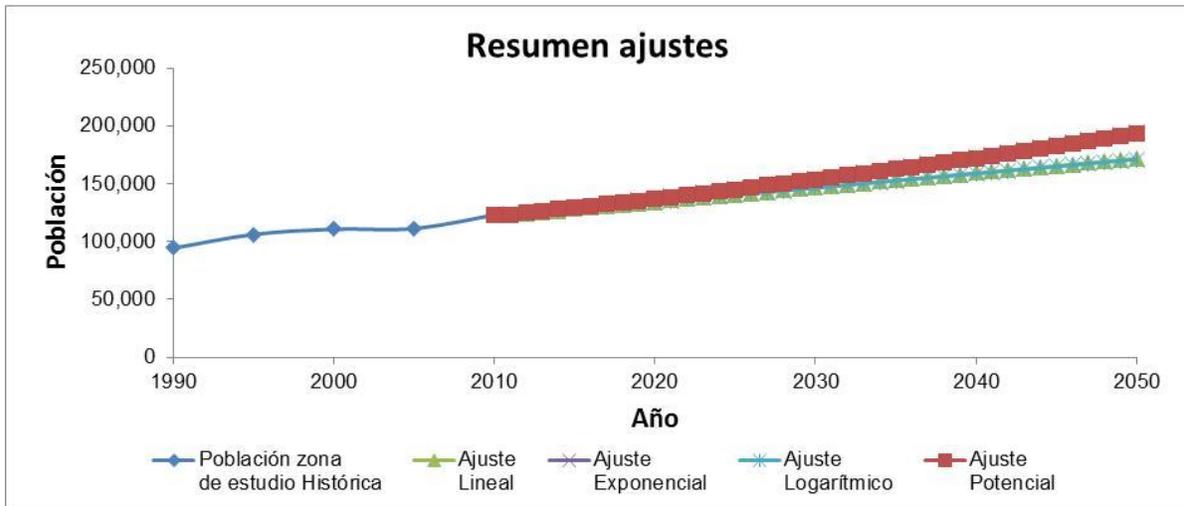
$\sum (\ln P_i)^2 = 672.4481509$

a = 3.0312E-72

b = 2.319E+01

r = 0.95198





De las proyecciones antes descritas se seleccionó el ajuste exponencial, considerando que el crecimiento poblacional presentará un aumento tendencial.

Anexo 3

Volumen medio anual de escurrimiento natural

De acuerdo al Anexo 3 de la NOM-011-CNA-2000, el cálculo del volumen medio anual de escurrimiento natural de un sitio de interés se determina a partir de aforos (método directo) o, al no contar con datos suficientes, con el método indirecto. El acuífero de Tepalcingo –Axochiapan abarca una porción de la cuenca del Río Nexapa, que se encuentra dentro del estado de Morelos, la cual no cuenta con alguna estación hidrométrica ubicada a la salida de la misma, por lo que se procede a aplicar el método indirecto, el cual se determina con la siguiente expresión:

$$VAENC = (PMAC)(AC)(CE)$$

VAECHAA: Volumen anual de escurrimiento natural

PMAC: Precipitación media anual de la cuenca

AC: Área de la cuenca

CE: Coeficiente de escurrimiento

- La precipitación media anual del acuífero es de 848 mm, en la tabla siguiente se muestra la precipitación media anual en el periodo 1996-2010:

Año	Precipitación, mm	Año	Precipitación, mm	Año	Precipitación, mm
1986	600.593	1995	1017.85	2004	885.6
1987	536.528	1996	911.662	2005	732.7
1988	736.505	1997	807.063	2006	808.1
1989	822.682	1998	930.18	2007	941
1990	1111.4	1999	961.547	2008	866.1
1991	809.688	2000	746.008	2009	956.5
1992	920.152	2001	958.853	2010	860
1993	787.458	2002	807.878		
1994	751.488	2003	963.439		

- Área de la cuenca: 672.983 km²

- Coeficiente de escurrimiento: Se determina en función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual de la cuenca.

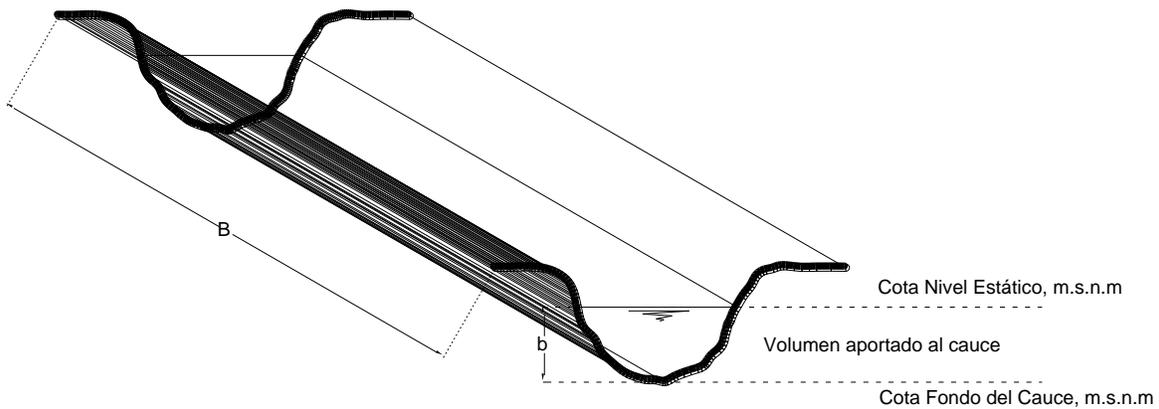
Con apoyo de la cartografía del INEGI, se determinó el coeficiente de escurrimiento para cada tipo de uso de suelo, por lo que el volumen anual de escurrimiento natural es de 100.71 hm³.

En la tabla siguiente se muestra el concentrado de información que se analizó.

Año	Precipitación, mm	Ce, anual	Vol. Esc, Anual (hm3)
1986	601	0.115	55.80
1987	537	0.107	46.30
1988	737	0.132	78.76
1989	823	0.143	95.30
1990	1111	0.180	161.89
1991	810	0.141	92.71
1992	920	0.155	115.86
1993	787	0.139	88.36
1994	751	0.134	81.53
1995	1018	0.168	138.43
1996	912	0.154	113.99
1997	807	0.141	92.19
1998	930	0.157	118.08
1999	962	0.161	125.18
2000	746	0.133	80.51
2001	959	0.160	124.56
2002	808	0.141	92.35
2003	963	0.161	125.61
2004	886	0.151	108.34
2005	733	0.132	78.07
2006	808	0.141	92.40
2007	941	0.158	120.50
2008	866	0.149	104.22
2009	956	0.160	124.02
2010	860	0.148	102.95
Promedio	849.24	0.146	100.71

Caudal base

De acuerdo a la metodología para el cálculo del caudal base en la actualización de la disponibilidad agua subterránea para el acuífero de Tepalcingo-Axochiapan 2010, se tiene que el caudal base es de 2.44 Hm^3 .



RÍO AMATZINAC							
Equipotencia les	Δh (km)	Tramo del río (km)	i (10^{-3})	K ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	ENE-cota cauce=b	$A=B*b$ (10^3 m^2)	Q (10^{-3} m^3)
990 - 1050	60	15.95	3.76	0.02	18.00	287.10	21.60
1110 - 1125	15	0.90	16.67	0.01	10.83	9.75	1.62
1245 - 1260	15	1.00	15.00	0.01	2.50	2.50	0.38
1290 - 1365	75	1.47	51.02	0.01	24.17	35.53	18.13
							41.73
RÍO TEPALCINGO							
Equipotencia les	Δh (km)	Tramo del río (km)	i (10^{-3})	K ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	ENE-cota cauce=b	$A=B*b$ (10^3 m^2)	Q (10^{-3} m^3)
990 - 1035	45	17.74	2.54	0.05	40.00	709.60	90.00
						QT	131.73
Q_B (7 meses de estiaje)= 2.44 Hm^3							

Fuentes de información

Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Morelos, serie: Planeación Hidráulica en México, componente: Planeación regional y estatal, septiembre de 2010, CONAGUA

Atlas del agua en México 2011, Comisión Nacional del Agua

Censo de Población y Vivienda 2010 INEGI

Estadísticas del Agua en la cuenca del Río Balsas, 2010, Organismo de Cuenca Balsas, Comisión Nacional del agua, diciembre de 2010

Programa Estatal de Desarrollo Urbano 2007-2012, Secretaria de Desarrollo Urbano y Obras Públicas, Subsecretaria de Desarrollo Urbano y Vivienda, Gobierno del estado de Morelos

Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación, diciembre 2009, Comisión Nacional del Agua

Boletín CONAGUA protección contra inundaciones, Organismo de Cuenca Balsas, Comunicación Social, 1 de marzo de 2011

Mapa de climas del INEGI:

<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/mor/clim.cfm?c=444&e=16>

<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/edomex/clim.cfm?c=444&e=05>

http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/df/climas_map.cfm?c=444&e=09

http://solgeo.inegi.org.mx/mapoteca/frames.html?layer=100&map=%2Fvar%2Fwww%2Fhtdocs%2Fmapoteca%2Fmap_dig_cuentame2.map&program=%2Fcgi-bin%2Fmapserv&root=%2Fmapoteca&map_web_imagepath=%2Fvar%2Fwww%2Fhtdocs%2Fms_tmp%2F&map_web_imageurl=%2Fms_tmp%2F&box=false&drag=true

Ley de Aguas Nacionales 2012:

<http://info4.juridicas.unam.mx/ijure/fed/15/3.htm?s=>

http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/VEDAS_SUPERFICIALES_INTERNE_REPDA.pdf

http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Generico/Vedas_Superficiales/Acuerdos/107.pdf

http://www.conagua.gob.mx/atlas/mapa/36/index_svg.html

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/clima/InfoEscala.aspx>

http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/clima/CLIMATIII.pdf

<http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>