



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE AMEALCO (2209),
ESTADO DE QUERÉTARO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1.	GENERALIDADES	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3.	FISIOGRAFÍA	6
3.1	Provincia fisiográfica	6
3.2	Clima	6
3.3	Hidrografía.....	7
3.4	Geomorfología	7
4.	GEOLOGÍA	8
4.1	Estratigrafía.....	9
4.2	Geología estructural.....	12
4.3	Geología del subsuelo	13
5.	HIDROGEOLOGÍA	14
5.1	Tipo de acuífero.....	14
5.2	Parámetros hidráulicos	14
5.3	Piezometría.....	15
5.4	Comportamiento hidráulico	15
5.4.1	Profundidad al nivel estático	15
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3	Evolución del nivel estático	18
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	19
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	19
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	20
7.1	Entradas.....	21
7.1.1	Recarga Vertical (Rv).....	21
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	22
7.1.3	Recarga inducida (Ri)	22
7.2	Salidas.....	23
7.2.1	Evapotranspiración (ETR).....	23
7.2.2	Descarga de manantiales (Dm)	24
7.2.3	Bombeo (B).....	25
7.2.4	Salidas por flujo subterráneo horizontal	25
7.3	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	25
8.	DISPONIBILIDAD	26
8.1	Recarga total media anual (R)	26
8.2	Descarga natural comprometida (DNC)	27
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	27
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	27
9.	BIBLIOGRAFÍA	29

1. GENERALIDADES

Antecedentes

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

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

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

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

1.1 Localización

El acuífero Valle de Amealco, definido con la clave 2209 por la Comisión Nacional del Agua, comprende una superficie aproximada de 304 km², se encuentra ubicado en la parte sur del estado de Querétaro, y colinda al norte y noreste con el acuífero de San Juan del Río de la misma entidad; al suroeste colinda con el estado de Michoacán y al sureste con el estado de México. Geográficamente se localiza entre los paralelos 20° 02' y 20° 16', y entre los meridianos 99° 59' y 100° 15' al oeste de Greenwich (figura 1).

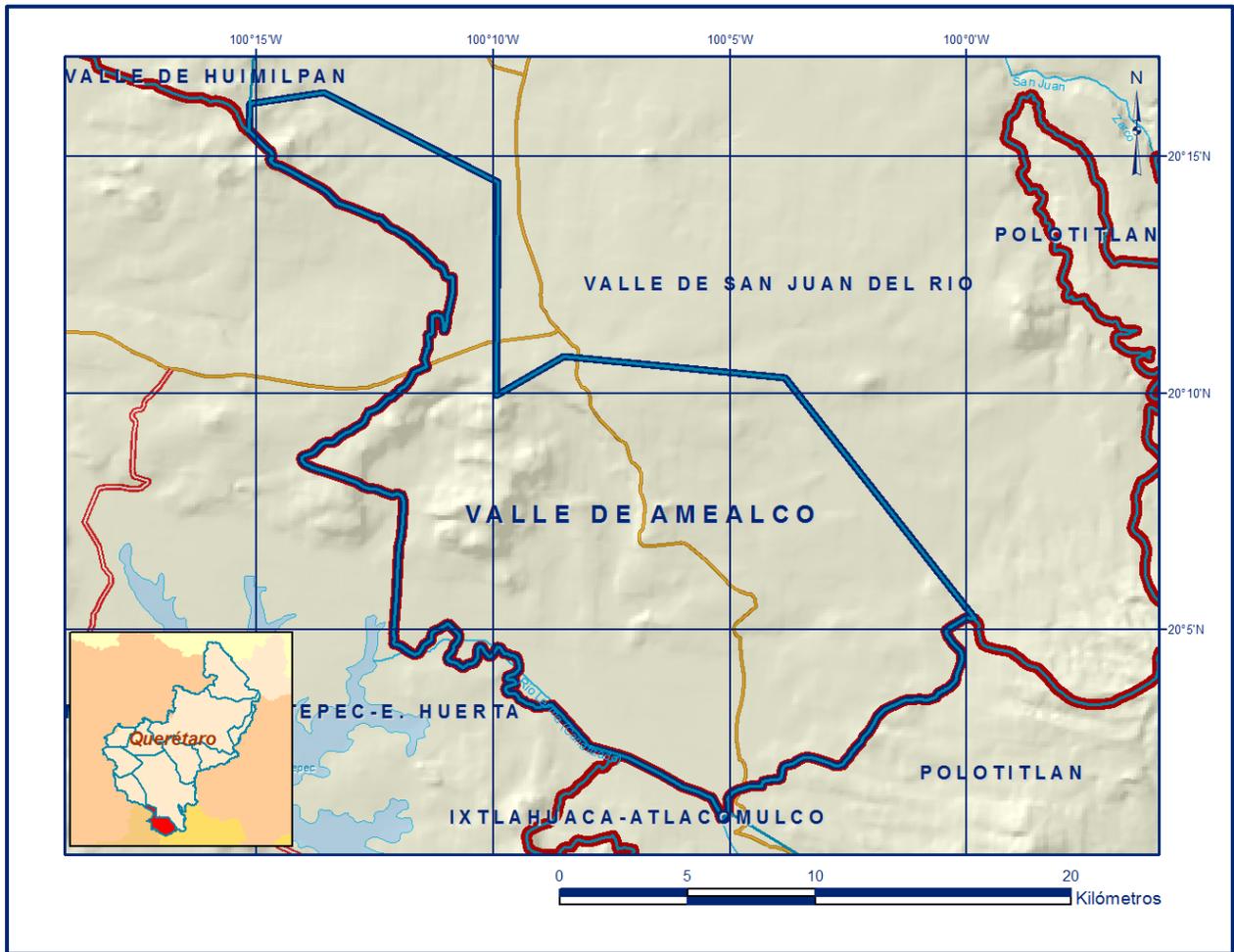


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el acuífero se localiza dentro del municipio de Amealco de Bonfil. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 2209 VALLE DE AMEALCO							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	15	9.2	20	15	31.8	
2	100	15	8.0	20	16	7.2	
3	100	13	34.8	20	16	20.8	
4	100	9	53.9	20	14	27.7	
5	100	9	56.6	20	9	57.4	
6	100	8	30.8	20	10	47.0	
7	100	3	50.2	20	10	20.2	
8	99	59	50.3	20	5	14.1	DEL 8 AL 9 POR EL LIMITE ESTATAL
9	100	7	20.2	20	2	21.7	DEL 9 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	100	15	9.2	20	15	31.8	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Norte y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Querétaro. El territorio del acuífero no se encuentra sujeto a veda para extracción de agua subterránea.

En una pequeña porción, ubicada al sureste del acuífero se localiza el Distrito de Riego denominado Estado de México. A la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS), el acuífero pertenece al Consejo de Cuenca Río Pánuco instalado el 26 de agosto de 1999. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2209 VALLE DE AMEALCO							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	15	9.2	20	15	31.8	
2	100	15	8.0	20	16	7.2	
3	100	13	34.8	20	16	20.8	
4	100	9	53.9	20	14	27.7	
5	100	9	56.6	20	9	57.4	
6	100	8	30.8	20	10	47.0	
7	100	3	50.2	20	10	20.2	
8	99	59	50.3	20	5	14.1	DEL 8 AL 9 POR EL LIMITE ESTATAL
9	100	7	20.2	20	2	21.7	DEL 9 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	100	15	9.2	20	15	31.8	

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Para conocer el comportamiento del acuífero Valle de Amealco se han realizado diversos estudios de carácter geohidrológico, en áreas donde tiene influencia, en este sentido a continuación se enlistan los estudios disponibles.

ACTIVIDADES DE CARÁCTER GEOHIDROLÓGICO EN LAS ZONAS DE QUERÉTARO, HUMILPAN Y AMEALCO, QRO., realizado en 1981 por la empresa Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S.A. El objetivo fue contar con mayores elementos de carácter geohidrológico para coadyuvar en la definición de los trabajos a realizar para evitar la sobreexplotación del acuífero, particularmente en este estudio las actividades correspondieron a la realización de pruebas de bombeo y sondeos geofísicos.

Respecto a las pruebas de bombeo fueron en total 30 con tiempos de duración entre 4 y 6 horas, en etapa de abatimiento o de recuperación y en algunos en ambas etapas. Los valores obtenidos oscilaron entre $1.65 \cdot 10^{-3}$ a $6.77 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, en varias localidades de Querétaro, y 27 sondeos geofísicos con profundidad de investigación de 500 m en la zona de Huimilpan.

GOBIERNO DEL ESTADO DE QUERÉTARO, COMISIÓN ESTATAL DE AGUA. 1994. EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL VALLE DE AMEALCO, ESTADO DE QUERÉTARO, realizado por Geofísica de Exploraciones GUYSA, S.A. de C.V. Su objetivo fue identificar la posible conexión del flujo del agua subterránea entre el Valle de San Juan del Río y la zona de estudio; estimar la disponibilidad de agua subterránea en la medida de la información disponible y actualizar el censo de aprovechamientos subterráneos. Se concluye que la porción sur o Valle de Amealco, (limitado por el macizo montañoso localizado al norte) está constituido por depósitos pumíticos de relleno, con espesor promedio de 200 m. Los niveles de saturación oscilan entre 10 m a 90 m, en esta área se encuentra la mayoría de los pozos.

La recarga principal de agua subterránea proviene de la porción sureste y se dirige sensiblemente al noroeste, paralelo al cauce del río Lerma; existen entradas laterales de las sierras periféricas y manantiales aún activos. No se registró conexión de flujo subterráneo hacia el Valle de San Juan del Río por encontrarse entre estos una barrera o frontera hidrogeológica que forma un parteaguas que divide a los flujos hacia el norte y hacia el sur del Valle de San Juan del Río en medios fracturados.

Respecto a la zona norte, se indica que queda delimitada en la porción sur por la divisoria de aguas superficiales y por el macizo montañoso formado por rocas andesíticas e ignimbríticas, estas últimas forman grandes paquetes volcánicos depositados en la zona y dan origen a una unidad hidrogeológica de acuíferos locales restringidos a zonas de fracturamiento. De acuerdo con datos piezométricos, se registra una pérdida de cargas a favor del valle de San Juan del Río. Hacia el sur no existen flujos subterráneos por la presencia de la barrera litológica que impone la Caldera de Amealco, sobre todo por los depósitos andesíticos y riodacíticos. La zona norte se caracteriza por tener niveles estáticos profundos, en ella se localizan 5 pozos activos y 6 negativos por bajo caudal, y por la presencia de manantiales.

Se realizaron trabajos de piezometría, a través de integración histórica y de recorridos de campo durante los cuales se midieron los niveles estáticos y/o dinámico de 33 pozos. Asimismo, se efectuaron nivelaciones topográficas de brocales de pozos y se realizaron 9 pruebas de bombeo de corta duración, obteniendo transmisividades entre 5.96 hasta $49.40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Se efectuaron recorridos hidrogeológicos para detallar el marco geológico y se obtuvieron 10 muestras de agua en pozos profundos y 4 de manantiales.

Como complemento de los trabajos se efectuaron 50 sondeos verticales para detectar el basamento del acuífero, con los cuales se elaboraron perfiles de isorresistividad.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero Valle de Amealco se encuentra en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, según E. Raisz (1964), donde han tenido lugar una serie de acontecimientos naturales desde fines del Cretácico hasta el Terciario, destacando la llamada Revolución Laramide. Esta provincia fisiográfica, definida por Raisz, está orientada a grosso modo de W-E, corta al país en una franja comprendida entre los paralelos 19° y 21°. Asimismo, se caracteriza por la presencia de valles intermontanos de gran extensión, cuyos rellenos consisten en general de paquetes de sedimentos vulcano clásticos y lacustres.

Dentro del estado de Querétaro esta provincia presenta un relieve de intensa actividad volcánica iniciada desde el Terciario hasta el Cuaternario, cuyos depósitos cubrieron a rocas sedimentarias del Mesozoico. Se presentan rocas antiguas de composición riolítica y andesítica, y recientes de composición basáltica.

En la región en estudio el relieve topográfico consta principalmente de extensas áreas de lomeríos de colinas redondeadas con cañadas, conocidas en su conjunto como llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo. La depresión o valle es una fosa o bloque hundido que ha sido rellenado por materiales recientes mediante procesos exógenos; forma valles de laderas tendidas hacia el suroeste, casi perpendiculares al cauce del río Lerma.

Los tipos de drenaje identificados son: rectangular, paralelo, dentrítico y radial. El área consta de una amplia red de drenaje superficial.

3.2 Clima

Según los criterios de Wilhem Köppen modificados por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana, el clima en el área se clasifica dentro del tipo templado (C), subhúmedo, con lluvias en verano C (W1)(W), donde el porcentaje de precipitación invernal es menor de 5.

El promedio anual de la temperatura para la zona es de 15°C. La precipitación media anual es del orden de 650 mm, sin embargo, por la ocurrencia de microclimas la precipitación varía, aumentando este valor sobre todo en las zonas de sierra hacia el parteaguas continental, con valores del orden de 700 mm. De acuerdo con la estación climatológica Amealco la precipitación promedio anual, para el área de influencia de esta estación, en el período 1945-1986 fue de 659 mm. La evaporación potencial media del área es de 1900 a 2000 mm/año.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a las Región Hidrológica No. 12 Río Lerma-Santiago, en su porción suroccidental, y a la Región Hidrológica No. 26 Río Pánuco en la porción norte. Pertenece a la subregión 12 A Alto Lerma y a San Juan Querétaro. Cuenca del Río Lerma-Toluca y Moctezuma.

En la zona existen una serie de ríos y algunos cuerpos de agua superficial como bordos y presas. La corriente superficial principal la forma el río Lerma que pasa por el límite sur de la zona. Hace algunas décadas en épocas de lluvias, los volúmenes de agua escurridos eran colectados y conducidos por los tributarios desde las zonas altas hacia el cauce del río Lerma. Cuando los escurrimientos sobrepasaban el nivel máximo de retención, ocurrían desbordes que inundaban las áreas ribereñas. Con el fin de controlar las avenidas, el cauce del río fue rectificado hace varias décadas diseñando un nuevo curso casi paralelo al primero.

En el área existen una serie de bordos y presas de diversos tamaños las cuales sirven como fuentes adicionales de riego y abrevadero, sobre todo en épocas de estiaje. Ahora la mayoría están azolvados. Entre las presas que se encuentran en el área están: Presa Santiago Mezquitlán, Presa El Capulín y Presa El Tecolote.

3.4 Geomorfología

Entre las geoformas características de la región destacan las sierras formadas por rocas volcánicas, que en este caso son andesitas y andesitas basálticas. Los depósitos volcánicos que se encuentran en el área son consecuencia de los eventos geológicos que dieron lugar al emplazamiento de la Caldera de Amealco, estos materiales fueron expulsados en forma violenta a grandes distancias, depositando volúmenes considerables de roca, mismos que cubrieron la topografía antigua del terreno. Posteriormente y debido al colapso del edificio volcánico, se formaron estructuras dómicas y conos.

La Caldera de Amealco es una estructura volcánica semicircular localizada al sur del poblado de Amealco, tiene entre 10 y 11 km de ancho; su formación se debe al hundimiento o colapso del edificio volcánico, posterior al vaciado parcial de su cámara magmática, somera y de grandes dimensiones. De los eventos volcánicos más recientes destacan algunos aparatos volcánicos y mesas constituidas por materiales andesíticos y basálticas, de igual forma existen algunas elevaciones constituidas por las ignimbritas denominadas ignimbritas Amealco, que son rocas piroclásticas de composición andesítica y riolítica.

En el área se manifiesta un valle constituido en su parte superior por materiales de depósitos lacustres y aluviales.

En general, el área presenta un fuerte desnivel topográfico, siendo la parte más alta la ubicada en la zona norte y cercana al poblado de Amealco y la más baja al sur e inmediaciones del río Lerma.

4. GEOLOGÍA

El marco geológico está constituido por tres acontecimientos volcánicos, el más antiguo formado por rocas de composición andesítica y basáltica cuya erupción originó la parte basal de la caldera. En superficie se puede observar en forma de estructuras volcánicas prominentes respecto a las zonas planas (Figura 2).

Cubriendo a las rocas anteriores, se encuentra la unidad volcánica de composición ácida que forma una estratificación de cenizas, y fragmentos de rocas de composición basáltica y andesítica. También, se encuentra una serie de depósitos limo-arenosos pumíticos que en conjunto forman el paquete de rocas conocido como ignimbritas Amealco. En algunas localidades esta unidad pierde continuidad lateral debido a que los depósitos volcánicos fueron expulsados en diferentes etapas, originando series de capas superpuestas con diferente alcance respecto al foco de emisión.

La secuencia ignimbrítica fue expulsada mediante explosiones volcánicas y a través del conducto central denominado *Caldera de Amealco*, posteriormente se originó el colapso del edificio volcánico, lo que dio lugar a la formación de estructuras dómicas y conos de composición andesítica y riolítica. Las rocas de la tercera y más reciente unidad volcánica cubren parcialmente a la anterior y se compone de rocas andesíticas y basálticas, en forma de mesas y de aparatos volcánicos, también se asocian a este episodio volcánico depósitos piroclásticos como cenizas y brechas volcánicas.

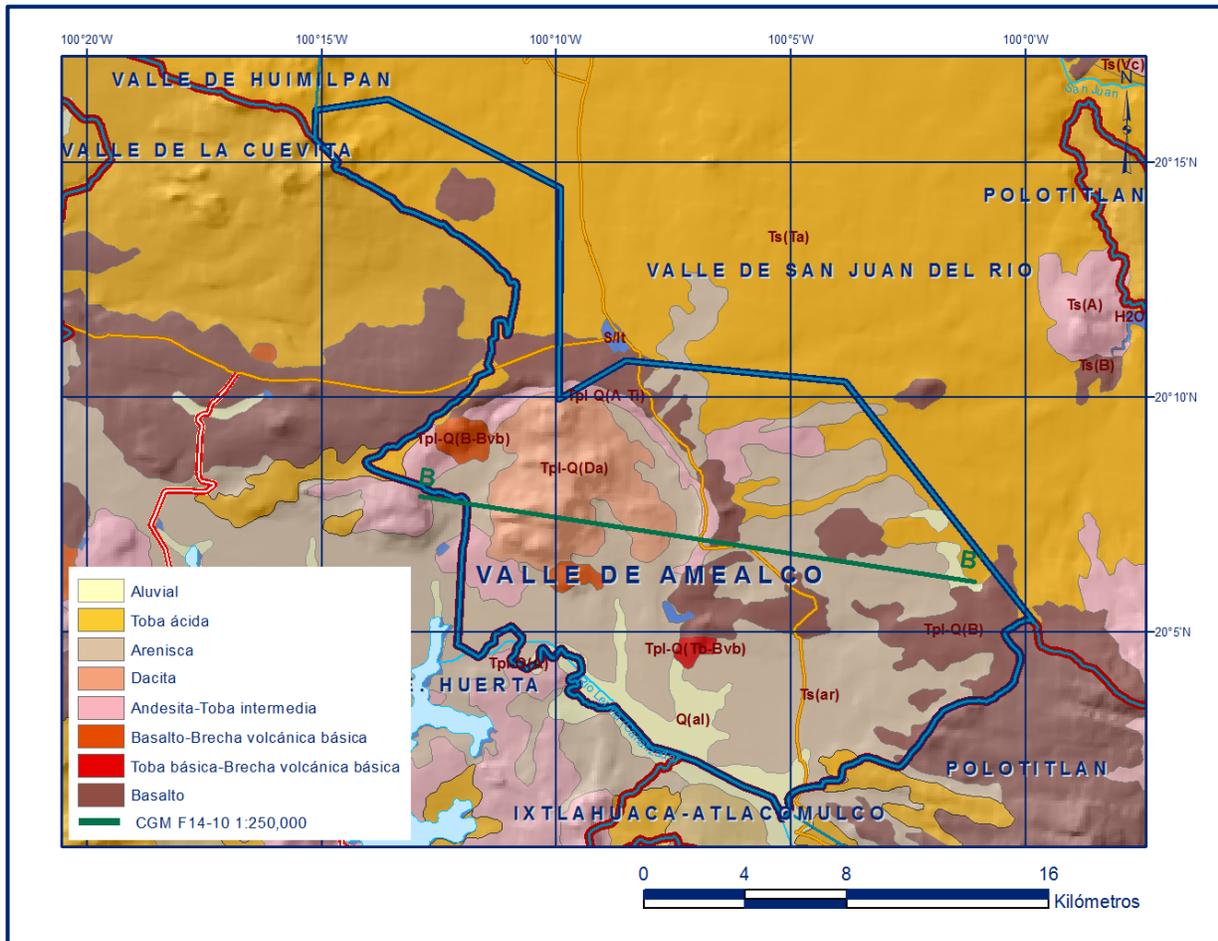


Figura 2. Geología general del acuífero

Por último, se manifiestan eventos exógenos que originaron a los aluviones situados en las laderas de los arroyos y del río Lerma y los suelos residuales distribuidos irregularmente en el área.

4.1 Estratigrafía

A continuación, se describe la columna estratigráfica de la zona.

Andesitas y Andesitas Basálticas Tmi (A)

Ocupa pequeñas extensiones superficiales, únicamente son observables aquellos afloramientos prominentes del oriente de la zona. Roca oscura con algunos puntos blancos y textura porfídica. Se observan fenocristales félsicos (plagioclasas cálcicas), y algunos minerales máficos. La matriz es afanítica formada de plagioclasas sódicas compacta y densa, y presenta fracturamiento en todas direcciones.

La continuidad de las fracturas se pierde a profundidad y en ocasiones se encuentran rellenas con material granular reciente. La composición química varía a basáltica de acuerdo a la localidad que se trate.

Esta unidad corresponde a eventos volcánicos del ciclo Pre-Caldera y forma el basamento de la zona. Por estudios específicos se le asignó una edad correspondiente al Mioceno Superior. Se desconoce su profundidad y espesor, sobre todo en la porción sur de la caldera ya que ningún pozo logró atravesarla.

Toba lítica Huichapan Tpl (TbH)

Depósitos volcánicos granulares de color amarillo crema, formados por arenas y limos procedentes de la Caldera de Huichapan. La unidad está semiconsolidada y forma estratos horizontales de aproximadamente 2 m de espesor. Existen inmersos fragmentos de roca de composición andesítica basáltica en una matriz fina de vidrio. Existe un afloramiento hacia el oriente de la zona. Se le asigna una edad correspondiente al Plioceno.

Andesitas Tpl (An)

Aflora en varias partes de la zona. En el centro de la Caldera de Amealco, forma los domos centrales y derrames que originaron el anillo o cuello volcánico de esta; en los Cerros Zancudo, La Cruz, Santa Rosa y El Picacho, entre otros. Roca color gris claro a oscuro, en ocasiones rosáceo con pintas blancas, es compacta, densa de textura fanerítica en una matriz afanítica. Las plagioclasas cálcicas se presentan alteradas.

Los afloramientos presentan fracturamientos originados en el momento del depósito y por tectonismo posterior, en algunas localidades la abertura del fracturamiento es amplia y profunda. Se presenta casi simultáneo a este evento la efusión de rocas de composición más ácidas: traquiandesitas y riodacitas.

Existen cambios texturales en forma vertical y lateral por lo que esta unidad puede variar en su composición química. Estas rocas fueron emitidas durante el ciclo volcánico de Caldera; por su posición estratigráfica se ubica en el Plioceno.

Traquiandesitas y riodacitas Tpl (Tan-Rd)

Rocas de color rosa con pintas blancas y negras, textura afanítica, densa y compacta, fracturamiento direccional y forma grandes bloques.

Se observan algunos fragmentos de roca de tamaño variado de composición intermedia; la matriz es fina y vítrea, y se observan minerales a simple vista. Se presentan huecos dejados por gases liberados y deformaciones estructurales originados en el emplazamiento.

Existen cambios químicos que hacen variar la textura en forma lateral, en general la composición más ácida se asocia a los domos centrales de la caldera y la intermedia al anillo que forma su estructura.

Ignimbrita Amealco Tpl (Ig-Am)

Aflora en varias regiones del área, como al sur de la Presa El Capulín y San Pedro Tenango. Está constituida por fragmentos de roca piroconsolidados de composición basáltico-andesítica y riolítica, con fragmentos pumíticos vítreos.

El color de esta unidad es rosáceo claro con pintas blancas y negras, textura porfídica y fluidal, compuesta de plagioclasas sódicas y minerales de hierro. La matriz es afanítica formada de vidrio volcánico en la que se incluyen fragmentos de roca subangulares de diversos tamaños. La textura fluidal es característica en donde los minerales observables están orientados en dirección del flujo original. También es característico el fracturamiento columnar en bloques, en donde las fracturas pueden estar abiertas y profundas o rellenas por materiales más finos. Esta unidad presenta cambios laterales y verticales en su textura y composición.

Se considera este miembro como la unidad representativa de la Ignimbrita Amealco, además de haberse originado en el ciclo de emisiones volcánicas de Caldera. Esta unidad ha sido atravesada por algunos pozos, el espesor de la unidad es variable, dependiendo de la localidad donde se encuentre. El período de emisión corresponde al Plioceno.

Toba Amealco Tpl (TbAm)

Se encuentra relleno de fosas del centro de la caldera y aflora en gran parte de la zona. Consiste de depósitos areno-arcillosos pumíticos de caída libre; los materiales granulares son de color ocre y amarillo claro, textura pumítica en una matriz fina y vítrea, es porosa y poco densa. Se encuentran mezclados fragmentos de rocas angulosas de composición intermedia; es una unidad semiconsolidada que presentan huecos dejados por el gas liberado.

Existen pozos que cortan esta unidad, pero ninguno ha logrado atravesarla por ser demasiado potente. A esta unidad se le ha asignado una edad del Plioceno.

Andesitas y Basaltos Q(A) y Q(B)

Se localiza y aflora en varias partes de la zona como en el cerro El Comal, Cerrito Colorado y algunos derrames en la región sur. Roca de color gris obscura textura afanítica, densa y compacta, presenta algunos fenocristales de plagioclasas cálcicas. La composición química hace variar la tendencia basáltica a andesítica o viceversa según la localidad, se presenta una zona de brechas volcánicas en las que se distingue material arenoso y bloques de basalto y pómez, sobretodo en el cerro El Comal.

Estas unidades corresponden al ciclo final de los eventos volcánicos de la Caldera. Las mesas lávicas son potentes pero se desconoce su espesor. Representa este evento el ciclo Post-Caldera del Pleistoceno.

Depósitos granulares aluviales y residuales recientes Q(al) y Q(sr)

Se localizan en las planicies de inundación del Río Lerma y arroyos, así como en lomeríos de baja pendiente. Estas unidades desaparecen en las zonas altas, salvo el caso de los depósitos residuales. Cubren cualquier unidad más antigua, tienen poco espesor y son los depósitos más recientes de la zona. Se presentan como materiales granulares no consolidados de coloración amarillo claro, de tamaño variable desde boleos, gravas hasta arcillas, dispuestos indistintamente en pseudoestratos que pierden continuidad y espesor hacia las partes de sierra. Estos materiales aluviales fueron depositados por procesos fluviales, sin embargo, los depósitos residuales fueron alterados in situ.

4.2 Geología estructural

El arreglo estructural del área es el resultado del tectonismo regional que provocó dislocaciones por esfuerzos distensivos en épocas geológicas pasadas, tales movimientos modelaron la topografía antigua, dando una nueva conformación al terreno mediante separación, levantamiento y hundimiento de grandes masas rocosas. Estas estructuras están orientadas según la dirección de esfuerzos principales y aquellos generados por reflejo de los primeros.

Todos estos acontecimientos forman parte de los eventos tectónicos y volcánicos que originaron la estructura conocida como Eje Volcánico Transmexicano.

Regionalmente en el área existe la falla denominada Chapala- Acambay que provocó la disección y hundimiento del aparato volcánico principal de la zona.

4.3 Geología del subsuelo

La geología del subsuelo se determinó tanto con información de 7 perfiles geofísicos, elaborados a partir de los resultados de sondeos eléctricos verticales (SEV), como de información geológica superficial y de cortes litológicos de pozos cercanos a los SEV.

De acuerdo con la información anterior se estima que el espesor del acuífero es de 200 m en promedio y en algunas localidades es mayor. Aunque por sus fuertes pendientes topográficas, los espesores son variables.

El subsuelo donde se emplaza el acuífero Valle de Amealco presenta una capa superior de material denominado Tobas Amealco; que en ocasiones afloran y en otras se encuentran cubiertas por capas delgadas de suelo. Particularmente hacia las cercanías del río Lerma, están cubiertas por depósitos aluviales con espesores mayores de 1 m.

Hacia la parte superficial las tobas están constituidas principalmente por material arcillo-arenoso, formando capas con espesores del orden de 20 m hacia la parte poniente del valle y del orden de 80 m hacia el oriente del mismo. Las tobas que se encuentran a mayor profundidad están constituidas por arcillas plásticas, arenas de grano fino, limos y gravillas, gravas y gravillas de pumita y tezontle, conglomerados clásticos medios y gruesos, bloques y boleos inestables, y en general los materiales descritos para la Toba Amealco; los espesores de esta segunda capa de tobas llegan a ser del orden de hasta 150 m, con máximos del orden de 200 m.

Conviene señalar que los niveles estáticos del acuífero se han detectado en la zona donde se alojan las capas antes descritas, a profundidades que oscilan entre 10 y 80 m aproximadamente.

En términos generales, subyaciendo a las Tobas Amealco, que se encuentran constituyendo parte del acuífero, se presenta una capa de basaltos fracturados, y en ocasiones andesitas fracturadas, principalmente hacia la parte oriente del valle; estos basaltos y andesitas se localizan a profundidades variables del orden de 70 a 150 m, y a veces llegan a ser del orden de 200 m, mientras que en otros sitios específicos no ha sido posible precisarlos.

La unidad de basaltos y andesitas antes mencionadas han sido atravesadas por pozos que explotan el acuífero.

El basamento de la zona está constituido por andesitas y andesitas basálticas, Tmi (A) se desconoce su profundidad y espesor.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero Valle de Amealco se desarrolla preferentemente en un paquete de depósitos provenientes de erupciones volcánicas, a ellos corresponden las tobas, principalmente la denominada Toba Amealco; igualmente se encuentran ignimbritas y basaltos fracturados intercalados en el medio, hacia las zonas de planicie en la parte superior y cubriendo a las tobas se encuentran algunos depósitos aluviales.

De acuerdo a la división de unidades hidrogeológicas definidas en el estudio de evaluación geohidrológica, el medio granular está constituido por depósitos fluviales, y aluviales y volcánicos, areno-arcillosos, y materiales conglomeráticos. En este medio existen intercalaciones del medio fracturado constituido por basaltos e ignimbritas.

Dentro del medio granular constituido por depósitos fluviales, conglomerático areno-arcilloso el acuífero es **libre**, cubre una superficie del orden de 25 km², en él se localizan algunos pozos y norias, que alcanzan 15 m de profundidad, los niveles freáticos alcanzan profundidades del orden de 3 a 6 m.

En el medio granular constituido por depósitos aluviales y volcánico, areno-arcillosos pumíticos donde existen intercalados derrames basálticos andesíticos el acuífero es del tipo semiconfinado, y es explotado a través de la mayor parte de los pozos localizados en la zona a profundidades del orden de 200 m. La profundidad promedio del nivel estático es del orden de 30 m.

En las áreas donde se localizan acuíferos en medios fracturados constituidos por las ignimbritas, arenas y cenizas volcánicas alteradas a arcillas y basaltos, el acuífero es de tipo semiconfinado, en él existen unos pocos pozos con profundidades del orden de 230 m. Las profundidades al nivel estático en promedio son del orden de 110 m.

5.2 Parámetros hidráulicos

La permeabilidad en el medio granular es función de la distribución granulométrica de las unidades y del grado de compactación de las mismas.

En términos generales en el medio granular constituido por depósitos fluviales, conglomeráticos areno-arcillosos la permeabilidad es alta, con transmisividades mayores a $20 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ hasta valores detectados del orden de $50.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que para el medio granular constituido por los depósitos aluviales y volcánico, areno-arcilloso pumíticos, donde existen intercalaciones de derrames basálticos-andesíticos, la permeabilidad es de baja a media, las transmisividades en este medio son del orden de $20 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

En general los valores de transmisividades en el área, de acuerdo a la información de que se dispone, fluctúan entre **$1.29 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ hasta $49.40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . En cuanto a las permeabilidades estas son del orden de **$26 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ a $247 \times 10^{-6} \text{ m/s}$** . Estos valores corresponden al medio constituido por los depósitos aluviales y volcánico, areno-arcilloso y pumíticos, donde existen intercalaciones de derrames basáltico-andesíticos.

5.3 Piezometría

El acuífero Valle de Amealco ha sido observado en sus niveles estáticos y dinámicos básicamente desde el año 1981 a través de algunos pozos; el mayor número de pozos con datos de dichos niveles corresponde a los años 1981, 1982, 1985 y 1994.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con los datos del año 1994, los niveles estáticos oscilan entre 10 y 90 m, correspondiendo los valores más bajos a las zonas bajas y cercanas al río Lerma, estos valores se incrementan de 20 a 50 m hacia la parte central del área, localizándose los valores más altos hacia las faldas de las partes topográficamente altas, donde se localiza el Cerro El Gallo (figura 3).

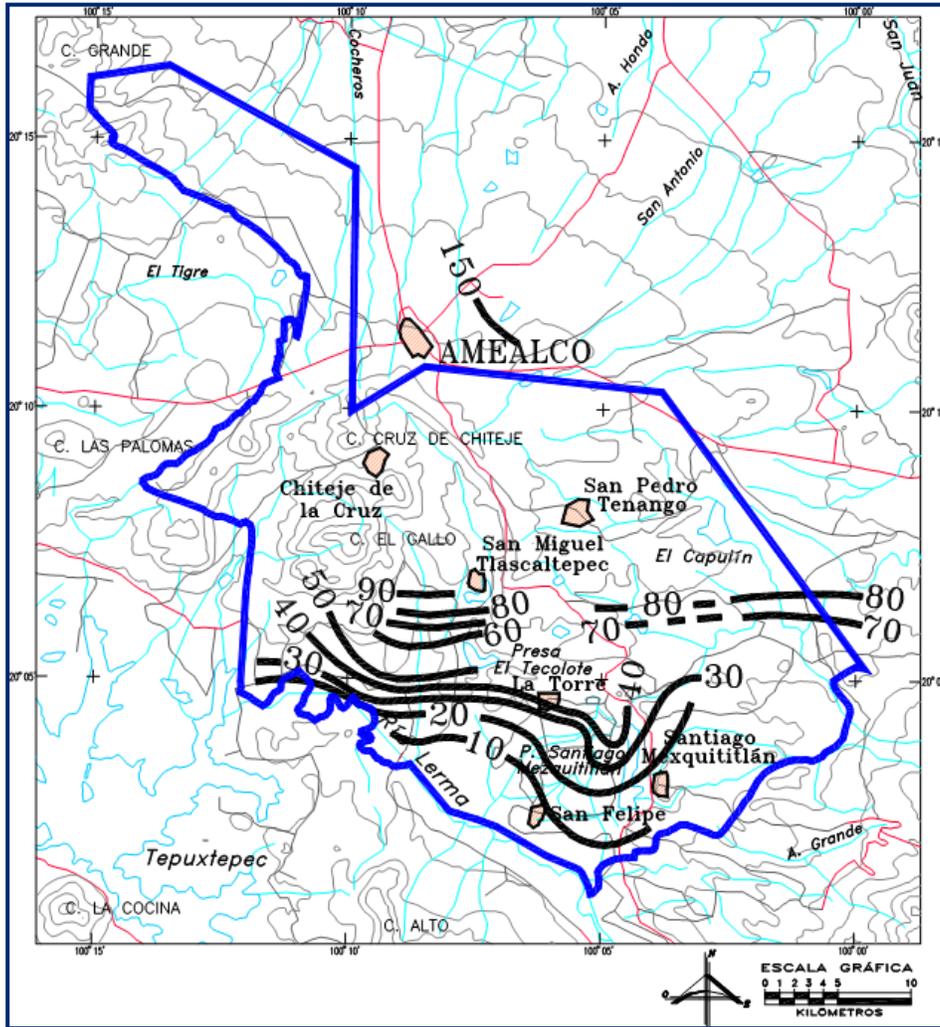


Figura 3. Profundidad al nivel estático en metros (1994).

5.4.2 Elevación del nivel estático

Actualmente el acuífero Valle de Amealco presenta un flujo que muestra un comportamiento semejante en las últimas décadas del siglo pasado; es decir, la recarga principal se origina de la infiltración de agua de lluvia que se presenta en áreas permeables de las partes altas y bajas de la zona.

Por otro lado, aun cuando los efectos del bombeo se aprecian a través de abatimientos pequeños del nivel estático, el esquema general de flujo ha variado poco y la presencia de manantiales y norias manifiestan que el acuífero se encuentra en una etapa dentro de cierto equilibrio.

De acuerdo con la configuración de la elevación del nivel estático del año 1994, que se muestra en la figura 4, se observa que existe una recarga principal del acuífero, que proviene de la infiltración de agua de lluvia que se precipita en las partes altas ubicada al norte del área y que fluye con dirección NE-SW; tendiendo hacia las partes de valle y a las inmediaciones del río Lerma; asimismo, se aprecia una recarga proveniente de la zona oriental, con flujos que presentan dirección perpendicular a la dirección del cauce del río Lerma.

De la piezometría del año 1994 se observa que la dirección preferencial del flujo subterráneo se presenta de oriente a poniente, figura 4.

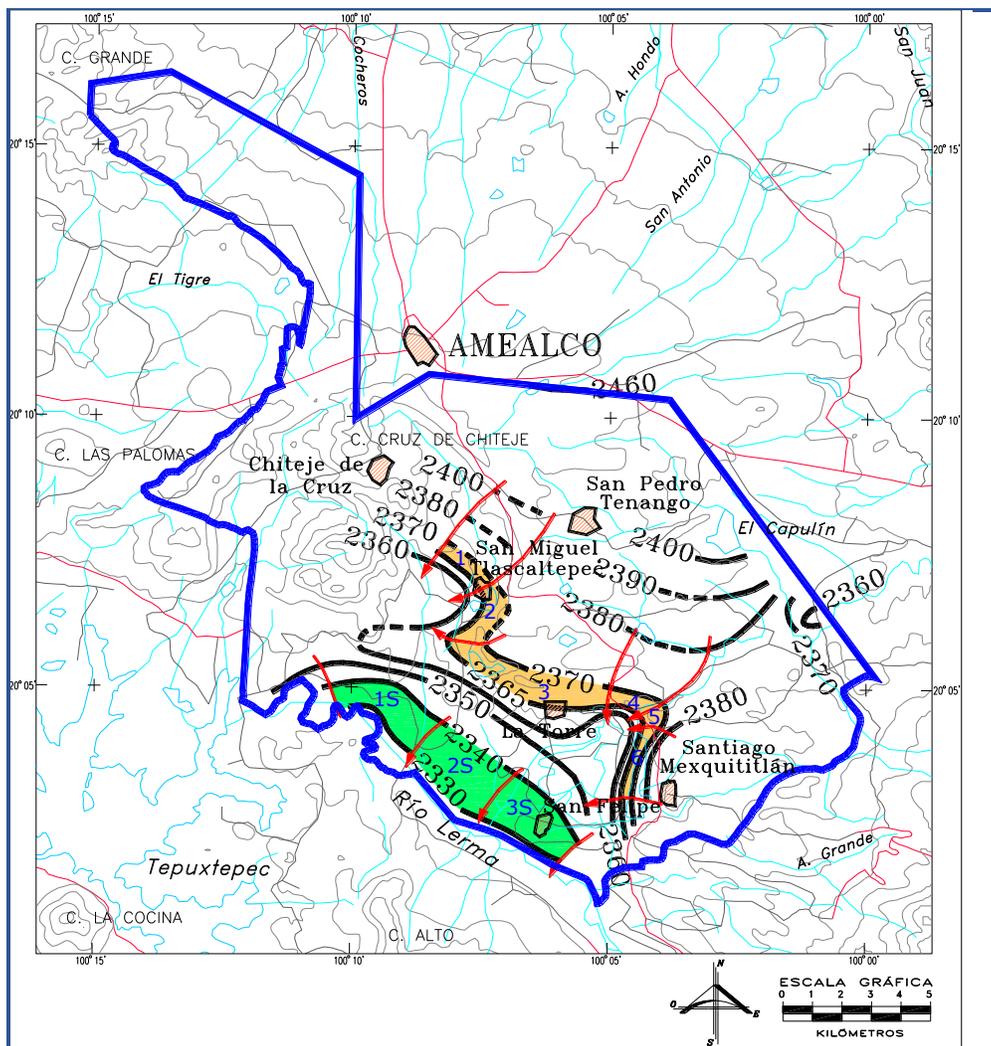


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (1994).

5.4.3 Evolución del nivel estático

De la información piezométrica del acuífero, que cuenta con datos del período 1981-1986 y del año 1994, se ha observado una pequeña región donde se registran abatimientos, donde su valor promedio es del orden de -0.20 m. Sin embargo, también se registran recuperaciones de los niveles del agua subterránea. Estos abatimientos pueden llegar a ser estacionales, por tanto se considera que el acuífero en su generalidad, presenta un abatimiento de sus niveles estáticos que tiende a cero.

En la figura 5 se muestra una configuración de la evolución del nivel estático para el período 1982-1994, la cual se seleccionó por contar con el mayor número de pozos que presentan lecturas de niveles estáticos. Al respecto se observa que los abatimientos oscilan entre 0.0 y -5.0 m, con promedio del orden de -2.5 m (-0.2 m/año). Dicha figura se elaboró con la información disponible, sin embargo, esta evolución puede estar influenciada por efectos estacionales.

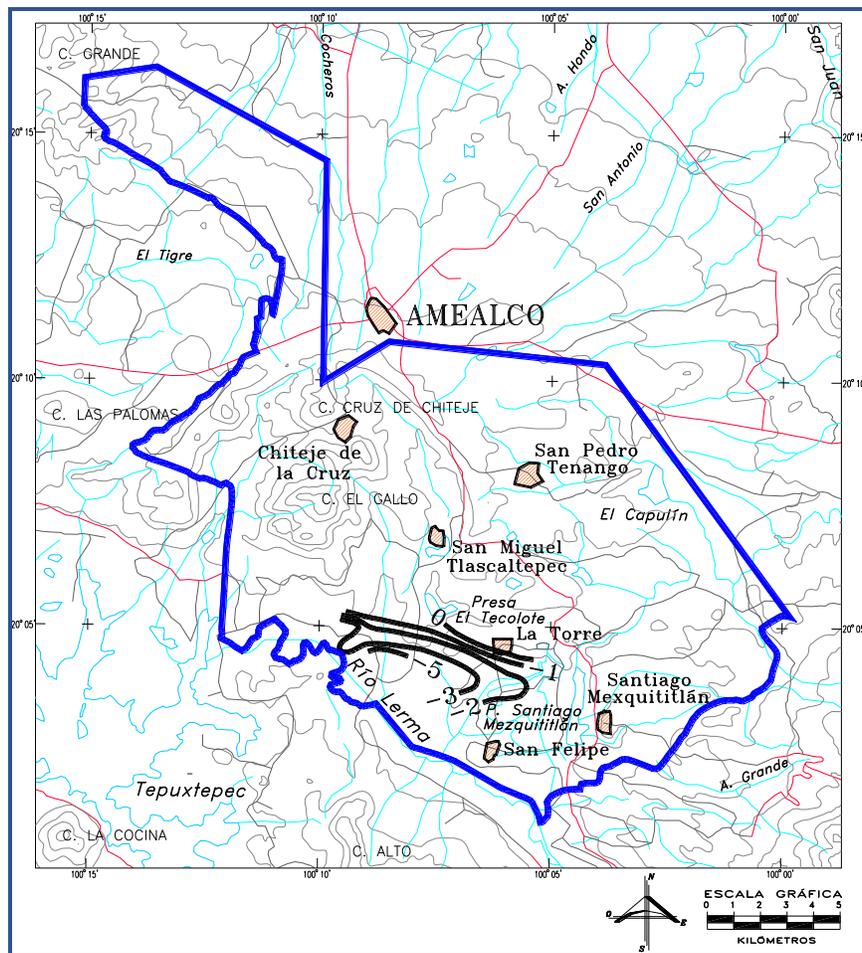


Figura 5. Evolución del nivel estático en metros (1982-1994)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Con base en los resultados obtenidos del muestreo de agua subterránea realizada en 1994, de aprovechamientos localizados en el área del acuífero, así como de sus análisis químicos respectivos se tiene lo siguiente:

Pozos

De los resultados de los análisis químicos, realizados a muestras de agua subterránea que fueron obtenidos en aprovechamientos que opera y controla la Comisión Estatal de Aguas, se concluye que pertenecen a la familia de aguas del tipo Sódico-Bicarbonatada.

Respecto al Ión Sodio (Na^+) se concluye que proviene de las rocas ígneas y de concentración por evaporación de aguas de lluvia. La concentración del Ión Bicarbonato (HCO_3^-), que depende de las reacciones entre el CO_2 de la atmósfera y el agua H_2O , revela que el agua subterránea es de origen meteórico, de reciente infiltración.

Manantiales

De los resultados de los análisis químicos, se concluyó que los manantiales presentan aguas que pertenecen a dos familias de agua: una Sódico-Bicarbonatada, localizada hacia el poblado de San Miguel Tlascaltepec y otra Cálcico-Bicarbonatada localizada en Las Fuentes, ubicada al norte de la presa La Charrasca. Lo anterior se debe a la heterogeneidad litológica. Asimismo, el mecanismo de flujo se lleva a cabo a través de medios fracturados, originando manantiales por contraste litológico.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que en general el agua subterránea es de origen meteórico, lo que significa que el tiempo de contacto con las unidades rocosas es muy corto. De igual forma, de acuerdo con los análisis químicos disponibles, el agua es apta para todos los usos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo al censo realizado en 1994, en la zona donde se encuentra el acuífero Valle de Amealco se localizaron un total de 82 aprovechamientos de los cuales 52 son pozos, 4 norias y 26 manantiales.

Existen otros manantiales que presentan unos caudales menores e intermitentes, que no fueron registrados, pero se identificaron en el estudio de 1994.

De los 52 pozos, en 41 se conoce su profundidad total, de los cuales solamente 4 tienen profundidades menores a 150 m, en general las norias presentan profundidades de hasta 15 m.

Del total de aprovechamientos censados, 67 se encuentran activos los cuales corresponden a 38 pozos, 3 norias y 26 manantiales; asimismo, 7 pozos se encontraban inactivos y el resto se encontraban secos o tapados. De los aprovechamientos activos, 31 son para uso agrícola, 14 para uso público urbano, 3 uso pecuario, 1 uso industrial y 18 para otros usos.

De la información de hidrometría realizada paralelamente al censo, así como de información recopilada por la Comisión Estatal de Aguas, el estudio de 1994 estimó una extracción de agua del orden de **11.2 hm³ anuales**, de los cuales 9.0 son para uso agrícola (80.3%), 1.7 hm³ más (15.2%) para uso público-urbano, 0.1 (0.9%) para uso industrial y los restantes 0.4 hm³ (3.6 %) se destinan a otros usos múltiples

Adicionalmente, se descarga a través de manantiales un volumen de **0.8 hm³ anuales** destinados al uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 1982-1994, en una superficie de 108 km² del acuífero, en la que están dispersos los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado anualmente por el almacenamiento del acuífero.

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

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración a lo largo de los escurrimientos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (R_v), y por flujo subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Debido a que en la superficie que cubre el acuífero no se ubican poblaciones importantes, sólo se considera la recarga por excedentes del riego.

7.1.1 Recarga Vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔV) tiende a ser nulo y existe información para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$R_v + E_h + R_i - ETR - B - Sh - D_m = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v : Recarga vertical por lluvia

E_h : entradas subterráneas por flujo horizontal

R_i : Recarga inducida (Retornos del riego agrícola e infiltraciones de la red de agua potable)

ETR : Descarga natural por evapotranspiración

D_n : Descarga natural por manantiales

B : Bombeo

Sh : Salidas por flujo horizontal

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = Sh + B + ETR + D_n \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático mostrada en la figura 4, mediante la expresión:

$$Q = T * B * i$$

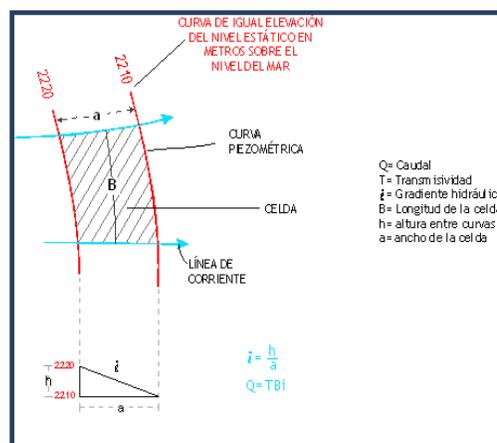
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

T = Transmisividad (m²/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada canal y el total para el año 2009, en la que en la se observa que su valor total es de **13.5 hm³ anuales**.

Tabla. 3 Entradas de agua subterránea por flujo horizontal al acuífero

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	2000	550	5	0.0091	0.005	0.0909	2.87
E2	2100	750	5	0.0067	0.005	0.0700	2.21
E3	5600	1000	5	0.0050	0.0001	0.0028	0.09
E4	1500	550	5	0.0091	0.005	0.0682	2.15
E5	500	710	5	0.0070	0.005	0.0176	0.56
E6	2500	350	5	0.0143	0.005	0.1786	5.63
Total entradas							13.50

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

La recarga inducida está constituida principalmente por la infiltración vertical debida a los excesos de agua aplicados en el riego y por fugas de los sistemas de distribución de agua potable y las redes de alcantarillado.

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la agricultura.

Para el uso agrícola se consideró un coeficiente de 0.25 y para el uso público-urbano 0.20; uso agrícola = 9.8 hm^3 anuales (incluye los 0-8 de los manantiales) * 0.25 = 2.45; y uso público-urbano = 1.7 hm^3 anuales * 0.20 = 0.34

De esta manera la recarga inducida resultó **Ri = 2.8 hm³ anuales**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo (B), las salidas subterráneas (Sh), descarga a través de manantiales (Dm) y por la evapotranspiración en la zona de niveles freáticos someros (ETR).

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

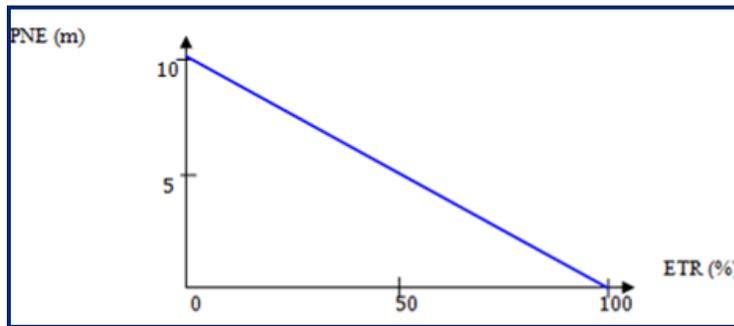
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 15.0 °C y precipitación= 650 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 531.9 mm. Solamente en un área de 12 km² los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	15		
P(mm) =	650	P ² =	422500
L =	843.75	L ² =	711914.063
ETR (mm)	531.9		

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m y con cobertura vegetal nativa, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.

Si consideramos que en sólo en una superficie de 12.0 km² se registran niveles freáticos someros, donde la profundidad media es del 9.0 m y la lámina de evapotranspiración real es de 531.9 mm, de acuerdo con la gráfica anterior:



Por lo tanto, para el cálculo de la evapotranspiración se consideró: $ETR = 12.0 \text{ km}^2 (0.5319 \text{ m}) (0.10) = 0.6$, **ETR = 0.6 hm³/año.**

7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con la hidrometría la descarga a través de los 26 manantiales identificados como relevantes asciende a un valor del orden de **0.8 hm³/año.**

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **11.2 hm³/año**.

7.2.4 Salidas por flujo subterráneo horizontal

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del NE presentado en la figura 4. Su valor es de **9.9 hm³ anuales**, tal como se muestra en la tabla 4. El flujo tiende a descargar hacia el cauce del río Lerma.

Tabla 4. Salidas de aguas subterránea hacia el río Lerma

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	3670	1490	10	0.0067	0.0050	0.1232	3.88
S2	3070	1590	10	0.0063	0.0050	0.0965	3.04
S3	3170	1680	10	0.0060	0.0050	0.0943	2.98
Total salidas							9.90

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, aunque se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo, los registros existentes se encuentran dispersos en tiempo y espacio y sólo cubren una pequeña extensión superficial del acuífero. Adicionalmente, también se registran valores que indican recuperaciones de los niveles del agua subterránea y la configuración de elevación del nivel estático no muestra alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento, que pudieran ser causadas por la concentración del bombeo y/o de aprovechamientos.

Por ello se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto, **$\Delta V(S) = 0$**

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned} R_v &= Sh + B + ETR + D_n \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 9.9 + 11.2 + 0.6 + 0.8 - 0.0 - 13.5 - 2.8 \\ R_v &= 6.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 6.2 + 13.5 + 2.8 \\ R_t &= 22.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **22.5 hm³/año**, de los cuales 19.7 son recarga natural y los 2.8 hm³/año restantes recarga inducida.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, aunque las salidas por flujo subterráneo tienden a descargar hacia el cauce del río Lerma, no se consideran comprometidas como parte del gasto ecológico, ya que dentro de la celda de flujo donde se cuantificaron existen pozos con derechos vigentes. Adicionalmente, en el acuífero vecino Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, perteneciente al estado de Michoacán, no existen aprovechamientos en la porción aledaña al cauce del río Lerma. Por lo tanto, solo se considera comprometido el volumen que descargan los manantiales, es decir **0.8 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **19,050,742 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 22.5 - 0.8 - 19.050742 \\ \text{DMA} &= 2.649258 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **2,649,258 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. Actividades de Carácter Geohidrológico en las zonas de Querétaro, Huimilpan y Amealco, Qro., realizado por la empresa Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S.A.