

***Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Toluquilla (1402),  
Estado de Jalisco***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación  
20 de abril de 2015*

## Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CDLVIII REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "LERMA-SANTIAGO-PACÍFICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE JALISCO							
1402	TOLUQUILLA	49.1	2.4	119.018105	59.8	0.000000	-72.318105

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



***Comisión Nacional del Agua***  
***Subdirección General Técnica***  
***Gerencia de Aguas Subterráneas***  
***Subgerencia de Evaluación y***  
***Ordenamiento de Acuíferos***

**DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO TOLUQUILLA (1402),  
ESTADO DE JALISCO.**

**México, D.F., junio de 2010**

## CONTENIDO

1.	GENERALIDADES .....	3
	Antecedentes .....	3
1.1	Localización .....	3
1.2	Situación administrativa del acuífero .....	5
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....	5
3.	FISIOGRAFÍA.....	8
3.1.	Provincia fisiográfica .....	8
3.2.	Clima.....	9
3.3.	Hidrografía .....	9
3.4.	Geomorfología .....	10
4.	GEOLOGÍA .....	11
4.1.	Estratigrafía.....	11
4.2.	Geología estructural.....	15
4.3.	Geología del subsuelo .....	16
5.	HIDROGEOLOGÍA .....	16
5.1.	Tipo de acuífero .....	16
5.2.	Parámetros hidráulicos .....	17
5.3.	Piezometría.....	17
5.4.	Comportamiento hidráulico .....	17
5.4.1.	Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2.	Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3.	Evolución del nivel estático.....	19
5.5.	Hidroggeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....	21
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	22
7.1.	Entradas .....	22
7.1.1.	Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.1.3.	Retornos por riego (Rr).....	24
7.2.	Salidas .....	25
7.2.1.	Salida a través de manantiales (Dm) .....	25
7.2.2.	Bombeo (B) .....	25
7.2.3.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	25
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	26
8.	DISPONIBILIDAD .....	26
8.1.	Recarga total media anual (Rt) .....	27
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM).....	27
8.3.	Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS).....	27
8.4.	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS) .....	27
9.	BIBLIOGRAFIA.....	28

## **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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa).

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 Toluquilla, definido con la clave 1402 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en la porción centro del estado de Jalisco, entre las coordenadas 20° 28' y 20° 42' de latitud norte y entre los meridianos 103° 07' y 103° 34' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 632 km<sup>2</sup>.

Colinda al norte, con el acuífero Atemajac, al sur con Cajitlán, al este con Altos de Jalisco y al oeste con los acuíferos San Isidro y Arenal, todos ellos del estado de Jalisco. (Figura 1).

Geopolíticamente comprende parcialmente a los municipios de Zapopan, Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, Tonalá y Juanacatlán, la totalidad del municipio EL Salto y muy pequeñas porciones de los municipios Ixtlahuacán de los Membrillos y Zapotlanejo.

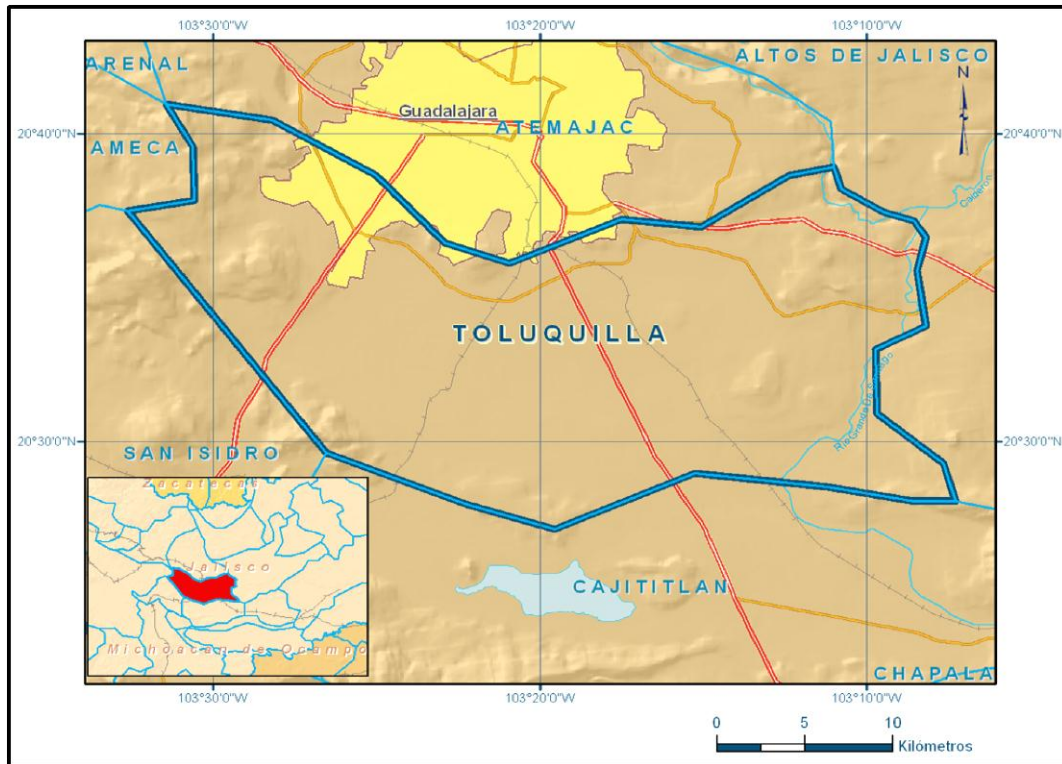


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimita al acuífero

<b>ACUIFERO 1402 TOLUQUILLA</b>						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	11	0.4	20	38	55.5
2	103	10	48.1	20	38	12.7
3	103	9	28.7	20	37	26.9
4	103	8	33.6	20	37	11.6
5	103	8	12.2	20	36	38.0
6	103	8	27.5	20	35	33.8
7	103	8	17.5	20	34	24.0
8	103	8	12.2	20	33	46.8
9	103	9	43.9	20	33	0.9
10	103	9	40.9	20	30	55.6
11	103	7	38.6	20	29	17.8
12	103	7	17.2	20	28	4.4
13	103	8	33.6	20	28	4.4
14	103	11	12.6	20	28	31.9
15	103	15	17.2	20	28	59.4
16	103	19	34.0	20	27	9.4
17	103	22	16.0	20	27	58.3
18	103	26	32.8	20	29	39.2
19	103	32	36.6	20	37	29.9
20	103	30	34.3	20	37	51.3
21	103	30	37.3	20	39	35.3
22	103	31	26.3	20	40	57.8
23	103	28	10.6	20	40	27.3
24	103	25	1.1	20	38	40.3
25	103	22	55.7	20	36	28.8
26	103	20	56.5	20	35	49.1
27	103	17	31.7	20	37	14.7
28	103	15	4.9	20	36	59.4
29	103	12	22.9	20	38	40.3
1	103	11	0.4	20	38	55.5

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Toluquilla pertenece al Organismo de Cuenca “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a la disposición de tres Decretos de veda. El primero rige en las porciones centro y norte del acuífero y es el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para la construcción o ampliación de obras de alumbramiento de aguas del subsuelo en los Valles de Atemajac, Tesistán y Toluquilla, Jal.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 3 de febrero de 1951.

El segundo rige en las porciones sur, oriental y occidental del acuífero: *“Decreto que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de la zona circunvecina a la veda de los Valles de Atemajac, Tesistán y Toluquilla, Jal.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de abril de 1976.

Por último, El tercero rige en el extremo nororiental del acuífero: *“Decreto declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la parte que corresponde a los Municipios de Tomatlán, La Huerta, Cihuatlán y Tonalá, Jal.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 21 de septiembre de 1984.

Los tres decretos de veda se clasifican como tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2010, los municipios Zapopan, Tlaquepaque y Tonalá se encuentran se clasifican como zona de disponibilidad 2, el municipio El Salto como zona 4, Tlajomulco de Zúñiga como zona 5 y Juanacatlán como zona 7.

El uso principal es el agrícola. En la parte central del acuífero se localiza una porción del Distrito de Riego 013 “Estado de Jalisco”. Una pequeña porción al noroeste pertenece a la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre “La Primavera”. A la fecha no se ha constituido un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS VALLES DE ATEMAJAC, TESISTÁN, AMECA, AHUALULCO Y SAN MARCOS, JALISCO, realizado en 1973 por la empresa Ariel Consultores, S.A. de C.V. para la DGE-SARH.** Incluyó un censo de captaciones, nivelación de brocales, hidrología, hidrogeoquímica y una apreciación preliminar de los recursos hídricos subterráneos.

Con base en interpretaciones fotogeológicas y verificación de campo, se concluyó que la secuencia estratigráfica está integrada por sedimentos lacustres del Paleógeno-Neógeno, localizados en el valle de Ocotlán y parte de las riveras norte y sur del lago de Chapala. El 70% de la superficie está representada por rocas volcánicas extrusivas del Paleógeno-Neógeno, conformadas por riolitas, basaltos, tobas y vidrios volcánicos, así como arenas pumicíticas.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE TESISTÁN-ATEMAJAC-OCOTLÁN, realizado en 1981 por la empresa Geocalli, S.A. de C.V. para la SARH.** Entre las conclusiones más sobresalientes destaca que la extracción para toda el área fue de  $185 \text{ hm}^3/\text{año}$  con un equivalente de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , destinados al uso público urbano. La profundidad al nivel estático variaba entre 5 y 10 m para la vecindad del río Grande de Santiago y entre 80 y 100 m para la cuenca de Atemajac. Se estimó un volumen de salida subterránea hacia el cañón del río Grande de Santiago del orden de  $12.4 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN EL VALLE DE EL SALTO, realizado en 1988 por la empresa Geo Ingeniería Alfven, S. A. de C.V., para la Asociación de Industriales de Jalisco, encabezados por Celulosa y Derivados.** Estudio orientado a determinar las condiciones del acuífero y medidas de protección que se debían adoptar para conservarlo. Las aportaciones más notables de este trabajo fueron que una buena parte del valle de El Salto se localiza sobre una fosa tectónica cubierta mayormente por materiales de tipo lacustre, como lo definen las anomalías magnéticas y gravimétricas interpretadas.

Se demostró la casi extinción del acuífero “libre” debido a la sobreexplotación causada por los pozos industriales como los de Euskadi, Aralmex, Penwalt del Pacífico, Envases de Jalisco, etc., determinándose una evolución piezométrica negativa de  $6 \text{ m/año}$ . En la vecindad del poblado La Calera y en el pozo industrial de la empresa Penwalt del Pacífico, fue localizada la peor calidad del agua subterránea. El balance resultó con un déficit, el cual es tomado a costa del almacenamiento, situación que ha generado un flujo del río Grande de Santiago hacia el cono de abatimiento.

**ESTUDIO ISOTÓPICO DE AGUA Y EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA EN EL VALL DE EL SALTO, realizado en 1989 por la misma empresa Geo Ingeniería Alfven, S. A. de C. V., para la misma Asociación de Industriales de Jalisco,** con el propósito de incrementar el conocimiento del acuífero e identificar una nueva fuente de almacenamiento y abastecimiento para satisfacer la demanda en la zona. Los análisis isotópicos del agua, indicaron como posibles zonas de recarga, la falda sur del volcán de San Martín y los basaltos recientes que afloran en Las Alazanas. El ritmo de abatimiento de la superficie piezométrica fue ratificada en una evolución negativa de  $6 \text{ m/año}$ .

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN LA ZONA DE TESISTÁN-ATEMAJAC, ESTADO DE JALISCO, realizado en 1989-1990 para la Comisión Nacional del Agua por la empresa Ariel Consultores, S.A. de C.V.** El área evaluada incluyó los valles de Atemajac, Tesistán y



Ocotlán, cubriendo un área aproximada de 6300 km<sup>2</sup>. Actualizó el censo de aprovechamientos en un total de 2446, de los cuales 1472 son pozos, 852 norias, 217 manantiales y 5 galerías filtrantes. La extracción mayor correspondió al valle de Atemajac con 190 hm<sup>3</sup>/año y 39 hm<sup>3</sup>/año que son explotados en el valle de Ocotlán (Toluquilla, Cajititlán y Ocotlán). Se contó con una base topográfica de solo 42 pozos nivelados y dispersos en los 6300 km<sup>2</sup>. Información que resultó insuficiente para definir con precisión y certidumbre la red de flujo del agua subterránea. Se practicaron pruebas de bombeo que resultaron con transmisividades del orden de  $0.13 \times 10^{-3}$  a  $40 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. El balance de agua subterránea para el valle de Atemajac resultó con una extracción de 206 hm<sup>3</sup>/año, superior en 55 hm<sup>3</sup>/año a las entradas y para los valles de Cajititlán y Ocotlán las entradas estimadas fueron de 54 hm<sup>3</sup>/año, inferiores en 3 hm<sup>3</sup>/año a la extracción.

**ESTUDIO ISOTÓPICO E HIDROGEOQUÍMICO DE LOS ACUÍFEROS DE TOLUQUILLA-OCOTLÁN-LA BARCA, ESTADO DE JALISCO, realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en 1992-1993.** Los resultados hidrogeoquímicos e isotópicos, permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

El lago de Chapala no recarga a los acuíferos localizados en las subregiones de Toluquilla-Guadalajara, Mezcala-Jocotepec y Ocotlán. Los acuíferos emplazados en las tres subregiones se recargan de agua de precipitación local. Por influencia del bombeo, algunos pozos localizados cerca del perímetro del Lago de Chapala manifiestan hidrogeoquímica e isotópicamente una similitud con las aguas del lago. No existen evidencias sobre la interacción del lago de Chapala con las lagunas de San Marcos, Atotonilco y Zacoalco.

El agua del río Grande de Santiago recarga localmente al acuífero. El agua de los pozos ubicados en la parte central del valle de Toluquilla está altamente mineralizada por la interacción del agua en la matriz de la roca durante tiempo de residencia muy grande. Algunos de los pozos que alimentan al sistema Toluquilla del SIAPA y suministran agua potable a la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), pueden estar influenciados por fluidos geotermales de la caldera de La Primavera.

Ratifica que el agua extraída en diversos pozos de Toluquilla está fuera de norma para el consumo humano en: flúor (F), manganeso (Mn), fierro (Fe) y arsénico (As).

**ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE PÉRDIDA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA, JALISCO. Realizado por la empresa Planeación, Sistemas y Control, S.A. de C.V durante 1993-1994.** Comprendió la descripción de los sistemas de abastecimiento, evaluación de fugas en tomas domiciliarias y en la red de agua potable, análisis global de pérdidas, recomendaciones y planteamiento de soluciones. Sus objetivos principales fueron dilucidar la posible interconexión hidrológica del Lago de Chapala con los acuíferos existentes en la zona de Toluquilla- Ocotlán-La Barca, establecer la posible interacción geohidrológica entre el lago de Chapala y las lagunas de Atotonilco, San Marcos y Zacoalco y determinar el origen de recarga, tiempo de residencia y calidad química del agua subterránea.

**ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO “POZOS SISTEMA TOLUQUILLA”, realizado en 1995 por el Departamento de Hidrología del SIAPA** para atender el problema de “fluorosis” en los habitantes del valle de Toluquilla. Mediante la realización de análisis fisicoquímicos por metales pesados y arsénico en todos los pozos del Sistema Toluquilla, determina que el agua contiene concentraciones superiores a las establecidas como límites máximo permisibles por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano de los siguientes elementos: Fe, Mn, Hg, Mg y As. Como resultado de esto fueron se sustituyeron algunos pozos.

**ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA CONURBADA DE GUADALAJARA, CUENCAS ATEMAJAC, TOLUQUILLA Y CAJITITLÁN, realizado para el Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA) en 1996 por la empresa Geoex, S.A. de C.V.** Incluyó censo de aprovechamientos, nivelación de brocales, geoposicionamiento de pozos piloto, piezometría, análisis físico-químicos específicos, selección de sitios para recarga artificial, pruebas de bombeo, así como balance y disponibilidad de agua subterránea, en una superficie de 1930 km<sup>2</sup>, de los cuales 760 km<sup>2</sup> pertenecen a la cuenca Atemajac; 650 km<sup>2</sup> para Toluquilla y 576 km<sup>2</sup> para Cajititlán. De manera integral, las entradas de agua subterránea fueron del orden de 241.4 hm<sup>3</sup>, con una extracción de 285.5 hm<sup>3</sup>, lo que resulta en un cambio de almacenamiento negativo equivalente a 44.1 hm<sup>3</sup>.

**ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA INTEGRAL DE LAS CUENCAS ATEMAJAC Y TOLUQUILLA, realizado para el SIAPA en 2003 por la empresa Geoex, S.A. de C.V.** Este estudio tuvo como objetivo general obtener información necesaria para calcular la recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para el periodo 1996-2003. Concluye que en existe un déficit anual de 25.6 hm<sup>3</sup>, para el caso de Atemajac y de 13.3 hm<sup>3</sup> para Toluquilla.

Este trabajo constituye 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**

De acuerdo a la clasificación de las Provincias Fisiográficas del INEGI (1997), la superficie cubierta por el acuífero se ubica en el sector Occidental de la provincia Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), muy próxima, al sur, de la frontera con la provincia de la Sierra Madre Occidental (SMO).

A escala continental, la FVTM se ha desarrollado desde el Mioceno Tardío sobre la margen sur-occidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco, arco volcánico que se caracteriza por una serie de planicies escalonadas delimitadas por fallas, estructuras y aparatos volcánicos que atraviesan a la República Mexicana en dirección casi Este – Oeste, a lo largo del paralelo 19° 30', con una extensión aproximada de 980 km, desde las cercanías de las costas de Colima, Jalisco y Nayarit en el Occidente, hasta las costas de Veracruz en el Oriente.

Entre los Cerros El Colli y Gachupín existe una “garganta” por donde aparentemente existió una interconexión entre las cuencas hidrográficas de Atemajac y Toluquilla. Sin embargo, esta zona es actualmente un parteaguas natural de los escurrimientos superficiales de ambas cuencas y una frontera geológica natural de las aguas subterráneas de ambos acuíferos.

### **3.2. Clima**

Con base en los datos históricos de precipitación, temperatura y evaporación potencial de las estaciones climatológicas que se ubican en la zona, y con apoyo en la carta de climas, el clima predominante de la cuenca es templado, semicálido - subhúmedo, con temperatura media anual de 19.5° C, con invierno y primavera secos y semicálido sin estación invernal drástica.

La temperatura media anual varía de 19.4 a 21.3° C, con un valor promedio de 20.1° C. El promedio de días con heladas al año es de 6.5.

La precipitación media anual para toda el área varía entre 800 y 1000 mm; con una media anual de 904 mm, con régimen de lluvias en los meses de junio a septiembre.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero se localiza dentro de la región Hidrológica RH12 “Lerma Santiago”, una porción en la cuenca Río Verde – Presa Santa Rosa, y otra en la Cuenca Río Grande de Santiago 1, Subcuenca San Lucas Evangelista.

La Cuenca está comunicada con el río Grande de Santiago mediante la rectificación del arroyo El Ahogado. El origen de esta corriente tiene lugar en el sitio conocido como Cerro del Cuatro, ubicado a unos 7 km al sur del centro de la ciudad de Guadalajara, desciende de una altura de 1,600 msnm, sus aguas cruzan por el periférico, aguas abajo recibe los excedentes de la presa Las Pintas y de los vasos que se ubican en el valle de Toluquilla, continúa su curso hacia el sureste, cruza por la parte norte del Aeropuerto Internacional de Guadalajara, para posteriormente cruzar la carretera Federal No. 44 (tramo Guadalajara-Chapala); aguas abajo descarga a la presa de almacenamiento El Ahogado y a la de ella el arroyo escurre por campos dedicados a la agricultura y finalmente descarga sus aguas durante la época de lluvias al Río Grande de Santiago en un punto que se localiza a unos 4 km río arriba del poblado El Salto. La longitud del arroyo El Ahogado desde su origen hasta la descarga es de 22 km.

Al SW se tiene el arroyo San Juanate, cuyo cauce inicia donde brotaba el manantial, con una sección bien definida y se va reduciendo conforme se adentra en el valle. En la región NW se forma el arroyo Garabatos-Seco que también se vuelve incipiente a su paso por la población de Toluquilla.

Durante la época de lluvias se forman una infinidad de escurrimientos de sección reducida y corta longitud que son captados por pequeños bordos y por los tajos Las Pomas, El Guayabo, El Molino, El Mulato, El Cuervo, El Cuatro, San José y Magdaleno.

El embalse superficial más importante de esta cuenca es la presa El Ahogado, la cual tiene capacidad para almacenar  $6.0 \text{ hm}^3$  en un área de 750 hectáreas; su longitud es de 5 km y ancho de 1.5 km, con una altura máxima de 6 m. El agua, a pesar de estar contaminada por las descargas residuales del sector sur de la ciudad de Guadalajara y diversas industrias asentadas en el perímetro del vaso, es destinada localmente para riego de pastizales en el centro de la cuenca.

En el extremo oriente de la cuenca, entre Rancho Nuevo y El Salto, aparece la corriente más importante: el Río Grande de Santiago; de los 21.5 km de desarrollo, 9.5 km son en planicie y 12 km a lo largo de un profundo cañón.

Existen algunos manantiales de regular importancia como son: Toluquilla, La Concha, San Juanete, El Colomo y Ojo de Agua de Ramírez; otros ya se han agotado, como los de La Cajilota, El Aguacate y Tecomates.

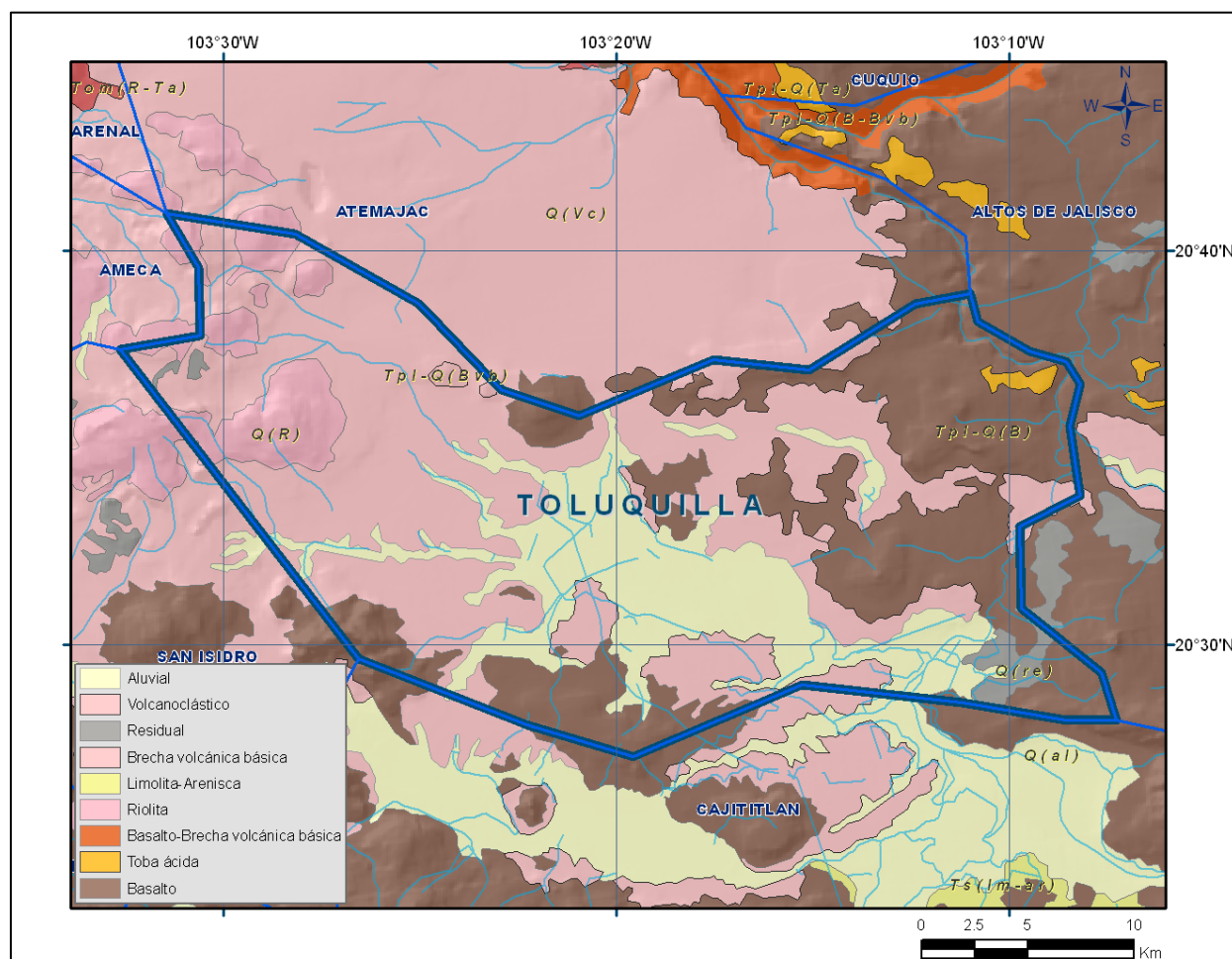
### **3.4. Geomorfología**

En el área que cubre la superficie del acuífero está formada por rasgos geomorfológicos de origen volcánico, donde el Complejo Volcánico La Primavera (CVLP) y la Cadena Volcánica Sur de Guadalajara (CVSG), representan los rasgos volcánicos más notables de la región.

En general, la topografía de la cuenca es plana, disponiendo de 65% de superficie con terrenos cuya pendiente es inferior a 0.5%, lo que la hace propicia para desarrollo urbano-agropecuario o urbano. El 15% de la cuenca presenta pendientes inferiores al 10%, apta para cultivos y uso ganadero con algunas restricciones de acuerdo a la capacidad del suelo, y el restante 20% presenta pendientes superiores al 10%, donde es necesario mantener la conservación de vegetación natural y destinarla para pastoreo y/o explotación de material para construcción.

La cuenca presenta valles con una altitud promedio de 1,500 msnm, limitados por una serie de cerros entre los que destacan: El Colli (2,000 msnm), El Pelón (2,225 msnm), Las Latillas (2,100 msnm), El Cuatro (1,900 msnm), Escondido (1745 msnm), San Bartolo (1780 msnm), San Martín (1,700 msnm) y Sacramento (1,800 msnm). Y también los cerros: Sacramento, Las Latillas, La Herradura y La Campana, elementos topográficos que representan la frontera y

## 4. GEOLOGÍA



#### 4.1. Estratigrafía

### **Grupo Río Santiago – Tmrs(B-A)**

El Grupo Río Santiago es la unidad litológica de mayor espesor (~ 800 m) y más extendida en el área. Se encuentra bien expuesta a lo largo del cañón del río Grande de Santiago y cañón del río Mezquital. Consiste principalmente de productos volcánicos máficos, integrados predominantemente por flujos de basalto y andesita basáltica con intercalaciones menores de tobas soldadas hacia la base y flujos de ceniza y lapilli cerca de la cima.

Este grupo incluye las siguientes unidades litológicas: toba San Cristóbal (10.17 Ma), basalto San Cristóbal (11.0 a 8.5 Ma), toba Los Caballos (~ 8.0 Ma) y basalto Arroyo Mezcala (7.5 Ma), unidades litológicas y edades radiométricas documentadas por Rossotti, *et al.* (2002).

Este primer episodio de vulcanismo en la región de Guadalajara y parte del sector occidental de la FVTM, marca el inicio del desarrollo de este importante arco volcánico, mismo que evolucionó durante el Mioceno Tardío, entre 11 y 7.5 Ma.

Esta unidad normalmente exhibe una porosidad y conductividad hidráulica muy baja, asociada a locales zonas de fracturamiento y/o alteración saturadas que forman acuíferos semiconfinados de muy baja a nula potencialidad.

### **Lavas máficas cubiertas por flujos de riolacita – TplQpt(B-A)**

Esta unidad litológica representa un episodio de vulcanismo bimodal emplazado en el extremo sur y suroeste de la cuenca de Toluquilla. Específicamente aflora en los cerros: Sacramento, Las Latillas, La Herradura y La Campana, elementos topográficos que representan la frontera y parteaguas natural entre las cuencas hidrológicas de Toluquilla al norte y las cuencas de Cajititlán y San Isidro Mazatepec, al sur y suroeste respectivamente.

Está constituida por una sucesión de rocas volcánicas representadas por delgados flujos de lavas, brechas y escoria de composición basáltica y andesítica, vulcanismo máfico parcialmente cubierto por derrames de riolacita en los cerros Las Latillas y La Herradura. Con base en observaciones petrológicas y estratigráficas de campo, el CRM (1998) le asigna una edad Plioceno - Pleistoceno.

### **Conos cineríticos y flujos de lavas máficas – Qpt(B-A)**

Unidad representada por conos cineríticos, flujos de lava, diques, brechas y escoria de composición predominantemente basáltica. Productos volcánicos asociados a fallamiento regional profundo paralelo a la Cadena Volcánica Sur de Guadalajara (CVSG). Estos materiales están expuestos en una serie de estrato-volcanes que se perfilan hacia la margen sur de la Zona Metropolitana de Guadalajara – cerros El Gachupín, Santa María, El Cuatro, El Tapatío, Escondido, San Martín y Papantón de Juanacatlán- aparatos volcánicos alineados en dirección noroeste-sureste desde el río Grande de Santiago hasta el cerro El Gachupín, cadena de volcanes que representan la frontera y parteaguas natural entre las cuencas hidrológicas Atemajac y Toluquilla.

### **Toba Tala – Qpt(TT)**

La Toba Tala representa a los materiales piroclásticos más superficiales que ocurren en una amplia área (~1,200 km<sup>2</sup>) alrededor de la caldera de La Primavera y por tanto, cubren la mayor parte de las depresiones topográfico-estructurales y valles del área.

Estos depósitos están integrados por tobas de caída libre, lapilli y flujos de ceniza con abundantes fragmentos de pumicita, con menor proporción de vidrio volcánico (obsidiana) y ocasionales fragmentos y bloques mayores de basalto, andesita y riolita. Fragmentos y bloques que fueron arrojados de la caldera de La Primavera durante las violentas e intermitentes actividades explosivas hace aproximadamente 0.095 Ma. Ordinariamente estos materiales son de color blanco, gris y crema, dispuestos en capas delgadas a medianas bien estratificadas, con evidencias locales de estratificación cruzada por procesos exógenos de sedimentación. En algunas localidades la porción media de esta unidad se ha reportado bien soldada.

### **Domos riolíticos y flujos de lavas félsicas – Qpt(R)**

Las primeros domos del CVLP fueron emplazados a través de la secuencia volcánica del Paleógeno-Neógeno preexistente hace ~145,000 años, extrusión que tuvo lugar al noroeste, muy cerca del centro del complejo. Esta actividad volcánica inicial fue seguida por la emisión de alrededor de 20 km<sup>3</sup> de magma y materiales piroclásticos que dieron origen a la Toba Tala, evento que ocurrió hace ~95,000 años.

Con la rápida expulsión de materiales piroclásticos que dieron origen a la Toba Tala, se formó un vacío en la parte superior de la cámara magmática que ocasionó que las rocas sobreyacentes se colapsaran por gravedad, formando así una caldera semicircular de ~11 km de diámetro.

La expresión superficial de dicho asentamiento está representada por una serie de fallas y fracturas semicirculares que delimitan la caldera hacia el norte y noreste, asentamiento que fue más pronunciado en la mitad norte de la caldera. Durante las explosiones, la Toba Tala se depositó no sólo dentro de la caldera sino también en una área de aproximadamente 1,200 km<sup>2</sup> alrededor de la estructura. Durante y después de las emanaciones de lava y material piroclástico, en la parte hundida de la caldera, se formó un lago donde se depositaron sedimentos fluviales, aluviales y lacustres derivados de la erosión de las elevaciones topográficas circundantes.

Poco después del emplazamiento de los domos centrales, hace ~90,000 años, domos porfiríticos y flujos de lava félsica fueron emplazados a lo largo de dos arcos concéntricos. El primero a lo largo de la porción noreste de la fractura anular y el segundo cortando la parte media de la caldera. Un último periodo de inactividad volcánica, está evidenciado por la depositación de importantes volúmenes de sedimentos en la cuenca colapsada.

Hace ~75,000 años, un conjunto de domos riolíticos se emplazaron concéntricamente a lo largo de los márgenes suroccidentales de la caldera. El levantamiento resultante por la

renovada insurgencia de magma, dio fin a la depositación en esta parte de la caldera. Levantamiento que culminó con el emplazamiento, en el arco sur, de un grupo de domos afíricos y lavas félsicas viscosas más jóvenes con edad entre 60,000 a 25,000 años.

Desde un punto de vista hidrogeológico, la Toba Tala presenta características granulométricas y escasa compactación que se traducen en una elevada porosidad y permeabilidad que permite la rápida infiltración del agua de lluvia. En las pruebas de bombeo realizadas en pozos de abastecimiento que explotan el acuífero alojado en esta unidad hidroestratigráfica, se determinaron rangos de porosidad y conductividad hidráulica muy favorables asociadas a las propiedades físicas de los materiales piroclásticos granulares intersectados, mismos que constituyen acuíferos libres de alta potencialidad.

### **Depósitos aluviales - Qal**

Para efectos descriptivos, bajo este término se han agrupado todos los depósitos de arrastre continental derivados de la denudación reciente de los elementos topográficos circundantes a la cuenca de Toluquilla. Incluye depósitos aluviales, fluviales, residuales y lacustres.

Estos materiales localmente alcanzan espesores mayores, sobre todo en la fosa tectónica “El Ahogado”, depresión estructural donde se han intersectado espesores de hasta 176 m de sedimentos lacustres limo-arcillosos y arenas finas. A continuación se describen las características y consideraciones más importantes de cada uno de estos depósitos.

Los depósitos aluviales y fluvio-aluviales, representan la sedimentación continental más importante en el área. Son depósitos de grava y arena gruesa acumulados en forma de abanicos aluviales sobre los cauces de drenaje mayor, principalmente a lo largo de la base de la caldera “La Primavera”.

En la margen oriental y norte del CVLP, particularmente en la cuenca endorréica Bajío de la Arena, estos depósitos granulares no consolidados alcanzan espesores de varias decenas de metros, sedimentos que sobreyacen en discordancia a los materiales piroclásticos de la Toba Tala. Regularmente están cubiertos por una delgada capa de suelo aluvial o residual. Esencialmente son depósitos retrabajados de las prominencias topográficas de la porción oriental de la sierra La Primavera, materiales que exhiben una composición y un arreglo textural muy similar a los materiales piroclásticos de la Toba Tala, situación que hace difícil su diferenciación. Estos materiales de arrastre continental son de composición predominantemente pumicítica, de granulometría variable y comúnmente presentan estratificación cruzada. Localmente incluyen delgadas interestratificaciones lenticulares semi-impermeables de flujos de ceniza volcánica o sedimentos limo-arcillosos donde se alojan acuíferos colgados, cuerpos vadosos que sirven de recarga al acuífero profundo. Estos depósitos no fueron diferenciados de la Toba Tala.

Los depósitos y suelos residuales representan la degradación y alteración in situ por meteorización de las rocas subyacentes.



Respecto a los depósitos fluviales, fueron diferenciados únicamente en los sistemas de drenaje mayor. Normalmente están representados por sedimentación continental de alta energía (gravas y bloques con menor proporción de arena), espacialmente acumulados sobre los cauces de ríos y arroyos principales, como el río Grande de Santiago y el arroyo El Ahogado.

Los depósitos lacustres tienen una representación geográfica muy restringida en el área. Han sido referidos principalmente a los importantes espesores acumulados en la fosa tectónica “El Ahogado”, al sureste de la cuenca de Toluquilla, depósitos pre-Tala que en esta depresión tectónica alcanzan espesores superiores a 150 m. Están representados por sedimentos continentales limo-arcillosos y arenas finas depositados en un ambiente predominante de baja energía. El estilo y orientación estructural que presenta la fosa tectónica, sugiere una evolución y relación tectónica con el desarrollo de la fosa tectónica Chapala.

Los depósitos lacustres, también se refieren a las delgadas acumulaciones ocurridas en aquellas depresiones topográficas naturales o artificiales, pequeñas presas o zonas lagunares, donde los procesos de sedimentación continental de baja energía han propiciado la acumulación de irregulares espesores de depósitos limo-arcillosos con proporciones menores de arena fina.

Los depósitos aluviales y fluvio-aluviales, representan la sedimentación continental más importante en el área. Son depósitos de grava y arena gruesa acumulados en forma de abanicos aluviales sobre los cauces de drenaje mayor.

Sin embargo en la cuenca Toluquilla, estos materiales localmente alcanzan espesores mayores, sobre todo en la fosa tectónica “El Ahogado”, depresión estructural donde se han intersectado espesores de hasta 176 m de sedimentos lacustres limo-arcillosos y arenas finas.

Estos materiales de arrastre continental son de composición predominantemente pumicítica, de granulometría variable y comúnmente presentan estratificación cruzada.

#### **4.2. Geología estructural**

El análisis de evidencias e interpretaciones geomorfológicas, geológicas y geofísicas, y la elaboración de 4 secciones geológico – estructurales en la cuenca de Toluquilla, permitieron establecer un modelo estructural, cuyos rasgos más sobresalientes son:

Un sistema de fallas normales de orientación Este–Oeste que configuran y delimitan a la Fosa Tectónica “El Ahogado” (FTA), es muy evidente en el extremo sureste de la cuenca de Toluquilla, sistema que se ha interpretado anterior al desarrollo del CVLP (Complejo Volcánico de La Primavera). Son dislocaciones pre-caldera posiblemente relacionadas con el desarrollo y evolución de la FTCH (Fosa Tectónica de Chapala).

En la cuenca de Toluquilla los contornos estructurales que afectaron a las unidades pre-Tala, ocurren regularmente a elevaciones entre 1470 y 1570 msnm; excepto en la margen este del CVLP, sector Oriente y Sur del domo riolítico El Tajo, donde la elevación de la base de la Toba Tala varía de 1410 a 1520 msnm, movimientos estructurales sin y post-caldera que son el resultado de su desarrollo. De igual manera, dichos contornos estructurales presentan cambios importantes dentro y adyacentes a la FTA, elevaciones que varían entre 1350 y 1470 msnm, mostrando una tendencia marcadamente Este-Oeste. Rasgos estructurales más antiguos (pre-caldera), donde las delgadas acumulaciones de la Toba Tala, sobreyacen a una secuencia más antigua de sedimentos lacustres limo-arcillosos y arena fina, con espesor superior a 150 m, sedimentos que localmente están intercalados o cubiertos por flujos de basalto.

#### **4.3. Geología del subsuelo**

De acuerdo con la información geológica, geofísica y los cortes litológicos de pozos, es posible establecer que el acuífero se constituyó, en su porción superior por sedimentos aluviales y vulcanoclásticos, y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas de distintas composiciones: basaltos, andesitas y riolitas. Su espesor conjunto es del orden de los 400 m en el centro del valle y disminuye hacia los flancos de las sierras que lo delimitan.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, cuando desaparece su fracturamiento, especialmente por las riolitas.

### **5. HIDROGEOLOGÍA**

#### **5.1. Tipo de acuífero**

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la intercalación de lentes de sedimentos arcillosos. Está constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y vulcanoclásticos (Toba Tala), en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas fracturadas; que en conjunto presentan un espesor de 400 m.

Se desconoce la interconexión hidráulica que pudieran presentar las diferentes unidades hidroestratigráficas que subyacen a la Toba Tala y que conforman el medio fracturado a profundidad; sin embargo, la unidad hidrogeológica basal representada por el Grupo Río Santiago, presenta una porosidad y conductividad hidráulica muy baja, asociada a zonas de fracturamiento y/o alteración que forman acuíferos semiconfinados de baja potencialidad hídrica, acuíferos que normalmente aportan caudales inferiores a 15 lps, condición mecánica e hidráulica negativa que se acentúa con la profundidad, debido al decremento progresivo de la porosidad secundaria (fracturas y/o alteración), sobre todo en aquellas localidades con ubicación geográfica desfavorable respecto a las áreas de recarga regional.

## 5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades realizadas en el estudio de 2003 y para la obtención de los parámetros hidráulicos del acuífero, se practicaron 53 pruebas de bombeo y aforo entre las que se incluyeron determinaciones a caudal constante midiendo abatimiento-tiempo y en aquellos aprovechamientos con equipos de bombeo instalados con revoluciones variables, o bien en la etapa final de construcción o rehabilitación (aforos), se midió gasto-abatimiento y recuperación-tiempo.

De los resultados de la interpretación, se concluye que los valores de transmisividad varían de  **$2.26 \times 10^{-6}$  a  $2.23 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$** .

Las lavas máficas cubiertas por derrames de riolacita expuestas al sur de la cuenca de Toluquilla y los conos cineríticos y rocas máficas afines de la CVSG, no han sido diferenciadas en los cortes litológicos analizados; sin embargo, por las observaciones de campo y ubicación geográfica, es muy probable que estas unidades litológicas se presenten en la mayoría de los pozos construidos en estas áreas. Para estas unidades litológicas se estimaron rangos de porosidad y conductividad hidráulica del orden de 30 a 50% y  $10^{-2}$  a  $10^{-5} \text{ m/s}$  respectivamente, valores relacionados a las propiedades físicas del medio, mismo que constituye acuíferos semiconfinados de moderada potencialidad. Los pozos perforados en estas unidades, a pesar de su profundidad (120 a 300 m) y niveles estáticos someros de 6 a 60 m, proporcionan caudales modestos inferiores a 16 lps, posiblemente influenciado por condiciones confinantes del acuífero y/o por su ubicación geográfica estratégica respecto a las zonas de recarga regional. Pruebas de bombeo practicadas a tres pozos emplazados en estas unidades hidroestratigráficas, reportaron valores de transmisividad de  **$1.79 \times 10^{-2}$ ,  $3.45 \times 10^{-3}$  y  $8.16 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** .

## 5.3. Piezometría

Con respecto a la información piezométrica, se dispone de información sobre configuraciones de la profundidad al nivel estático para los años 1996 y 2003.

## 5.4. Comportamiento hidráulico

Para la descripción del comportamiento hidráulico, únicamente se considera la piezometría del 2003.

### 5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático en 2003 (figura 3) muestra curvas con valores que varían de 5 a 150 m. Los más someros se registran en el centro del valle, desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero. Los valores más profundos se presentan al noroeste del acuífero que corresponde con la porción suroccidental de la zona metropolitana de la ciudad de Guadalajara, donde se localizan los pozos del Organismo Operador de agua potable, Sistema

Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). Los pozos que alcanzan profundidades constructivas de 20 a 380 m y caudales de 5 a 57 lps.

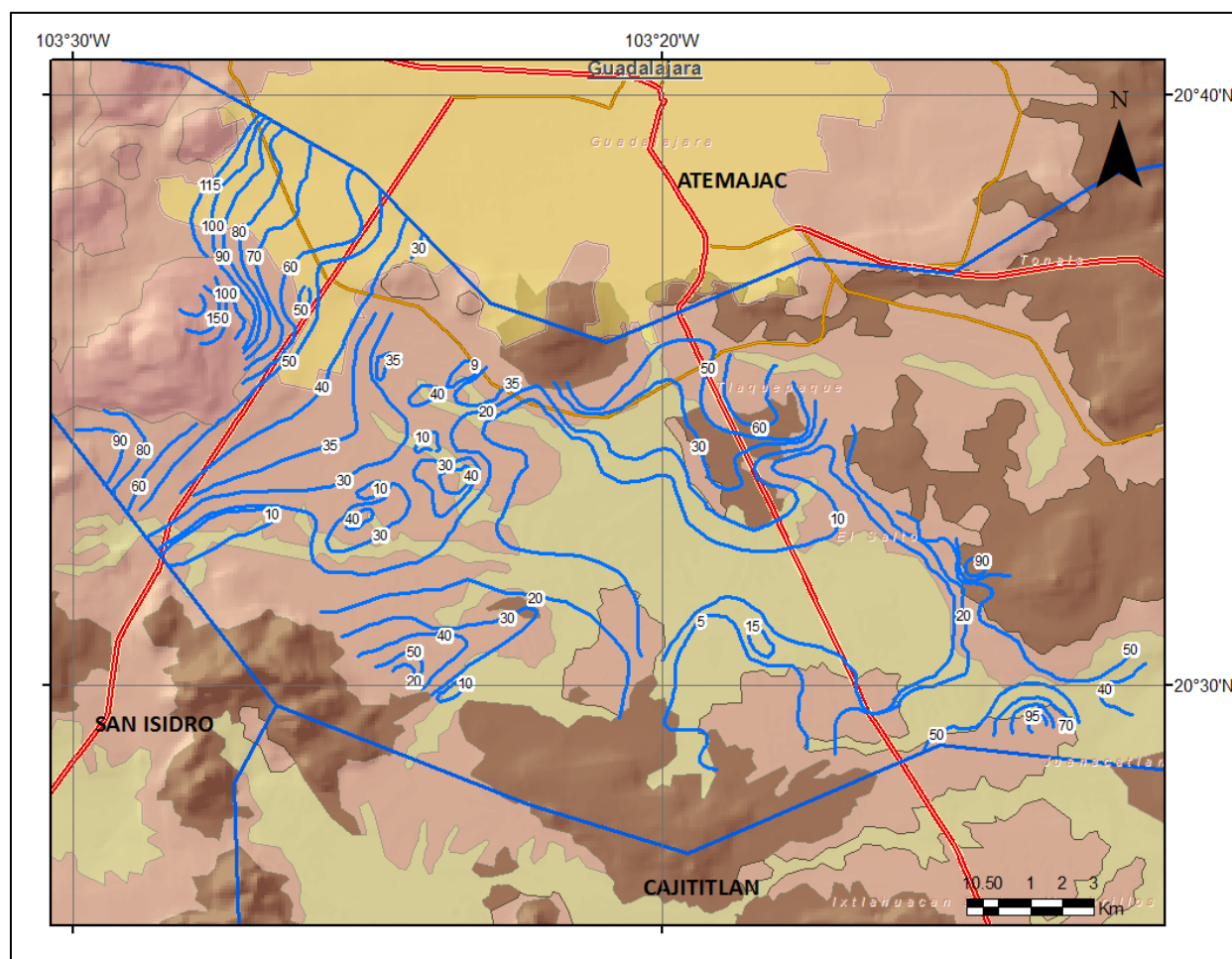


Figura 3. Profundidad al nivel estático (m), 2003

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de la elevación de los niveles del agua subterránea para el año 2003 (figura 4) muestra valores que varían, al igual que los de profundidad, por efecto de la topografía, de 1590 a 1515 msnm. Son evidentes pequeños conos de abatimiento aislados en diferentes zonas del acuífero, identificados por las cotas 1495, 1480 1500 y 1510 msnm. La dirección preferencial del flujo subterráneo es noroeste-sureste, desde el Complejo Volcánico La Primavera hacia el este y sur (Potrero San Juan, Rancho Villa Hermosa), con tendencia natural hacia el acuífero vecino Cajititlán, con alimentaciones laterales provenientes de los flancos norte y sur.

Los valores más altos, de 1590 msnm, se localizan al pie de la caldera La Primavera y disminuyen hacia el río Santiago, hasta 1500 msnm. No obstante, es de notar un gradiente hidráulico de 0.008, alrededor del poblado de Santa Anita, mucho mayor que 0.0017 de la parte central – oriental de valle; probablemente debido a la densidad de pozos en los alrededores del citado poblado.

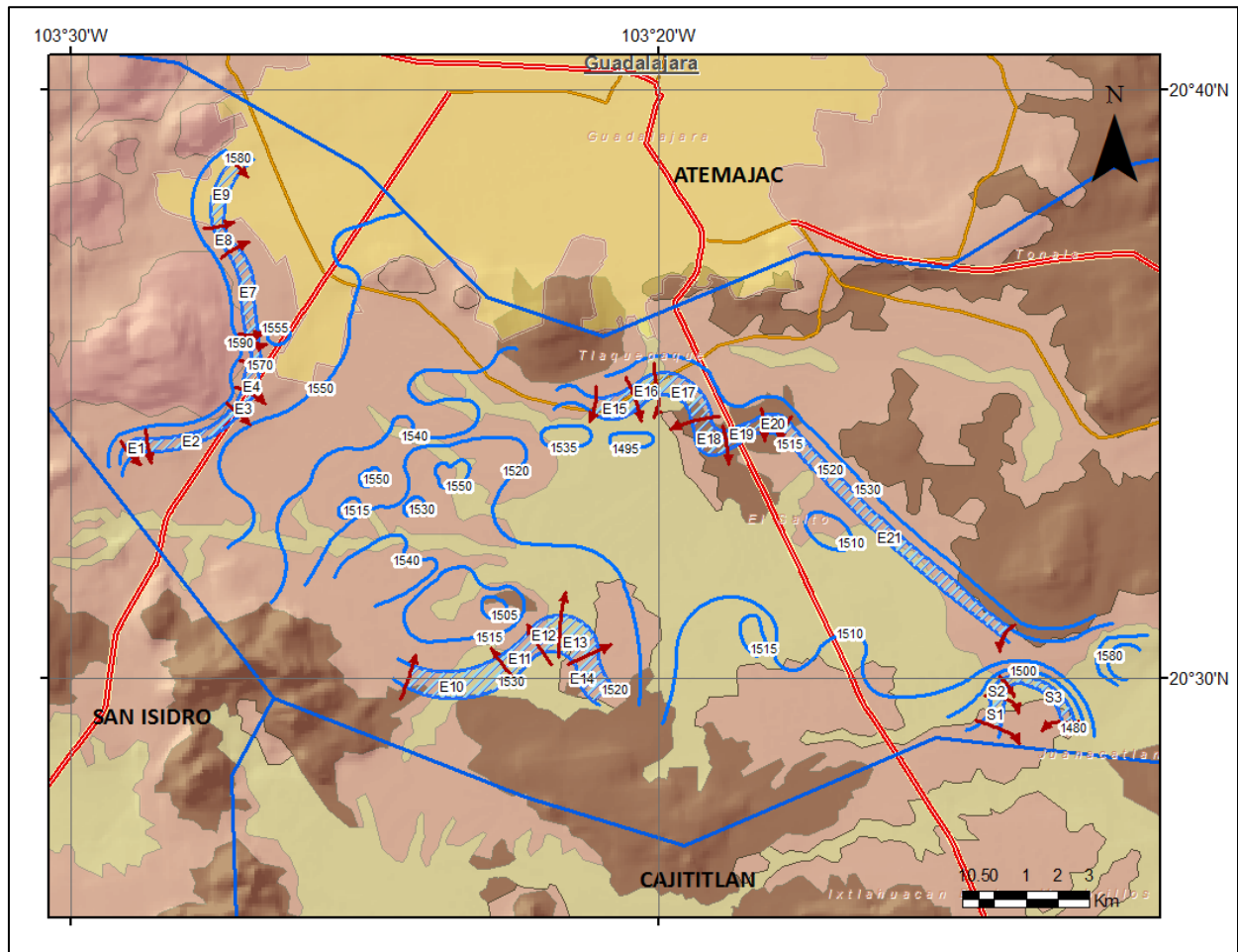


Figura 4. Elevación del nivel estático (msnm), 2003

#### 5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 1996-2003, muestra pequeños conos de abatimiento en la cota 1495 msnm cerca del arroyo El Ahogado. La explotación intensiva del acuífero ha modificado la configuración original de los niveles estáticos, invirtiendo localmente la dirección de flujo subterráneo, originalmente de oeste a este, y generando conos de abatimiento al interior de la cuenca (figura 5).

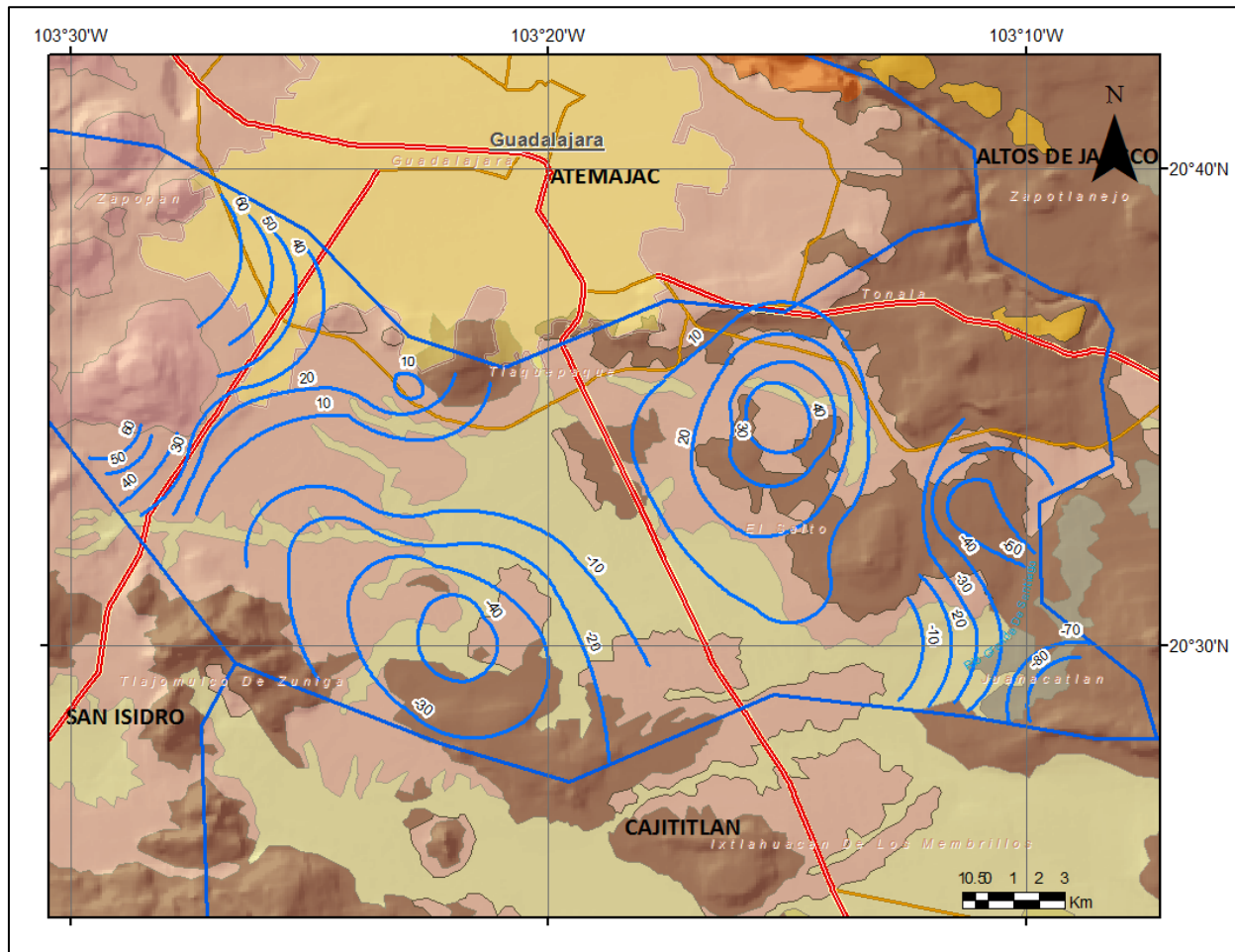


Figura 5. Evolución del nivel estático (m), 1996-2003

### 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos del estudio realizado en 2003, se tomaron 19 muestras de agua subterránea para su análisis físicoquímico respectivo. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total y sólidos totales disueltos así como los isotopos de oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ) y - deuterio ( $^2\text{H}$ ).

De acuerdo con los resultados de los análisis físicoquímicos, se puede observar que la concentración de Sólidos Totales Disueltos de manera general varía de 150 a 500 ppm, inferior a las 1000 ppm que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano. De manera general, las concentraciones se incrementan desde el occidente y desde las estribaciones de las sierras ubicadas al norte y sur, hacia el centro del acuífero, corroborando la dirección preferencial del flujo subterránea. En pozos profundos localizados en el centro del valle se registraron concentraciones superiores a las 500 ppm debido probablemente a que los aprovechamientos están alojados en zonas de fracturamiento profundo, ligadas a manifestaciones geotermales, condición que acelera la disolución iónica en el sistema.

La concentración de STD en los aprovechamientos, arrojo los siguientes promedios: 256 ppm en pozos, 297 ppm en manantiales y 390 ppm en norias, resultados que se consideran de buena calidad. Algunas fuentes de abastecimiento alcanzaron máximos hasta de 2320 ppm (pozo), 802 ppm (noria) y 480 ppm (manantial).

Los valores promedio en alcalinidad en la cuenca se ubican dentro de límites permisibles, a excepción de los pozos que opera el SIAPA en el valle los cuales reportan valores entre 800 y 1400 mg/l, debido muy posiblemente a la profundidad de extracción (> 200 m), medio que presenta mayor ionización de elementos con características alcalinas.

En el valle de Toluquilla las aguas subterráneas que sobreyacen al medio fracturado se clasifican como bicarbonatada-sódica ( $\text{NaHCO}_3$ ). En los pozos con profundidades mayores a 200 m, emplazados en el medio fracturado y ubicados en la parte central de la cuenca, se presentan elevadas concentraciones de iones de Ca y Mg, elementos que incrementan notablemente la dureza del agua. Hacia el sur de la cuenca y con tendencia suroeste, se caracterizó una familia de agua como bicarbonatada-magnésico-sódica ( $\text{MgNaHCO}_3$ ), caracterización que se interpreta influenciada por procesos endógenos vulcanogénicos y/o geotermiales.

El acuífero recibe recarga procedente de la precipitación de agua meteórica local, las cuales se reflejan en desviaciones promedio de -9.0 en oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ) y -67.5 en deuterio ( $^2\text{H}$ ). Los pozos que extraen el agua a mayor profundidad muestran concentraciones isotópicas más pobres, debido a que su recarga procede de las partes altas de la cuenca, a partir de donde se genera el decaimiento de las concentración.

Los resultados obtenidos sugieren que los aprovechamientos, por su construcción, contienen agua mixta (mayor y menor a 40 años de edad), debido a que la mayoría están emplazados en dos o más unidades hidroestratigráficas.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2003, se registró la existencia un total de 1,226 aprovechamientos de aguas subterráneas de los cuales 728 son pozos y los 498 restantes norias. Es importante señalar que al presente censo se debe agregar un mínimo de 6% de obras irregulares y algunos otros aprovechamientos regularizados a los cuales no se permitió el acceso. De acuerdo con su uso el 66.5% se destina al uso agrícola, 14.2% a público-urbano, el 8.6% para uso industrial, 7.7 %, para uso doméstico-abrevadero y el 3% restante para servicios

El volumen de extracción estimado asciende a **59.8  $\text{hm}^3/\text{año}$** , de los cuales 39.4 (65.9%) se destinan al uso agrícola, 12.8  $\text{hm}^3$  (21.4%) para uso público-urbano, 5.3 (8.9%) para uso industrial, 0.7 (1.2%) para uso doméstico-abrevadero, 1.1 (1.8%) para uso de servicios y los 0.5  $\text{hm}^3$  restantes (0.8%), para usos múltiples.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1996-2003, en una superficie de 212 km<sup>2</sup> del valle, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

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

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

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 del acuífero:

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

### 7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). No existe información confiable para estimar la recarga producto de las fugas del sistema de agua potable y alcantarillado de la Zona Metropolitana de Guadalajara, de tal manera que el valor de estas componentes estará considerado de forma implícita en la recarga vertical.

#### 7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Dónde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal



Rr: Retornos por riego  
 B: Bombeo  
 Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal  
 Dm: Salida a través de manantiales  
 $\Delta V(S)$ : Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + Sh + D_m - \Delta V(S) - E_h - R_r$$

### 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 se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación 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 para el año 2008 (figura 4). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de ( $\Delta h$ ). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Dónde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

i = Gradiente hidráulico ( $\Delta h / \Delta L$ )  $\Delta h$  y  $\Delta L$  son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad  $T = K \cdot a$ , la ecuación queda reducida a:

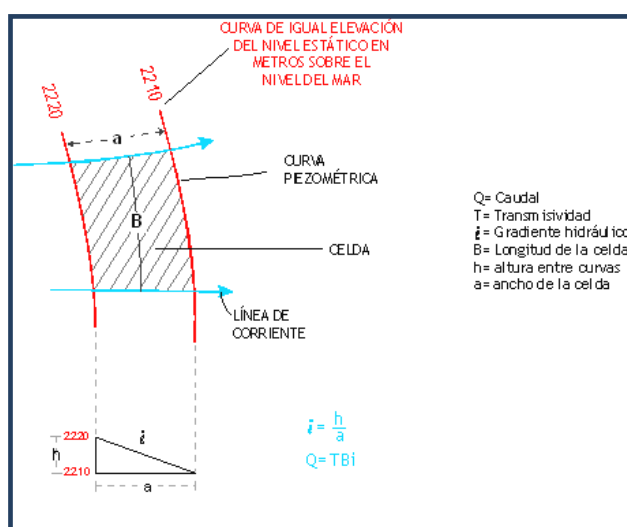
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Dónde:

T = Transmisividad en  $m^2/s$ .

B= Longitud de la celda en m.

i = Gradiente Hidráulico, en m.



El cálculo de la entradas subterráneas para el año 2003 se presenta en la tabla 2, en la que en la se observa que su valor total redondeado a un decimal es de **30.7 hm<sup>3</sup> anuales**.

Tabla 2. Calculo de entradas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
			(m)		( m <sup>2</sup> /s)		
E1	700	450	10	0.0222	0.001	0.0156	0.49
E2	2910	380	10	0.0263	0.001	0.0766	2.42
E3	700	370	10	0.0270	0.001	0.0189	0.60
E4	930	420	10	0.0238	0.001	0.0221	0.70
E5	490	270	10	0.0370	0.001	0.0181	0.57
E6	370	290	10	0.0345	0.001	0.0128	0.40
E7	2720	370	10	0.0270	0.001	0.0735	2.32
E8	860	300	10	0.0333	0.001	0.0287	0.91
E9	2060	440	10	0.0227	0.001	0.0468	1.48
E10	3000	860	10	0.0116	0.003	0.1047	3.31
E11	1210	680	10	0.0147	0.003	0.0534	1.69
E12	790	1000	10	0.0100	0.003	0.0237	0.75
E13	1100	1080	10	0.0093	0.001	0.0102	0.32
E14	1250	780	10	0.0128	0.003	0.0481	1.52
E15	1180	760	5	0.0066	0.001	0.0078	0.25
E16	780	620	5	0.0081	0.001	0.0063	0.20
E17	1900	620	5	0.0081	0.001	0.0153	0.48
E18	1060	750	5	0.0067	0.003	0.0212	0.67
E19	1250	420	5	0.0119	0.003	0.0446	1.41
E20	620	580	5	0.0086	0.003	0.0160	0.51
E21	9200	450	5	0.0111	0.003	0.3067	9.69
<b>Total entradas</b>							<b>30.68</b>

### 7.1.3. Retornos por riego (Rr)

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 las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. A 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 irrigación.

Para este caso, se consideró que un 25 % de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando una profundidad media al nivel del agua subterránea de 30 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de mediana permeabilidad en el subsuelo.

De esta manera, si el volumen de extracción para uso agrícola es de 39.4 hm<sup>3</sup> anuales, la recarga inducida es:

$$Rr = 39.4 * 0.25 = 9.8 \text{ hm}^3$$

$$Rr = 9.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 7.2. Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas (Sh), y por descarga a través de manantiales (Dm).

### 7.2.1. Salida a través de manantiales (Dm)

Para la estimación del caudal que descargan los manantiales de la zona, se cuenta con la información de los aforos mostrados en la tabla 3. El valor total de los 5 manantiales es de 77 lps que equivalen a **2.4 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 3. Datos de aforo de los principales manantiales en la cuenca de Toluquilla

MANANTIAL	GASTO (lps)	ESCURRIMIENTO /ANUAL ( miles m <sup>3</sup> )
Ojo de Agua de Ramírez	1	31.536
San Juanete	4	126.144
La Concha y varios	10	315.36
Toluquilla	61	1923.696
SUMAS	77	2428.272

### 7.2.2. Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a de **59.8 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático presentada en la figura 4. Las descargas se presentan al sureste del área, hacia el acuífero vecino Cajititlán. El valor estimado redondeado a un decimal es de **3.9 hm<sup>3</sup>/año**, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Calculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
			(m)		( m <sup>2</sup> /s)		
S1	900	410	10	0.0244	0.001	0.0220	0.69
S2	520	380	10	0.0263	0.001	0.0137	0.43
S3	2430	280	10	0.0357	0.001	0.0868	2.74
<b>Total salidas</b>							<b>3.87</b>

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución anual del nivel estático 1996–2003, mostrada en la figura 5. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y$  de 0.25 (GEOEX,1996) se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Dónde:

**$\Delta VS$ :** Cambio de almacenamiento en el periodo analizado

**$S_y$ :** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

**$A$ :** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>)

**$h$ :** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El resultado arroja un valor de abatimiento promedio de 0.32 m/año, que para una superficie de balance de 212 km<sup>2</sup>, arroja un cambio de almacenamiento de -17.0 hm<sup>3</sup> anuales.

$$\Delta VS = 0.25 (212 \text{ km}^2) (- 0.32 \text{ m}) = 17.0$$

$$\Delta VS = - 17.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

### Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical ( $R_v$ ). De la ecuación (2), se tiene que:

$$R_v = B + Sh + Dm - \Delta V(S) - Eh - R_r$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 59.8 + 3.9 + 2.4 - 17.0 - 30.7 - 9.8$$

$$R_v = 8.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, las entradas horizontales subterráneas y los retornos de riego

$$R_t = R_v + Eh + R_r$$

$$R_v = 8.6 + 30.7 + 9.8$$

$$R_v = 49.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para

calcular 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 siguiente expresión:

$$\text{DAS} = \text{Rt} - \text{DNCOM} - \text{VCAS}$$

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica

Rt = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

### 8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual (Rt) corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este acuífero su valor es de **49.1 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 39.3 hm<sup>3</sup> corresponden a la recarga natural y los 9.8 hm<sup>3</sup> restantes a la recarga inducida por los excedentes del riego agrícola.

### 8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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

Para el caso del acuífero Toluquilla su valor es de **2.4 hm<sup>3</sup> anuales**, que corresponden a la descarga de los manantiales. No se considera comprometida la salida subterránea porque aunque la zona en donde fue posible evaluarlas se localiza a aproximadamente 1 km con respecto del límite con el acuífero Cajititlán, existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento, con derechos vigentes, en el acuífero Toluquilla.

### 8.3. Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua hasta el **31 marzo de 2010** es de **118.584733 hm<sup>3</sup>/año**.

### 8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DAS)

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, de acuerdo con la expresión definida, se obtiene de restar al volumen

de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

$$\begin{aligned} \mathbf{DAS} &= \mathbf{Rt - DNCOM- VCAS} \\ \mathbf{DAS} &= 49.1 - 2.4 - 118.584733 \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{- 71.884733} \end{aligned}$$

El resultado actual indica que no existe disponibilidad de agua subterránea para otorgar nuevas concesiones. Por el contrario el déficit es de **71.884733 hm<sup>3</sup> anuales** que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero. Sin embargo es necesario considerar que el volumen de extracción estimado es muy inferior al que tiene registrado el REPDA, por lo que el déficit real es menor.

## 9. BIBLIOGRAFIA

Asociación de Industriales de El Salto, El Salto, Jalisco. 1988. Estudio geohidrológico en el valle de El Salto, Jalisco, realizado por la compañía Geo Ingeniería Alfven, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas. 1989. Estudio Geohidrológico en la zona de Tesistán –Atemajac, Estado de Jalisco, realizado por la Compañía Ariel Consultores, S. A. de C. V., bajo contrato SGA-89-47.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Coordinación de Tecnología de Sistemas Hidráulicos y Subcoordinación de Hidrología y Aprovechamientos Hidráulicos. 1993. Estudio hidrogeoquímico e isotópico de la zona de Toluquilla – Ocotlán - La Barca en el Estado de Jalisco.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1973. Geohidrología de los Valles de Atemajac, Tesistán, Ameca, Ahualulco y San Marcos, Jalisco, realizado por la Compañía Ariel Construcciones, S.A. de C.V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Actualización del Estudio Geohidrológico Tesistán – Atemajac - Ocotlán, Estado de Jalisco, realizado por la Compañía Geocalli, S.A. de C.V.

Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA), 1993-1994. Estudio de Evaluación de Pérdidas en el Sistema de Distribución de Agua Potable de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Realizado por la empresa Planeación, Sistemas y Control, S.A. de C.V.

Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA), Departamento de Hidrología, 1995. Estudio Hidrogeoquímico de los Pozos del Sistema Toluquilla

Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). 1996. Actualización del Estudio Geohidrológico de la Zona Conurbada de Guadalajara, Jalisco, realizado por la compañía Geoex, S. A. de C. V.

Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado. 2003. Estudio de Actualización Geohidrológica Integral de las cuencas Atemajac y Toluquilla, realizado para el SIAPA en 2003 por la empresa Geoex, S.A. de C.V