

APLICACIÓN DE UN MODELO HIDROGEOQUÍMICO EN EL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO

SUSANA GUTIÉRREZ ÁNGELES
BRAULIO FRANCISCO SILVA DE LA ROSA

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
GERENCIA REGIONAL DE AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO
GERENCIA TÉCNICA

GENERALIDADES

El estado de Hidalgo se encuentra ubicado en la porción central del país, limita al norte con los estados de Veracruz y San Luis Potosí; al sur con el estado de México, al este con el estado de Puebla, al oeste con el estado de Querétaro, y al sureste con el estado de Tlaxcala. Hidalgo se encuentra conformado por 84 municipios siendo Pachuca la capital del mismo.

La zona del Mezquital se localiza en la parte sur-occidental del estado de Hidalgo y se extiende en una cuenca que colinda al sur con el Valle de México. Cuenta con una superficie aproximada de 2,365 km² la cual queda comprendida entre los paralelos 19°53'15" y 20°27'12" de latitud norte y entre los meridianos 98°52'20" y 99°27'54" de longitud oeste, limita al norte con el Valle de Ixmiquilpan, el poblado del mismo nombre y los cerros Huadrí, El Ventorrillo, Pozuelos, El Águila y Monte Noble; al este por el Valle y la Sierra de Actopan, al sur por los cerros Xicuco y el Gorrión y por los poblados Tlaxcoapan, Tetepango y Ajacuba; por el oeste por la sierra de Xothé.

Los municipios que abarcan la zona de estudio son Actopam, Ajacuba, El Arenal, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Chilcuautla, Fco. I. Madero, Mixquiahuala, Progreso de Obregón, San Salvador, Santiago de Anaya, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende (**Fig No. 1**).

Dentro del Valle del Mezquital se presenta un clima de semiseco a templado (con lluvias en verano las cuales escasean a lo largo de otoño; la temperatura media anual prevaleciente es del orden de 17 a 20° C, siendo los meses más calurosos abril y mayo.

La precipitación media anual varía de 450 a 500 mm en la porción norte, que comprende a los municipios de Mixquiahuala y Actopan, y en la porción sur de 500 mm; la temporada de lluvias abarca los meses de mayo a septiembre.

La principal actividad de la población económicamente activa son la industria y la agricultura. La primera se desarrolla principalmente en Tula, donde se ubican industrias de transformación, extractivas, de construcción y maquiladoras.

En lo que respecta a la agricultura en gran parte de la zona del Mezquital se siembra maíz, alfalfa, cebada, frijol, chile, calabaza y avena; como cultivos secundarios son: el tomate de cáscara, trigo, jitomate, avena etc.

Para la agricultura se utilizan aguas negras procedentes de la Ciudad de México y agua subterránea; el volumen utilizado para dicha actividad es de aproximadamente 1,577,920 Mm³/año para regar una superficie de 45,214.52 hectáreas

OBJETIVOS

Los objetivos que se plantearon durante la realización de este trabajo son:

- a) Determinar la variación de la composición química del agua subterránea, así como de las aguas residuales que se utilizan para el riego en el Valle del Mezquital
- b) Por medio del modelo geoquímico PHREEQE (Parkhurst L. David et. al 1990) determinar las concentraciones de especies acuosas y fases minerales que pueden formarse en el acuífero, así como en las aguas residuales.
- c) Determinar si la temperatura influye en el incremento de las concentraciones de los contaminantes o de las fases minerales.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El Valle del Mezquital representa una de las zonas de mayor importancia de la región, dado que en ella se ubica el principal centro de desarrollo agrícola e industrial. Este para su proyección y desarrollo, requiere del conocimiento de sus reservas de aguas subterráneas y de la disponibilidad de agua superficial.

Dentro de este valle se ubica el Distrito de Riego 03 del Río Tula el cual ha estado recibiendo desde principios de siglo aguas negras procedentes de la Ciudad de México, con las cuales se han irrigado grandes extensiones de tierra cultivable.

Esto ha traído efectos benéficos a la región como son:

1. Incorporación de vastas extensiones de terrenos improductivos.
2. Incremento en la fertilidad del suelo con lo cual se tiene mayor rendimiento, gracias al alto contenido de materia orgánica y elementos nutritivos que se han incorporado al suelo.
3. Infiltraciones como fuentes de recarga para los acuíferos del valle.

GEOLOGÍA

Fisiografía

El área de estudio se localiza entre la transición de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental; esta última abarca la porción norte y centro del estado, se caracteriza por presentar sierras altas ampliamente distribuidas con orientación NW-SE con una topografía muy abrupta, con elevaciones que varían de 600 a 2000 msnm.

La parte sur del estado se encuentra ubicada dentro del Eje Neovolcánico que constituye una faja volcánica con una gran variedad de rocas, compuestas principalmente por andesitas, riolitas, y material piroclástico; se caracteriza por presentar estructuras volcánicas con una topografía menos abrupta que las expuestas en la Sierra Madre Oriental.

Hidrografía

En la porción norte del estado el sistema de drenaje se encuentra representado por los ríos Amajac, Claro, y Atlapexco el cual tiene una desembocadura en el Río Pánuco y este, finalmente desemboca en el Golfo de México.

La red de drenaje en la zona sur está representada por los ríos Tepeji-Tula, San Juan del Río y Moctezuma, los cuales desembocan al Río Pánuco y este a su vez al Golfo de México.

Estratigrafía

En el área de estudio están expuestas unidades de roca de composición ígnea y sedimentaria que evidencian un tiempo geológico que abarca desde el Cretácico hasta el Reciente.

1. **Mesozoico (Sistema Cretácico).** Este periodo se encuentra representado por las siguientes formaciones:

Formación El Doctor.- Está constituida por rocas sedimentarias (calizas de color claro que forman estratos masivos), esta formación se encuentra ampliamente distribuida en la parte norte del área.

Formación Mexcala.- Son sedimentos marinos de grano variable con intercalaciones de limonitas, lutitas, calizas y areniscas; se encuentran afloramientos en las proximidades de Mixquiahuala.

Formación Soyatal.- Está constituida por calizas en capas gruesas y compactas con intercalaciones de arcilla y nódulos de pedernal, aflora en la parte N-NW de la zona de estudio.

2. **Cenozoico (Sistema Terciario).** Las formaciones que integran este sistema son:

Grupo El Morro.- Se encuentra constituido por rocas sedimentarias continentales que forman cuerpos de poco espesor y extensión reducida en localidades aisladas.

Grupo Pachuca.- Está formado por rocas ígneas extrusivas de composición andesítica, principalmente compuesta por arenas cementadas de grano grueso a mediano, andesitas y tobas; estas últimas presentan fracturamiento abundante de escasa profundidad, estos afloramientos se encuentran en la zona norte del Valle de Actopan.

Formación Tarango.- Está constituido por materiales clásticos de ceniza volcánica y derrames de lava, se encuentra dispersa en la mayor parte del área.

Material Aluvial.- Este material es de origen fluvial, aflora a lo largo de los ríos Actopan y Tula así como en las proximidades de Ixmiquilpan.

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

El Valle del Mezquital se encuentra dentro de la subcuenca del Río Tula, colinda al norte con la cuenca del Bajo Pánuco, al Sur con la Cuenca del Valle de México, al sureste con la Cuenca del Río Lerma al poniente con la Subcuenca del Río San Juan del Río.

Escurremientos

Existen tres corrientes principales de régimen perenne que cruzan a la zona con una dirección preponderante de sur a norte, los cuales están formados por los ríos Tula, Actopan-(Chicavasco) y Río Salado (**Fig No. 2**).

1. **El Río Tula.** Nace en la Sierra la Catedral bajo el nombre del Río San Jerónimo, al llegar a la presa Taximay cambia su dirección al N-NE y su nombre por el de Río Tepeji; aguas abajo lo intercepta la presa Requena para controlar sus descargas; en este punto cambia su nombre al de Río Tula; en las inmediaciones de la Cd. de Tula el río descarga sus aguas a la presa Endhó y toma una dirección N-NE hasta llegar a Mixquiahuala donde tiene un recorrido irregular.

2. **Río Actopan-(Chicavasco).** Se origina al norte de la Ciudad de Pachuca con una dirección SE hasta llegar a la Presa El Durazno, aguas abajo se une el arroyo Las Cajas y toma el nombre de arroyo Chicavasco. En las inmediaciones de la Ciudad de Actopan cambia su nombre por el de Río Actopan, posteriormente se une al canal Xotho hasta desembocar a la presa Deboché.
3. **Río Salado.** Se origina en el Cerro El Epazote con el nombre de arroyo Tenguedó, cerca de la población de Hueypoxtla toma este nombre hasta llegar a la confluencia con el túnel Tequixquiac, en donde cambia su nombre por el de Río Salado, recibe aportaciones de aguas negras del nuevo túnel Tequixquiac, parte de estas aguas se derivan hasta el Distrito de Riego 03.

Sistema de Canales

El Sistema de Canales en el Valle del Mezquital se inicia con la recepción de aguas negras provenientes de la Ciudad de México, en la porción sur del área de estudio se utilizan los interceptores Poniente, Central y Oriente así como el Gran Canal del desagüe y el Dren General del Valle de México. Posteriormente esta red es conectada mediante tajos y túneles a las principales corrientes superficiales (Río El Salto, Actopan, Tula y Salado) los cuales se distribuyen mediante 4 sistemas principales de riego; estos sistemas están gobernados por las presas almacenadoras y derivadoras existentes en la zona. Los sistemas de canales se observan en la **(Fig. No. 3)**

1. **Sistema del Río El Salto.** Parte de los volúmenes aportados a este sistema provienen del Emisor Central (que es alimentado por los interceptores Oriente y Central localizados al sur de la Laguna de Zumpango). El Río El Salto lleva ese nombre desde el Tajo de Nochistongo, el cual introduce aguas negras mediante el interceptor poniente, así como escurrimientos captados del Río Hondo, posteriormente el río vierte sus aguas al Río Tula aguas abajo de la presa Requena.
2. **Sistema Requena.** El agua de este sistema proviene del suroeste y oeste del área, está mezclado en ocasiones con los desechos del Río El Salto. La Presa Requena se utiliza para administrar el agua proveniente principalmente del Río Tepeji; el principal objetivo de este sistema es llevar agua para uso agrícola al Distrito de Riego 03. El canal principal Requena en su tramo inicial y final se encuentra revestido, la porción restante está construida en tierra.
3. **Sistema Endhó.** Recibe aguas directamente de los dos sistemas anteriores, así como de los ríos Tlautla y Rosas que descargan al Río Tula. El canal principal Endhó lleva sus aguas en una dirección SW-NE y mediante este sistema se derivan volúmenes al Distrito de Riego No. 100 (Alfajayucan) ubicado al norte de la presa Endhó mediante un canal lateral.
4. **Sistema del Río Salado.** Este sistema es alimentado por los túneles de Tequixquiac que conducen gran parte de las aguas negras provenientes de la Ciudad de México, las cuales son transportadas por el Gran Canal del Desagüe, además se descargan las aguas residuales del Dren General del Valle de México. Este sistema tiene dos canales principales de derivación que son el canal Juandhó y Dendhó, el primero de estos está construido en tierra y el segundo se encuentra parcialmente revestido desde el inicio hasta el poblado de Mixquiahuala; parte de esta agua sirve para generar energía eléctrica en la termoeléctrica Juandhó. Como parte del manejo de esta agua se encuentra el Río Chicavasco, los escurrimientos superficiales que se originan dentro de la cuenca hidrográfica son captados por el Río Chicavasco y conducidos fuera del área.

Calidad de Aguas Residuales

Con la finalidad de conocer la calidad de las aguas residuales se realizó un muestreo por parte de personal de la Comisión Nacional del Agua (CNA), la toma de muestras se efectuó en 23 sitios a lo largo de los canales que se utilizan para el transporte de las aguas residuales que se ocupan para riego, los sitios de muestreo se localizan en la **(Fig. No. 3)**.

Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua de 1989 publicado en el Diario Oficial; se utilizan para conocer las concentraciones máximas permisibles de algunos parámetros para uso agrícola. Sin embargo en estos criterios el único ion que se contempla de los analizados en este trabajo es el Cloro, el cual tiene un valor máximo permisible de 147 mg/l; sin embargo en 22 de los sitios de muestreo se encuentra valores superiores al permisible, estos fluctúan de 151 a 469.62 mg/l. Con lo que se puede ver que las aguas residuales presentan en algunos puntos más del triple de la concentración permitida para este uso.

Las concentraciones más altas de los iones restantes se localizan en el Dren Principal que se localiza entre el Sistema Endhó y el Requena; en la intercepción del Sistema Endhó y el Dren Principal, se origina un Dren llamado Boxtha, en esta zona se ubica el punto de muestreo D3, el cual presenta los valores más altos de bicarbonatos, cloro, magnesio y sodio;. Los resultados de los análisis físico-químicos de los sitios de muestreo se observan en la **(Tabla No. 1)**.

Con base en los datos de conductividad obtenido en los sitios de muestreo, se observa que este parámetro es superior a los 1000 micromhos/cm; por lo que las aguas residuales presentan un alto contenido en sales. Por lo tanto es necesario tener un control en cuanto al manejo de estas aguas, debido a la salinidad que presentan.

HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

Geohidrología

Debido a que el Valle del Mezquital está constituido por materiales geológicos diversos las características hidrogeológicas no son homogéneas, ya que dependen de las estructuras de las rocas, fallas existentes en la zona, permeabilidad y porosidad de los diferentes depósitos etc.

Las principales unidades hidrogeológicas detectadas son: Aluvión y Materiales clásticos, Derrames de lava del Terciario y Calizas del Cretácico Superior; los derrames de lava constituyen la unidad acuífera más importante y es la principal fuente de agua subterránea tiene un espesor variable; debido a que presenta una permeabilidad de media a alta por fracturamiento.

Piezometría

Según el censo realizado en 1992 en el área de estudio se tiene un total de 380 aprovechamientos de agua subterránea, 289 son pozos, 66 norias, 227 manantiales y 3 galerías. La profundidad total de las norias varía de 3 a 40 m en la zona de Tula; en Actopan las profundidades son similares ya que se tienen valores de 3 a 30 metros; en general las norias se ubican en las márgenes de los ríos Tula y Salado, así como en algunos arroyos tributarios.

La profundidad de los pozos varía de 50 a 450 m en la zona de Tula, mientras que en Actopan los pozos alcanzan una profundidad de 90 a 180 metros.

El agua subterránea se utiliza principalmente para uso industrial en un 32.5%, para uso agrícola en un 25% y para uso doméstico se ocupa el 16.94 %.

Profundidad del Nivel Estático y Dirección del Flujo Subterráneo

En la zona de Tula-Apasco entre el poblado de Atotonilco y el de Atitalaquia se presentan las profundidades más someras las cuales varían de 12 a 18 metros, al oriente del estrechamiento Apasco-Atotonilco la profundidad del nivel alcanza los 90 metros.

En los alrededores de la presa Requena, la profundidad varía de 20 a 40 m en Tepeji del Río y la presa Endhó respectivamente; en la porción de Mixquiahuala y Progreso de Obregón la profundidad del nivel estático es de 60 metros, en la parte sur del Valle de Actopan la profundidad del nivel estático varía de 10 a 70 m en la zona de San Salvador y en los alrededores del Arenal respectivamente, en San Salvador se encuentran pozos brotantes.

La dirección preferencial del flujo subterráneo en la zona de la presa Requena y Endhó es de SE-NW esta dirección se obtuvo con base en planos de elevación del nivel estático de los años 1982 y 1994.

Recarga y Descarga del Sistema Acuífero

La recarga en el acuífero se produce por la precipitación que se origina en las partes altas del Valle del Mezquital, ya que en dichas zonas se encuentran rocas fracturadas que permiten la infiltración; entradas horizontales de zonas circundantes; otra forma de recarga es la inducida, esta se produce principalmente por infiltración de los excedentes del agua de riego en el Distrito de Riego 03, también se tiene recarga por infiltración de los escurrimientos superficiales de los ríos Tula y Salado en la porción sur, y por el arroyo Chicvasco y Río Actopan en la porción noreste; otra contribución del volumen de recarga al acuífero es la infiltración de cuerpos de agua como son: presas y lagunas.

La descarga se presenta en forma de salidas horizontales hacia áreas vecinas, evaporación en zonas donde el nivel estático es somero y manantiales (el más importante es el del Cerro Colorado), así como la extracción por bombeo que se presenta en las zonas sur y norte principalmente.

HIDROGEOQUÍMICA.

Por medio de la Hidrogeoquímica se puede conocer de manera cuantitativa el funcionamiento de los acuíferos y permite conocer la calidad de los mismos. La composición química del agua está relacionada con el funcionamiento general del acuífero, ya que la concentración de los elementos depende del tipo de material que atraviesa, la porosidad y permeabilidad del mismo, tiempo de residencia y longitud de recorrido. El comportamiento hidrogeoquímico de los acuíferos se puede alterar cuando la recarga presenta compuestos orgánicos, desechos industriales, sales minerales etc.

En la zona de estudio se llevó a cabo un muestreo de manera conjunta por parte del personal de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y el British Geological Survey (BGS) en 36 sitios (**Fig. No. 4**), para dicha actividad se realizó la toma de 2 muestras de agua en cada aprovechamiento; los sitios muestreados incluyen pozos, norias y manantiales. En campo se determinaron algunos parámetros como son: conductividad eléctrica, temperatura, pH, Oxígeno disuelto y alcalinidad. En los análisis se determinaron parámetros químicos (iones principales y metales), así como parámetros bacteriológicos (coliformes totales y coliformes fecales). Estos análisis se efectuaron en laboratorios de la CNA y del BGS en Londres, Inglaterra.

En el presente trabajo se llevo a cabo la interpretación de los resultados de los 36 sitios muestreados en El Valle el Mezquital, de los cuales se extrae agua para uso público-urbano principalmente, por lo cual se realizaron comparaciones de los resultados obtenidos con la Norma

Nacional (NOM-127-SSA1-1994) en la cual se establecen los límites permisibles de calidad de agua para uso potable en México.

Se encontró que en 26 de los aprovechamientos analizados no se cumple con la norma establecida por lo menos en un parámetro químico. Sin embargo se detectó que en 7 pozos cercanos a la zona de Actopan y al suroeste de Mixquiahuala no cumplen con cuatro parámetros que son nitratos, sodio, STD y cloro o flúor, 5 pozos no cumplen con la norma del cloro y los dos restantes están fuera de norma con respecto al flúor. Entre Ajacuba y Tula se presentan seis pozos que no cumplen con tres parámetros, el parámetro común que se sobrepasa de la norma son los Sólidos Totales Disueltos (STD), y en la mayoría de los pozos se presentan problemas con nitratos. Con respecto al análisis de parámetros bacteriológicos se encontró que en 25 de los aprovechamientos se rebasa la Norma Nacional, la cual establece que el máximo permisible es de 2 NMP/100 ml, de Coliformes Totales; en los resultados se presentan valores que varían de 4 a 2490 NMP/100ml; en cuanto a Coliformes fecales se detectó que en 5 aprovechamientos se presentan coliformes fecales, con valores que fluctúan de 14 a 318 NMP/100 ml

Los resultados de los parámetros que presentan problemas se anexan en la **(Tabla No. 2)**.

Contaminación del Agua Subterránea

La mayoría de las aguas subterráneas son generalmente de excelente calidad en los referente a color, sin embargo pueden estar contaminadas bacteriológicamente; como resultado de la contaminación la composición puede deteriorarse hasta niveles preocupantes. La contaminación ocurre cuando algunas sustancias se infiltran hasta el acuífero, esto puede ser provocado por una descarga no controlada en la superficie y puede ocasionar problemas irreversibles en los acuíferos en cuanto a su calidad.

Debido a que en el Valle del Mezquital se utiliza agua residual para uso agrícola en 45,214 hectáreas con una lámina bruta media utilizada de 215 cm/año, esto provoca infiltración de los excedentes de agua para riego.

Las aguas residuales son tanto de tipo doméstico como industrial, por lo que se presentan desechos sólidos con altas concentraciones de organismos fecales, materia orgánica y compuestos de nitrógeno, así como la presencia de algunas sustancias tóxicas. Por lo que la infiltración de estas aguas residuales afectan no solo la calidad del suelo en cuanto a contenido de metales pesados, u otras sustancias tóxicas, sino que también pueden provocar la alteración de la calidad del acuífero.

Debido a la presencia del alto contenido de nitrógenos se infiere la infiltración de las aguas residuales hacia el acuífero, en la norma se establece como máximo permisible 10 mg/l sin embargo en algunos sitios se encontraron valores de 14, 17 y 19.3 mg/l.

FUNDAMENTOS DE LA MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Los modelos geoquímicos requieren como datos de entrada resultados de análisis fisico-químicos de agua y como datos de salida dan información de la distribución de las especies acuosas y el índice de saturación de las fases sólidas posibles, de acuerdo a la composición química de la solución. Estos modelos se basan en la termodinámica, por lo cual es importante conocer las características fisico-químicas del agua.

Los modelos pueden ser utilizados para 1) determinar los minerales que controlan la composición química del agua; 2) simulación de mezclas de aguas y los efectos que se puede tener en el acuífero; 3) conocer el índice de saturación específico de ciertos minerales o especies acuosas.

Para simplificar los cálculos de los estados de saturación se supone la existencia de iones complejos los cuales se describen por la expresión de acción de masa y se supone que los coeficientes de actividad de iones simples se describen por medio de ecuaciones que solo dependen de la temperatura y la fuerza iónica.

Características del Modelo Geoquímico PHREEQE

Phreeqe, escrito por David L. Parkhurst, Donald C. Thorstenson y L. Niel Plummer; es un modelo para reacciones geoquímicas basado en modelos acuosos de pares de iones o asociación de iones. Sus siglas significan

- a) Potencial Hidrógeno (pH)
- b) potencial electrón
- c) Concentración total de elementos
- d) Cantidades de minerales u otras fases transferidas dentro y fuera de la fase acuosa
- e) Distribución de especies acuosas
- f) Estado de saturación de la fase acuosa con respecto a fases minerales específicas.

Por medio de este modelo se pueden simular diferentes tipos de reacciones como son:

- 1) Adición de reactivos a una solución
- 2) Mezcla entre dos aguas
- 3) Titulación de una solución con otra

Para la resolución de ecuaciones no lineales se utiliza una combinación de una técnica modificada de Newton-Raphson y una aproximación continua de fracción para las ecuaciones de balance de masas.

Para la utilización del modelo se tuvo que realizar un balance iónico para conocer si los resultados de los análisis físico-químicos efectuados presentaban un error máximo del 10%, ya que el modelo puede presentar problemas si el error del balance es mayor. Dicho modelo se utilizó para conocer la variación de la composición química de las aguas residuales que sirven para uso agrícola así como del agua subterránea; también por medio de este se determinaron las concentraciones de las especies acuosas y fases minerales que pueden formarse en el acuífero; y simulando cambios de temperatura en el agua se determinó la influencia de la temperatura en los índices de saturación de las fases minerales.

El modelo se probó con los datos de los sitios de muestreo donde se encontraron valores muy altos, en cuanto a concentración de iones para aguas residuales y en los puntos de muestreo para agua subterránea donde se rebasa la norma para agua potable. Debido a que el valor de conductividad más elevado se localiza en el sitio marcado con el punto D3 los resultados de los análisis de este punto sirvieron para conocer las posibles especies acuosas que pueden formarse en las aguas superficiales y las posibles fases minerales.

En cuanto a los puntos de muestreo de aguas subterráneas se escogieron 4 pozos cercanos a la zona de Actopan, debido a que es el área en donde el volumen utilizado para uso agrícola es mayor; el nombre de los pozos escogidos y su número para el modelo son: Caxuxi (609), San Salvador (693), Pozo Grande (73) y Chicavasco (932).

Durante la modelación geoquímica se encontró que las especies acuosas que pueden formarse tanto en las aguas residuales como en el agua subterránea son las mismas, difieren únicamente en la concentración, ya que se presenta una mayor concentración en el agua subterránea que en las aguas residuales, las especies que pueden formarse son de tipo bicarbonatado (calcico-magnésicas) y especies sulfatadas (sódico-magnésicas), las concentraciones de estas especies son mayores en aguas subterráneas que en las aguas residuales de los canales.

Las posibles fases minerales que se pueden formar debido a la composición química del agua son: calcita, aragonita, dolomita, yeso y anhidrita, las tres primeras fases de acuerdo a su índice de saturación pueden precipitarse, mientras que el yeso y la anhidrita pueden disolverse.

Se realizó una variación de temperatura en cuanto a los aprovechamientos de agua subterránea, y se determinó que el incremento de temperatura produce que el índice de saturación de las fases minerales que pueden precipitarse se acerquen al equilibrio, o bien presenten la capacidad de disolverse, la temperatura empleada fue de 28 ° C para todos los pozos, esta medida se eligió, debido a que en algunos sitios se puede encontrar agua termal que presenta dicha temperatura. Si la temperatura se incrementara esto provocaría que las especies carbonatadas pudieran disolverse, lo que ocasionaría la corrosión en las tuberías.

Debido a que las fases minerales que pueden precipitarse son carbonatadas, se puede presentar problemas de incrustación de carbonato de calcio en la tubería lo que trae como consecuencia una disminución en el gasto en las tuberías de conducción.

RESULTADOS

- Se presentan problemas en cuanto al cumplimiento con la Norma Nacional para uso potable en 26 de los aprovechamientos muestreados.
- En el análisis de parámetros bacteriológicos se encontró que en 25 aprovechamientos se rebasa la Norma en cuanto a coliformes totales y en 5 aprovechamientos en coliformes fecales.
- Los resultados del balance iónico indican que en un análisis (pozo CFE788) se tiene un error superior al 10 %; el resultado del balance iónico de las muestras restantes es menor al 10 %, por lo cual los datos pueden ser utilizados en la modelación.
- En los resultados de los análisis químicos no se rebasa la norma en ninguno de los metales, por lo cual estos quedan retenidos en el suelo y no fueron contemplados en la presente modelación.
- Las especies acuosas que se pueden formar tanto en las aguas residuales como en las subterráneas son las mismas; solo que la concentración en el agua subterránea es mayor que en las aguas residuales de los canales. Este incremento en las concentraciones se debe a la recarga inducida principalmente. Las especies acuosas son de tipo bicarbonatado (cálcico-magnésico) y especies sulfatadas (sódico-magnésicas).
- Las fases minerales que pueden formarse son de tipo carbonatado (cálcico-magnésico) como es el caso de la calcita, aragonita y dolomita; estas fases debido a su índice de saturación pueden precipitarse y ocasionar incrustación de carbonato de calcio o magnesio y con ello reducir el gasto en las tuberías de conducción.
- En caso de presentarse un aumento en la temperatura del agua el índice de saturación de las fases minerales cambia, por lo que aquellas que pueden presentar problemas de precipitación pueden equilibrarse, o bien diluirse.

BIBLIOGRAFÍA

Custodio, E. Llamas, MR 1976 Hidrología Subterránea tomo i-II Edición Omega-España.

Tinajero, G.J.A. , 1985 Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea. Facultad de Ingeniería de la UNAM, México.

Parkhurst L. David et al 1990 Phreeq A. Computer Program Geochemical Calculations Geological Survey; Water-Resources Investigations Report.

Silva de la Rosa Braulio Francisco, Hidrogeoquímica del Valle del Mezquital Hidalgo 1996

Domínguez Mariani Eloisa, Geoquímica del agua salina del acuitardo lacustre y riesgo de contaminación al acuífero subyacente que abastece a la Ciudad de México.

Marín Luis. E., Prieto Santa Anna Elizabeth et. Al., Aplicación de la modelación geoquímica a la ingeniería hidráulica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo a la Gerencia de Aguas Subterráneas y a la Gerencia Técnica por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.