

COMISION NACIONAL DEL AGUA

**SUBDIRECCION GENERAL DE ADMINISTRACION DEL AGUA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRANEAS**

SUBGERENCIA DE EXPLORACION GEOHIDROLOGICA

**ESTUDIO DE CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DE SEIS
DE LOS PRINCIPALES ACUIFEROS DEL PAIS**

CONTRATO No. SGAA-93-20

(VALLE DE AGUASCALIENTES)

2058

INFORME FINAL

MARZO, 1994

EXYCO, S.A.

INDICE

	pag.
INTRODUCCION	1
1. GENERALIDADES	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivos	24
1.3 Localización y descripción del área de trabajo	26
2. METODO DE TRABAJO	28
2.1 Actividades de gabinete	28
2.1.1 Recopilación y análisis de la información	28
2.1.2 Programación del muestreo de agua subterránea	29
2.1.3 Análisis químicos de aguas subterráneas	30
2.1.4 Procesamiento de la información	30
2.2 Actividades de campo	32
2.2.1 Unificación de criterios para el muestreo de agua subterránea	32
2.2.2 Muestreo de agua subterránea	34
2.2.3 Determinación de parámetros de campo	35

3. HIDROGEOLOGIA	37
3.1 Unidades hidrogeológicas	37
3.2 Modelo de funcionamiento hidrogeológico conceptual	47
4. HIDROGEOQUIMICA	50
4.1 Parámetros físicos	50
4.2 Características de los iones analizados	52
4.3 Calidad del agua	59
4.4 Validación de análisis químicos	67
4.5 Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos	70
4.5.1 Introducción	70
4.5.2 Zonificación hidrogeoquímica	73
4.5.3 Evolución en la concentración de parámetros físico-químicos del agua	85
4.5.4 Descripción del modelo hidrogeoquímico	92
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
5.1 Conclusiones	102
5.2 Recomendaciones	109

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

INDICE DE PLANOS

- 1 Localización de muestreo de agua
- 2 Distribución y tipo de análisis químicos realizados
- 3 Obras que sobrepasan las normas permitidas para uso de agua potable
- 4 Diagramas de Stiff
- 5 Distribución de sólidos totales disueltos (STD)
- 6 Distribución de la C.E. (micromhos/cm)
- 7 Distribución del ion cloro (ppm)
- 8 Distribución del ion calcio (ppm)
- 9 Distribución del ion sulfato (ppm)
- 10 Distribución del ion flúor (ppm)
- 11 Distribución del ion temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- 12 Distribución del ion sodio (ppm)
- 13 Distribución del ion nitrato (ppm)
- 14 Distribución de la relación iónica $r\text{Mg}/r\text{Ca}$
- 15 Distribución del índice de cambio de bases (ICB)
- 16 Distribución del índice de saturación de calcita (ISc).

INDICE DE FIGURAS

- 1 Localización del área de estudio
- 2 Diagrama de Wilcox (A)
- 3 Diagrama de Wilcox (B)
- 4 Diagrama de Piper. Familia bicarbonatada cálcica-sódica
- 5 Diagrama de Piper. Familia bicarbonatada sódica
- 6 Diagrama de Piper. Dirección del agua subterránea
- 7 Relación iónica calcio-cloruros (1993)
- 8 Relación iónica magnesio-cloruros (1993)
- 9 Relación iónica sodio-cloruros (1993)
- 10 Relación iónica sulfatos-cloruros (1993)

INDICE DE TABLAS

4.1 Iones mayoritarios (EXYCO, S.A.,1993)

4.1a Límites mínimos detectados por los métodos de análisis empleados

4.2 Obras que sobrepasan las normas permitidas para uso de agua potable

4.3 Calidad del agua para riego

4.4 Comparación de parámetros estadísticos 1984-1993

INTRODUCCION

El conocimiento en la calidad química del agua subterránea de los acuíferos del país para diferentes épocas, se ha obtenido mediante análisis físico-químicos practicados a muestras de agua tomadas de estos acuíferos; sin embargo es importante mencionar que las determinaciones se han efectuado empleando rutinas muy diferentes, por lo que los resultados en muchas ocasiones no pueden ser comparados de forma absoluta, careciéndose de una correcta caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea. Por lo anterior la Comisión Nacional del Agua (CNA) ha establecido rutinas uniformes tanto para el muestreo de agua como para los análisis de laboratorio, para de esta manera tener una base sólida en las interpretaciones.

La problemática antes descrita se ha visto reflejada de diferentes formas en los principales acuíferos de nuestro país, por lo cual la CNA, ha decidido definir estrategias para el estudio hidrogeoquímico de algunos valles, iniciando éstas con los estudios de los siguientes acuíferos: acuífero de la ciudad de Aguascalientes, en el estado del mismo nombre; acuífero de Cuernavaca, en el estado de Morelos; acuífero de Irapuato-Salamanca, en el estado de Guanajuato; acuífero de la ciudad de Puebla, en el estado del mismo nombre; acuífero de la ciudad de San Luis Potosí, ubicado en el estado de San Luis Potosí; y el acuífero

de Toluca, en el Estado de México.

Para llevar a cabo lo anterior, la CNA a través de la Gerencia de Aguas Subterráneas, encomendó a la compañía EXYCO, S.A., la realización del estudio denominado "Caracterización Hidrogeoquímica de Seis de los Principales Acuíferos del País", bajo el amparo del contrato de trabajo SGAA-93-20.

1 GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

En el acuífero de Aguascalientes se han realizado con anterioridad estudios geohidrológicos con diversos temas, la mayoría de ellos encaminados a determinar: litologías que conforman los acuíferos principales, espesor y geometría de las unidades acuíferas, distribución y densidad de los aprovechamientos que explotan a los acuíferos en estudio, y dentro de los temas de mayor interés para fines de control de los acuíferos, ha sido determinar su grado de explotación.

Aunado al conocimiento de los temas ya mencionados, la CNA ha incluido en algunos estudios, actividades encaminadas a conocer y llevar el control de la calidad química del agua que es aprovechada, por lo que como parte medular del presente trabajo, fue importante conocer y comprender los objetivos y los resultados obtenidos en estudios anteriores; a continuación se describen por estudio, los resultados más relevantes encontrados en los mismos.

1. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos en el estado de Aguascalientes

Ariel Construcciones, S.A., 1972

Este estudio cubrió los valles de Aguascalientes, Chicalote y Calvillo, por lo que partiendo del área y objetivos a desarrollar en el trabajo que realizó EXYCO, S.A., se consideró importante la siguiente información:

Geoquímica

Se tomaron 53 muestras de agua y de los análisis químicos que se les practicaron se obtuvieron los siguientes resultados:

La calidad del agua subterránea se calificó como buena, pues gran parte de las muestras se encontraron dentro de las normas establecidas para agua potable, con excepción de 26 de ellas que sobrepasaron casi al doble la norma de nitratos; 11 muestras rebasaron en menos de 2 mg/l la norma del ion amonio y el boro se sobrepasó en 13 muestras.

Se comenta que el agua analizada ha estado suficiente tiempo en el subsuelo, como para permitir que los elementos ácidos del agua de lluvia reaccionen con las sales solubles de las formaciones geológicas. El agua fue del tipo bicarbonatada-sódica.

Con las configuraciones realizadas (S.T.D., cloruros, sulfatos, bicarbonatos, dureza total, boro, relación sulfato-cloro) se establece que en la zona del río Aguascalientes el agua subterránea lleva un sentido del norte hacia al sur, recibiendo dos aportaciones de agua procedente del poniente, una de ellas, cerca de Rincón de Romos y la otra al noreste de San Francisco de Los Romo.

También se comenta que existen tres aportaciones procedentes del oriente, la primera en la zona de Tepezalá, otra cerca del río Chicalote y la última de los arroyos Montoro y San Francisco.

Temperatura del agua subterránea

En el valle de Aguascalientes se encontraron anomalías termométricas bastante marcadas, especialmente en el extremo norte y en la mitad sur del valle, lo que permitió suponer que los acuíferos en explotación tienen probablemente alimentaciones bastante profundas.

Conclusiones generales

1ª La evaporación potencial (2 102 mm anuales) en esta región es cuatro veces superior a la precipitación media anual (526 mm anuales).

2ª De acuerdo a los hidrogramas del estudio, el río Aguascalientes y sus afluentes no están drenando a los acuíferos.

3ª El volumen anual de extracción por bombeo es de $216.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ (no se incluye al Distrito de Riego de Pabellón), mediante la operación de 769 pozos, de los 802 que se localizaron; del volumen anterior, $182.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ se destinan a uso agrícola y el resto a otros usos.

4ª Los cultivos más importantes en la región estudiada son: maíz, frijol, chile, vid, papa, alfalfa, trigo, cebada, frutales y hortalizas, estimándose según la información disponible, que se cultiva aproximadamente 15,500 has con aguas superficiales y 21,000 has con aguas subterráneas.

5ª La descarga natural del flujo subterráneo del valle de Aguascalientes es en dirección sur, a través de los sedimentos permeables que se encuentran localizados entre los cerros riolíticos situados al occidente de la ranchería Salto de los Salados y los que se encuentran al occidente de la Hacienda de Las Rosas.

6ª En el área que cubrió ese estudio, la principal unidad litológica acuífera es la que corresponde a las arenas tobáceas, gravas y arenas que rellenan los valles de Aguascalientes-Ojo Caliente y Chicalote, principalmente.

7ª Las arenas tobáceas y depósitos fluviales constituyen el principal acuífero libre de la región.

En el valle de Aguascalientes, de acuerdo a los cortes litológicos de los pozos de estudio, los espesores de este acuífero son superiores a los 200 m; hacia la porción norte del valle los rellenos tienden a disminuir de espesor, según lo demuestran los afloramientos de roca volcánica que se observan en el rancho San Ignacio.

8ª Las posibilidades de transmitir agua en las arenas tobáceas y rellenos, está en razón directa del espesor saturado de las mismas, por lo cual y dado que los mayores espesores conocidos de estos sedimentos se encuentran en el valle de Aguascalientes, éste constituye el acuífero más importante de la región.

9ª En el valle de Aguascalientes el flujo subterráneo se da en dirección norte a sur, recibiendo aportes en los siguientes sitios: al norte del valle Ojo Caliente; al oriente de la zona de Tepezalá, río Chicalote y zona de El Llano; al poniente recibe aportaciones de las subcuencas de los ríos Santiago y Pabellón. La descarga natural es a través de los rellenos localizados en el extremo sur del valle.

10ª En el capítulo de hidrología subterránea se establece que el conjunto valle de Aguascalientes-valle de Chicalote, presenta efectos que denotan sobreexplotación de sus acuíferos, con inversión del flujo subterráneo en la zona de la ciudad de Aguascalientes.

2. Transporte de contaminantes en acuíferos. Estudio geohidrológico Aguascalientes

IMTA, 1990

El objetivo fundamental consistió en estudiar y caracterizar las aguas del valle de Aguascalientes, siendo de interés particular el estudio de las concentraciones de flúor y su evolución hidrodinámica en tiempo y espacio, haciendo énfasis en la zona correspondiente a la ciudad de Aguascalientes.

De acuerdo a los resultados obtenidos en ese trabajo y considerando el enfoque que tiene el estudio que realiza ésta empresa, se describen a continuación las conclusiones más importantes del estudio del IMTA:

Hidrogeoquímica

El estudio hidrogeoquímico partió de datos suministrados por la CNA, a través de la Gerencia Estatal de Aguascalientes y de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA). Se utilizaron datos del período 1984 a 1989 y algunos de los recopilados durante 1990.

Los datos recopilados corresponden a la red de monitoreo de Aguascalientes, constituida por 33 estaciones piloto en todo el estado.

Iones mayoritarios

Al no disponer de determinaciones directas de laboratorio de todos los iones mayoritarios, algunos de ellos fueron calculados o deducidos en base a relaciones entre ellos.

Diagramas de Stiff

Del estudio piezométrico se sabe que la dirección preferente de flujo en el valle de Aguascalientes es de norte a sur, lo cual coincide con los diagramas que indican mayores concentraciones en la zona sur.

De los planos generados, se observa también la presencia de aguas bicarbonatadas-cálcicas y bicarbonatadas-sódicas, con un ligero predominio de las primeras.

Diagramas de Piper

De los gráficos realizados se desprenden las siguientes observaciones:

Los diagramas permiten confirmar la composición de las aguas y se puede comprobar el predominio de las aguas bicarbonatadas-cálcicas y bicarbonatadas-sódicas; también se observa un bajo contenido de cloruros.

Relaciones iónicas

Relación rMg/rCa

Las isolíneas de esta relación presentan un rango de valores que resulta típico para aguas continentales, con valores que van de 0.3 a 1 para 1984 y de 0.1 a 0.5 para 1989; los valores máximos de esta relación se ubican en El Llano, área constituida por depósitos aluviales de pie de monte y residuales.

Relaciones r_{Na}/r_{Ca} y $r_{Na}/r_{(Ca+Mg)}$

De las configuraciones realizadas para 1984 y 1989, se observa una disminución con respecto al tiempo, lo cual podría estar asociado a la disolución de la fluorita en la zona.

Relación r_{Cl}/r_{CO3H}

El ion cloruro es bastante estable, mientras que los bicarbonatos tienden a adoptar un valor relativamente constante. Para 1984 y 1989, se observa una tendencia muy similar, con valores algo bajos pero dentro del rango normal para aguas continentales.

Relación r_{SO4}/r_{Cl}

Los planos donde se observan las isolíneas de esta relación, muestran una tendencia muy similar para 1984 y 1989. La zona de Tepezalá y Asientos, constituida por calizas del Cretácico y algunos cuerpos intrusivos de tipo granítico, es donde se observan los valores más elevados de la relación.

Distribución espacial de la concentración de flúor en el valle de Aguascalientes

De los planos elaborados de este elemento, es evidente que en gran parte del valle, las concentraciones de flúor exceden el límite máximo permisible en aguas de uso potable (1.5 mg/l).

En la zona de El Llano es donde se observan las concentraciones más altas de flúor. Los pozos ubicados en el Duraznillo y El Calvillo tienen también muy altas concentraciones de flúor, las cuales llegan a ser hasta de más de 7 ppm, lo anterior se observa en las configuraciones de 1984 a 1986, así como en 1989.

Los planos que representan 1987 y 1988 muestran una situación diferente; en 1987 puede deberse a que el muestreo no cubrió de forma uniforme el área. En 1988 se observan concentraciones por debajo del límite máximo permisible y en particular en ese año la precipitación anual (684 mm) resultó alrededor del 25% por encima del promedio, sin embargo no existe una explicación que claramente justifique las bajas concentraciones observadas.

Flúor en la zona urbana de la ciudad de Aguascalientes

Con información de 4 campañas realizadas en los años de 1988, dos en 1989 y 1990, se obtuvieron las siguientes observaciones:

No se aprecia una tendencia clara de las isolíneas en la zona urbana, esto es, pozos que para una campaña de muestreo presentan una concentración muy alta, no necesariamente continúan con una situación similar en otra campaña, por lo mismo la configuración de las isolíneas cambia de una campaña a otra en forma apreciable, sin que se observe un patrón de evolución claro, sin embargo hacia el lado sureste de la ciudad de Aguascalientes, en la zona de El Llano, se observan reiteradamente concentraciones más elevadas de este ion.

pH y temperatura en el valle de Aguascalientes

El IMTA elaboró configuraciones de pH para los años 1984, 1988, y 1989, en los que observa que en la mayor parte de la zona de estudio predominan los valores que varían entre 7 y 8, con excepción de la zona de Jesús María, en el pozo correspondiente a la estación Valladolid, donde en 1988 y 1989 se reportan valores de pH menores de 7.

Para el mismo período se tienen también las isotermas del valle de Aguascalientes, en las configuraciones realizadas puede observarse que las temperaturas anormalmente altas ocurren en el extremo norte del valle y hacia el extremo sur, así como en la zona de Jesús María.

Hacia el área de El Llano, en el pozo de la Estación El Calvillito se esperaba tener una temperatura más elevada, sin embargo esto no ocurrió así; por otra parte se supone que la disolución de CaF_2 se ve favorecida con las temperaturas elevadas y aunque las concentraciones más altas corresponden a esa zona en forma constante, en este caso el parámetro temperatura no permite apoyar totalmente esta hipótesis, debido a ello se piensa que los mecanismos que operan en el acuífero propiciando las altas concentraciones de flúor, son mucho más complejos.

Comentarios generales sobre los trabajos de hidrogeoquímica

Es evidente que no se pueden obtener conclusiones absolutas respecto al comportamiento del flúor en el acuífero de Aguascalientes.

La procedencia del flúor puede estar asociada a fuentes artificiales y naturales; entre las primeras se podría mencionar el uso de fertilizantes y la disposición descuidada de residuos de productos utilizados en diversos procesos de manufactura.

Como fuentes de origen natural están todos aquellos minerales que en mayor o en menor proporción contienen flúor; en el caso de la ciudad de Aguascalientes no tiene sentido aparentemente pensar en fuentes artificiales, siendo por lo tanto, la disolución de minerales el origen fundamental del flúor en el agua.

Aún cuando se han identificado las zonas donde las concentraciones de flúor son generalmente elevadas, no se ha identificado un claro patrón de evolución en superficie o en profundidad con el tiempo, el cual pudiera dar origen a un comportamiento estacional.

Conclusiones generales

Las conclusiones que a continuación se describen fueron tomadas del trabajo citado y no sufrieron ninguna modificación por parte de esta empresa, pues en la mayoría de los casos están relacionadas con aspectos hidrogeológicos.

1ª Se tiene una gran complejidad en la estructura geológica, la cual es propiciada por un área fallada en la zona de contacto entre el aluvial que constituye el acuífero y la zona este de la ciudad, lo cual favorece la existencia de zonas de flujo preferente, siendo a través de éstas que el flúor llega a los pozos de la ciudad de Aguascalientes.

2ª Existe una gran variabilidad espacial en las concentraciones de flúor en la zona urbana de la ciudad de Aguascalientes, originada quizás no solamente por heterogeneidades del medio, sino también por los ritmos de extracción en el área.

3ª El análisis piezométrico, respaldado en buena parte por el estudio hidrogeoquímico, permite conceptualizar un esquema de flujo en el cual las concentraciones elevadas de flúor avanzan de este a oeste de la ciudad.

4ª A partir de los resultados del estudio hidrogeoquímico ha sido factible establecer que aguas del tipo bicarbonatado-cálcico son predominantes, ello parece sustentar la hipótesis de que el flúor contenido en el agua proviene de la disolución y disociación de fluorita (CaF_2) fundamentalmente y quizás en menor proporción de otros minerales, así como del intercambio iónico entre éstos últimos.

5ª La existencia de zonas con temperaturas relativamente altas con contactos geotérmicos en profundidad es evidente, tanto a nivel del valle como de la ciudad; ello parece favorecer la disolución de minerales en cuya composición está presente el flúor.

6ª De continuar incrementándose los volúmenes de extracción en la zona urbana, cabe esperar mayores hundimientos en distintas áreas de la ciudad por abatimiento del nivel freático y por ende, por consolidación de la formación acuífera.

7ª El modelo de contaminación de Konikow and Bredehoeft ha permitido simular el avance del flúor en el acuífero; según dicho modelo, los tiempos de tránsito del contaminante oscilan alrededor de las decenas de años.

3. Trabajo de piezometría y nivelación de brocales de pozos en los estados de Tlaxcala, Puebla y Aguascalientes

Técnicos Asesores y Constructores S.A. de C.V., 1990

Como el título dice se realizaron también trabajos en Puebla y Tlaxcala, sin embargo por el área y objetivos del estudio que realizó EXYCO S.A., algunas de las conclusiones fueron de interés y se describen a continuación:

Conclusiones generales

1^a La geología regional tiene cierta complejidad existiendo unidades cuyo rango de edad varía desde el Triásico hasta el Reciente.

La unidad litológica más antigua son rocas metamórficas de edad Triásico y Jurásico que se encuentran aisladamente en pequeños afloramientos; de edad Cretácico afloran rocas sedimentarias de origen marino, mientras que el Terciario está representado por rocas sedimentarias de origen continental (areniscas y conglomerados). Los afloramientos predominantes son rocas ígneas extrusivas de composición ácida (riolitas y tobas); en cuanto a la importancia de las rocas ígneas intrusivas radica en su relación con la mineralización en donde se asientan

los distritos mineros.

Finalmente, de edad Cuaternaria aparecen los depósitos aluviales que rellenan las partes topográficamente bajas, formando los principales valles del estado.

2ª Hidrológicamente, la mayor parte del estado de Aguascalientes comprende las regiones "Lerma-Chapala y Santiago" y en una mínima porción a la región del "Salado". Los principales escurrimientos superficiales son el río Aguascalientes y el río Calvillo los que finalmente son afluentes de otros ríos importantes fuera de los límites del estado.

3ª El río Aguascalientes conocido también como río San Pedro, atraviesa el valle de Aguascalientes en dirección al sur recibiendo innumerables afluentes entre los que destacan los ríos: Pabellón, Chicalote y Santiago, así como los arroyos La Hacienda, El Cedazo, San Francisco, La Concepción y El Puerto.

El río Calvillo nace en el flanco este de la sierra Fría, recibiendo afluentes de esta misma, así como de la sierra El Laurel destacando por su importancia el río Mezquitillos y los arroyos Las Palmas, Las Cuevas, El Saltillo y arroyo Grande.

4ª Debido a que la gran mayoría de los escurrimientos superficiales son de carácter intermitente, se han construido varios depósitos de almacenamiento de aguas distribuidos en todo el estado, destacando por su importancia las presas Plutarco Elías Calles, El Niágara, Abelardo Rodríguez, La Codorniz, Pabellón y varios bordos que se utilizan con fines agrícolas o pecuarios.

5ª Al parecer el valle de Aguascalientes tiene interconexión mediante flujo subterráneo con el valle de Calvillo; lo anterior se afirma en base a las inflexiones de las isopiezas que tiene éste valle en el poblado de Lázaro Cardenas, donde cambian de rumbo norte-sur a noreste-sureste.

6ª En el valle de Aguascalientes el flujo subterráneo ocurre de manera general en dirección norte-sur, localizándose la zona de recarga hacia la porción norte del límite del estado.

A lo largo del valle el flujo continúa en dirección al sur, recibiendo recargas o aportaciones laterales a la altura de los poblados Rincón de Romos y la ciudad de Aguascalientes, provenientes de las sierras que flanquean al valle en la porción occidente.

Mientras que en la porción sur del valle, existe una recarga que obliga a cambiar la dirección del flujo subterráneo hacia el oriente, no contando con mayores datos ya que en esta zona se tiene el límite con el estado de Jalisco.

7ª En el valle de Aguascalientes se tiene que la mínima profundidad (60m) al nivel estático se detectó en la porción norte, incrementándose gradualmente hacia la parte central y el flanco oriente del valle en donde registra 120 m, siendo ésta la máxima profundidad.

8ª La evolución del nivel estático para el período 1986-1990, muestra que en el valle de Aguascalientes la curva de máximo abatimiento cuyo valor es de (-15 m) se presenta en las inmediaciones del poblado Pabellón de Arteaga, disminuyendo en la porción norte en forma concéntrica hasta alcanzar la curva de abatimiento (- 5 m).

En dirección al sur, los abatimientos varían de (-10 m) a (-1 m) presentando en la ciudad de Aguascalientes un valor de (- 6 m), mientras que el valor mínimo de (-1 m) se observa hacia los límites con el resto del estado de Jalisco.

9ª Para el período de septiembre de 1990 a marzo de 1991, la evolución obtenida para el valle de Aguascalientes fue la siguiente.

El máximo abatimiento representado por la curva (- 3 m), se observa en la porción norte del valle, en la región central y hacia la zona sur, destacando la presencia del máximo abatimiento en las inmediaciones de la ciudad de Aguascalientes y del poblado San Gerardo; en la zona sur la evolución representa (- 1 m), observándose dicha curva hacia la población de Buenavista de Peñuelos, así como en los límites con el estado de Jalisco.

1.2 Objetivos

Los objetivos del estudio de caracterización hidrogeoquímica fueron los siguientes:

- a) Validar los resultados de los análisis físico-químicos realizados
- b) Definir la distribución de las concentraciones iónicas mediante gráficas y planos
- c) Definir la evolución de la calidad química del agua contenida en los acuíferos
- d) Definir zonas con mala calidad química del agua
- e) Definir mediante modelos de equilibrio químico los índices de saturación y con éstos, los procesos ocurridos en los acuíferos
- f) Con base en los objetivos anteriores, corroborar y complementar las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos

g) Establecimiento de bases de datos para la sistematización y manejo digitalizado de la información hidrogeoquímica

1.3 Localización y descripción del área de trabajo

El valle de Aguascalientes comprende una franja de dirección norte-sur, localizada en la porción centro del estado de Aguascalientes; Rincón de Romos, Pabellón de Arteaga, Francisco de Los Romo, Jesús María y San José de La Esperanza, son algunos de los municipios ubicados dentro del área de trabajo.

El área en estudio cubre una superficie aproximada de 2,167 Km² y está delimitada por las siguientes coordenadas geográficas: 21°35' a 22°20' de latitud norte y 102°10' a 102°30' de longitud oeste (figura 1).

El acceso vía terrestre a la región es principalmente por la carretera No. 45, que une a la ciudad de México con Aguascalientes, pasando por Queretaro, Celaya, Irapuato y Lagos de Moreno, entre algunas de las ciudades más importantes.

El número de carreteras estatales existentes contribuye a lograr la mejor comunicación entre las diferentes poblaciones y cabeceras municipales; asimismo se tienen caminos de terracería transitables en todo tiempo y brechas aprovechables sólo en época de estiaje.

LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

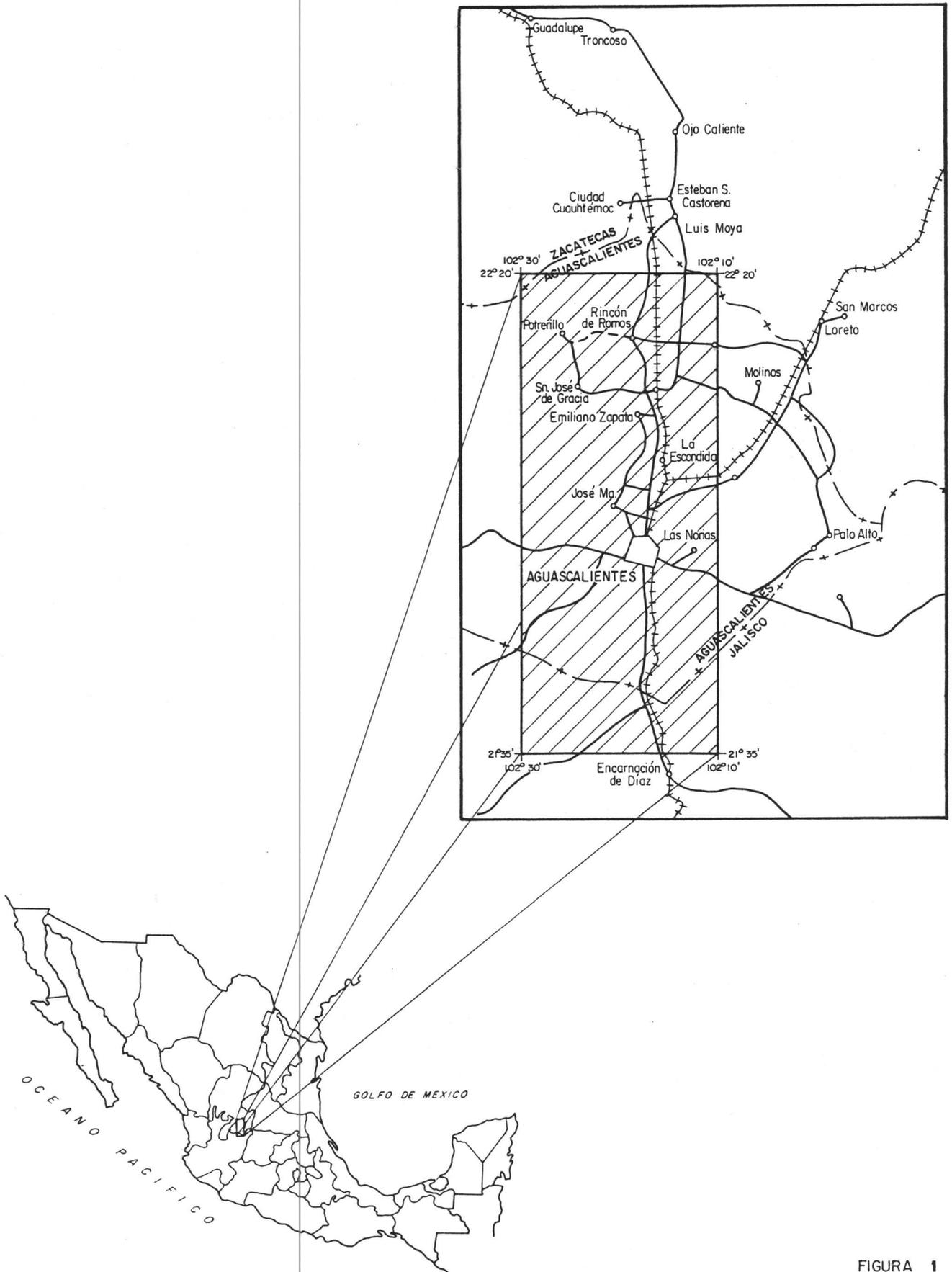


FIGURA 1

Por otro lado, el área de trabajo cuenta con servicio de ferrocarril, así como con el aeropuerto de la ciudad de Aguascalientes.

Tocante a otros servicios el área cuenta con telégrafo, servicio postal y teléfono.

2. METODO DE TRABAJO

Para lograr los objetivos marcados en este estudio, se programaron y ejecutaron una serie de actividades de gabinete y de campo, las cuales se describen brevemente a continuación.

2.1 Actividades de Gabinete

Estos trabajos consistieron fundamentalmente en la recopilación, análisis y procesamiento de la información disponible en las diversas dependencias oficiales y empresas privadas, así como en la integración final de los resultados obtenidos y que culminó con la elaboración del informe final.

Las actividades realizadas se describen a continuación:

2.1.1 Recopilación y análisis de la información

En una primera etapa se recopiló la mayor cantidad posible de información, siendo ésta de tipo cartográfico, geológico, hidrogeológico e hidrogeoquímico, entre los principales temas; concluida la recopilación se procedió al análisis,

marcando criterios de tipo jerárquico de acuerdo al tema que se tratase; finalmente se estableció un marco hidrogeológico-hidrogeoquímico de referencia que permitió conocer con claridad el entorno sobre el cual se iba a trabajar.

Para la recopilación se consultó material bibliográfico en diversas dependencias como la Comisión Nacional del Agua, en sus oficinas centrales y en las Gerencias Estatales; también se obtuvo información en la iniciativa privada y material cartográfico del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

2.1.2 Programación del muestreo de agua subterránea

Para definir las obras en las que se llevaría a cabo el muestreo, primeramente se analizó la localización de las muestras de agua tomadas en los estudios previos, así como las características hidrogeológicas de la zona, estableciéndose de esta manera una primera propuesta por parte de esta empresa, la cual fue puesta a consideración de la Subgerencia de Exploración Geohidrológica y de la Gerencia Estatal; del resultado de esta consulta se llevaron a cabo modificaciones basadas en las observaciones y sugerencias de la CNA, que permitieron unificar criterios y definir la ubicación definitiva de las obras a muestrear.

2.1.3 Análisis químicos de aguas subterráneas

A las muestras de agua colectadas en el acuífero, se les practicaron las siguientes determinaciones en laboratorio: pH, conductividad eléctrica (CE), alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, magnesio, sodio, calcio, potasio, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos y flúor; estas determinaciones se realizaron para 60 muestras.

Adicionalmente y de común acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, se practicaron análisis especiales, atendiendo las necesidades y sugerencias de la Gerencia Estatal, las cuales fueron en el sentido de analizar la presencia de metales pesados en el acuífero de la zona.

Los parámetros especiales que se determinaron fueron: cromo hexavalente en 8 pozos, plomo en 24 y fierro en 16 aprovechamientos, haciendo un total de 48 análisis especiales.

2.1.4 Procesamiento de la información

Con la información recabada directamente en campo y con la obtenida en la etapa de recopilación, se siguió la siguiente metodología:

Se elaboró la base topográfica del área estudiada, siendo el resultado de la compilación de las hojas a escala 1:50 000 de INEGI; en estas bases se dibujaron las curvas de nivel con un espaciamiento de 50 m y un rango de 250 m entre curvas maestras, así como la toponimia más representativa.

Posteriormente en la base topográfica se ubicaron las obras muestreadas por EXYCO, S. A., además de todas las obras que en la historia del acuífero fueron muestreadas cuando menos una vez.

Por otro lado se diseñó y cargó una base de datos, para el manejo automatizado de resultados de análisis químicos, tablas, gráficas y planos, que en conjunto apoyaron las interpretaciones realizadas en el estudio.

Finalmente se elaboró el informe técnico en el que se incluyen los procedimientos y resultados de cada etapa.

2.2 Actividades de Campo

Durante la realización de estas actividades se definieron los criterios e información necesarios, para evaluar las condiciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas en cada área estudiada. A continuación se describen los aspectos más sobresalientes.

2.2.1 Unificación de criterios para el muestreo de agua subterránea

Teniendo como antecedente la localización de obras y resultados de análisis químicos previos, se elaboró una propuesta del área y obras a muestrear, cuidando que se cubriera de forma uniforme el valle y sobre todo, eligiendo las obras que contaran con al menos un análisis químico previo, para poder evaluar mejor los cambios ocurridos en la calidad química del agua subterránea.

De esta forma se tuvieron reuniones en las oficinas de la CNA en la ciudad de México, exponiéndose con base en el análisis de la información, las condiciones hidrogeológicas del acuífero, los límites de las áreas de trabajo y los alcances del estudio. Como resultado de las reuniones, la Subgerencia de Exploración Geohidrológica de la CNA juzgó conveniente que esta empresa tuviera reuniones con la Gerencia Estatal, con objeto de definir de común

acuerdo los sitios en donde se llevaría a cabo el muestreo de agua subterránea.

De esta forma el día 10 de diciembre de 1993 se llevó a cabo la primera reunión en la Gerencia de Administración del Agua de la ciudad de Aguascalientes, con los ingenieros Manuel García Araujo, Subgerente de Administración del Agua, y Serapio Mata Celia, Jefe del Departamento de Aguas Subterráneas; durante la junta de trabajo se estableció al área a estudiar y se proporcionó un plano de obras piloto; con base en él se eligieron nueve áreas a estudiar, estas fueron: Arroyo Las Venas, Tanque de Los Jiménez, Ojo Caliente, sector poniente de la ciudad de Aguascalientes, Jesús María, El Chayote, Rincón de Romos, "acuífero libre de Aguascalientes" y sector norte del estado; de las áreas mencionadas se visitaron 61 obras para la obtención de las muestras respectivas a las que les practicó análisis mayoritarios. Finalmente y en coordinación con el ingeniero Manuel García Araujo, se seleccionaron 24 muestras distribuidas a lo largo del valle para que se les practicara análisis sobre plomo, a 16 muestras de la porción norte de ciudad de Aguascalientes se les determinó fierro, y a 8 muestras ubicadas hacia el sur de la ciudad de Aguascalientes se les escogió para examinar presencia de cromo hexavalente.

2.2.2 Muestreo de agua subterránea

Una vez concluida la unificación de criterios a seguir en el muestreo, se seleccionaron y resaltaron en planos los aprovechamientos seleccionados para la toma de muestras, con estos planos se programaron y calendarizaron los recorridos de campo en coordinación con la Gerencia Estatal y el visto bueno de oficinas centrales.

El agua muestreada se vació en recipientes de plástico con capacidad de un litro, previamente lavados y enjuagados con el agua proveniente de la misma fuente de abastecimiento visitada, tal y como lo indica la AWWA; durante el muestreo se tuvo cuidado de que el agua fuese representativa del acuífero, para lo cual se cercioró que la obra a muestrear tuviera al menos 30 minutos de estar operando, esto se dedujo a partir de la información de censos previos a este trabajo, pues en ellos se incluyen destino del agua, calendarios de uso y en ocasiones tiempo de operación de los equipos de bombeo.

Independientemente del tipo de análisis a realizar, en cada obra muestreada se tomaron adicionalmente 2 litros de agua de cada aprovechamiento visitado y en algunos pozos hasta 3 litros. Durante el llenado de las botellas se tuvo

especial cuidado de que no quedaran burbujas de aire para evitar que cambiaran las propiedades del agua. Una vez selladas y cerradas las botellas con doble tapa, se les colocó una etiqueta como forma de identificación.

Por último vale la pena insistir en que siempre se contó con el apoyo y la supervisión directa en campo de la Gerencia Estatal, por lo que se concluye que la etapa del muestreo de agua subterránea se realizó satisfactoriamente.

2.2.3 Determinación de parámetros de campo

Para la determinación "in-situ" de la temperatura, pH y conductividad eléctrica del agua muestreada, se utilizaron potenciómetros de marca Conductronic; estos aparatos se calibraron en el laboratorio químico de EXYCO S.A. antes de salir a campo, para lo cual se emplearon soluciones "buffer" de referencia; de igual forma se tuvo precaución de calibrar diariamente los potenciómetros, además de limpiar con agua destilada cada uno de los sensores utilizados para medir temperatura, pH y conductividad eléctrica, antes de iniciar el día de trabajo.

El cuarto de los parámetros medidos directamente en campo fue la alcalinidad, para ello se utilizó la siguiente metodología:

Se tomaron 50 ml de muestra (agua subterránea) en un matraz Erlenmeyer, se le agregaron 2 gotas de anaranjado de metilo y se agitó el agua hasta que tomó un color amarillo claro; posteriormente con una pipeta graduada se le agregó ácido sulfúrico (a concentración conocida) al matraz que contenía el agua y se detuvo el goteo hasta que se dio el cambio a color "canela", e inmediatamente se tomó la lectura del volumen vaciado de ácido sulfúrico. Valiéndose de la siguiente expresión se obtuvo finalmente el valor de alcalinidad de campo:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

donde:

C_1 = concentración del ácido sulfúrico

V_1 = volumen del ácido sulfúrico

C_2 = concentración de la muestra (C_m)

V_2 = volumen de la muestra

por lo que:

$$C_m = (C_1V_1/V_2) (50) \text{ meq/lt}$$

en que:

$C_1 = 0.0197$ (aproximadamente igual a 0.02 meq/lt)

V_1 = volumen del ácido sulfúrico agregado

50 = constante del titulador (anaranjado de metilo)

$V_2 = 50$ ml en todos los casos del muestreo

3 HIDROGEOLOGIA

3.1 Unidades hidrogeológicas

La definición de las unidades hidrogeológicas se establece con el análisis de las características físicas de los materiales, como son: litología, posición estratigráfica, porosidad y la existencia de estructuras como fallas y fracturas, entre otras. Estas características definen el tamaño, grado de interconexión y distribución de los espacios vacíos y dan una idea de la permeabilidad de los materiales, así como de las capas o unidades que pueden conformar acuíferos, sus límites y permiten conocer de forma preliminar algunas de las características químicas que el agua puede tener.

De acuerdo a lo anterior y teniendo como base la información previa, se distinguieron las unidades hidrogeológicas y se describió el modelo de funcionamiento conceptual del acuífero.

Unidades hidrogeológicas

Unidad I. Acuífero en materiales granulares del Cuaternario

Se constituye por las siguientes unidades litológicas: Qf, Qp, Qal, Qag y Qar.

Los depósitos fluviales (Qf) se restringen a los cauces de los ríos y arroyos, granulométricamente consisten de arenas, limos y gravas, que varían en composición de acuerdo a la fuente de origen (ACSA, 1972). Constituyen lentes alargados que captan parte del agua de lluvia y de los escurrimientos superficiales, formando parte importante de estos últimos; sin embargo dadas sus características de espesor reducido y distribución limitada, funcionan como un cuerpo granular de buena permeabilidad en el que el agua que llega a infiltrarse a través de él, generalmente tiende a moverse hacia acuíferos subyacentes, funcionando en tal caso como zonas de recarga.

Los depósitos de pie de monte (Qp) se presentan en las estribaciones de cerros y sierras, están constituidos por gravas, arenas y cantos de forma angular, mal clasificados, cuya composición está en función de las rocas de las que fueron erosionadas (ACSA, 1972). Debido a la posición topográfica que ocupan y por

encontrarse sobre el nivel de saturación, no funcionan como acuífero, sin embargo por su buena permeabilidad permiten la infiltración del agua hacia las unidades acuíferas, actuando como un embalse subterráneo.

Los depósitos aluviales (Qal) comprenden a los suelos areno-limosos de las planicies (ACSA, 1972), debido a su amplia distribución en el valle de Aguascalientes, superficialmente funciona como amplias áreas de captación del agua proveniente de lluvias, mientras que en subsuelo puede constituir acuíferos libres de distribución restringida, esto último en función del espesor que la unidad presente; asimismo constituye un cuerpo granular que capta el agua de retornos de riego, llegando a almacenarla; en otros casos la cede hacia los acuíferos, dependiendo de que existan o no horizontes arcillosos de muy baja permeabilidad, intercalados en este depósito.

Las gravas arenosas (Qag) representan el miembro superior de las arenas tobáceas (Qar) que afloran en la porción sur del valle; se conforman de gravas y cantos riolíticos y arenas medias que alternan con horizontes de arenas gruesas (ACSA, 1972). En general funciona como un material que transmite el agua de lluvia infiltrada a las unidades acuíferas que sobreyace, sin embargo es susceptible de almacenar agua cuando se ubica por debajo del nivel de saturación.

Las arenas tobáceas (Qar) son los sedimentos continentales distribuidos en los sectores central, sur y poniente del valle, áreas donde forma lomeríos de pendientes suaves y de forma arredondada, de 20 a 30 m de altura. Teniéndose los mejores afloramientos sobre los cauces de los ríos y arroyos donde han quedado expuestos; consisten de arenas tobáceas de grano fino, de color café amarillento a café rojizo, en capas gruesas con costras de caliche; ocasionalmente alternan con lentes de arenas y gravas de color gris claro (ACSA, 1972; IMTA, 1990). Sobreyace discordantemente a rocas más antiguas, de acuerdo a las perforaciones realizadas por la CNA, sus espesores son mayores a los expuestos en superficie, llegando a ser de hasta de más de 400 metros (ACSA, op. cit.). Por las características descritas conforma el acuífero principal del valle de Aguascalientes.

La unidad I en conjunto representa el acuífero que actualmente es explotado; las secciones hidrogeológicas tomadas del estudio del IMTA (1990) muestran de forma esquemática su amplia distribución a lo largo del valle; la ubicación de las secciones mencionadas se observa en el plano hidrogeológico anexo (IMTA, op. cit.).

Unidad II Acuífero en rocas ígneas fracturadas del Terciario

Constituida por las unidades litológicas Tvt y Tvr.

Las riolitas (Tvr) forman una serie de escarpes, cantiles y mesetas; en la porción norponiente se observan riolitas fluidales de color café rojizo, café morado o café rosado, de textura afanítica y porfídica con cristales de cuarzo. Al norte de Tepezalá constituye cantiles de más de 50 m de espesor; en el valle de Aguascalientes generalmente se presenta en forma de escarpes, los que muestran fracturamiento vertical de más de 10 m y aperturas de 2 a 3 mm. Debido a la posición topográficamente alta que normalmente ocupa, conforma acuíferos de distribución restringida, no obstante, en superficie representa amplias áreas de captación del agua de lluvia que finalmente cede a las unidades acuíferas que sobreyace; en el subsuelo, de acuerdo a las secciones hidrogeológicas (IMTA, 1990), constituye el acuífero inferior del valle de Aguascalientes.

Las tobas denominadas como (Tvt) muestran composición variable, como son: tobas soldadas, tobas líticas y areniscas tobáceas, exhibiendo estructura masiva o en capas. Debido a los escasos afloramientos de la unidad, constituye acuíferos de distribución restringida; al sureste de la ciudad de Aguascalientes está siendo explotada por pozos cuyos caudales varían entre 10 y 15 lps (ACSA,

1972).

En conjunto, la unidad II representa el acuífero inferior del valle de Aguascalientes y al estar conformada principalmente por rocas riolíticas, se asocian procesos que explican que el agua extraída sea caliente; este termalismo pudiera ser resultado de alguna "fuente de calor", ya sea vía cuerpo que intrusión a las riolitas o por decaimiento radioactivo de las mismas. La información previa no permite inclinarse por alguno de los procesos planteados, sin embargo a través de las interpretaciones hidrogeológicas desarrolladas en el actual estudio, se pudieron establecer algunos procesos lógicos que más adelante se detallarán y que pueden explicar las altas temperaturas del agua.

Unidad III Acuitardo en materiales granulares del Terciario

Constituida por las unidades litológicas: Tleo(cg) y Tleo(ar)

Los depósitos lacustres arcillo-arenosos y calcáreos con intercalaciones de basalto en algunas áreas (Tleo (cg)), afloran en el sector oriental del valle expuestos en forma de lomeríos aplanados en la cima; litológicamente consisten de una secuencia de rocas volcánicas de color gris claro, grano fino, en capas

medianas a gruesas y estructura laminar, alternando con capas gruesas de arcilla color verde claro (ACSA, 1972; IMTA, 1990). Por su composición y bajo grado de consolidación, puede comportarse como un acuitardo.

La unidad Tleo(ar) en su parte inferior es conglomerática, bien litificada con matriz arcillo-arenosa y calcárea, mientras que las porciones media y superior son areniscas y tobas arenosas sueltas a bien litificadas (ACSA, 1972). Por las características físicas de esta secuencia se le considera como poco permeable.

Por conformarse de dos litologías con comportamiento hidráulico similar, se considera que la unidad III es un acuitardo cuya distribución se restringe a los sectores centro y sur oriental del valle.

Unidad IV Acuitado en rocas carbonatadas del Cretácico

Secuencia constituida por las unidades litológicas: Kc, Kla, y Kcp.

Los afloramientos de mayor extensión de las calizas fósiles (Kc), se localizan sobre el camino Tepezalá-Asientos y sobre el de Tepezalá-Puerto de la Concepción, entre el arroyo La Caldera y a unos 700 m al poniente de Tepezalá; lugar donde la secuencia consiste de calizas arcillosas que se muestran en estratos

delgados de 10 a 105 cm, con estructura laminar y que tienden a lajearse según sus planos de estratificación; estas rocas se observan intrusionadas por granitos o dioritas (ACSA, 1972). No se tiene conocimiento de que esta unidad sea explotada mediante pozos.

La alternancia de lutitas y areniscas (Kla) se observa a 2 Km al norte de Tepezalá, sobre un arroyo que nace en La Cantera. Consiste de areniscas de color variable, gris verdoso al grisáceo azulado, bien cementadas de grano fino, dispuestas en estratos medianos a gruesos que alternan con bancos de más de 10 m de espesor, de lutitas y limolitas color café verdoso claro. Hacia la parte superior la unidad se va haciendo más calcárea y finalmente está cubierta por calizas con bandas y nódulos de pedernal; el contacto inferior se observa 700 m al sur de Tepezalá, donde poco a poco se hace más calcárea; su espesor estimado es mayor de 300 m (ACSA, 1972). Por el grado de compactación de las lutitas y la cementación de las areniscas, se le atribuye permeabilidad muy baja.

Las calizas con pedernal (Kcp) exhibe sus mejores afloramientos en La Cantera, al norte de Tepezalá donde se le estimó un espesor mayor de 100 m. Litológicamente consiste de calizas color gris dispuestas en estratos delgados a medianos con estructura laminar y cavidades de disolución propiciadas por las fracturas, su contacto inferior es transicional con las areniscas y lutitas. En

algunos sitios están cubiertas por derrames de riolitas. De las rocas carbonatadas descritas anteriormente, las calizas con pedernal son las que presentan mejores condiciones hidrogeológicas, debido a la presencia de cavidades de disolución comunicadas entre sí, propiedad confirmada desde el estudio de ACSA (1972), donde se reporta un manantial sobre estas rocas en la sierra de Tepezalá. Las mejores posibilidades acuíferas ocurren en la porción oriental del valle de Aguascalientes, sector donde afloran y forman estructuras; mientras que al sur y poniente del área se infiere que existen en el subsuelo a gran profundidad (más de 400 m), debido a que no han sido cortadas por pozos exploratorios de la CNA.

La unidad IV en conjunto muestra todas las características de un acuícludo, que debido a su posición estratigráfica es la base de los acuíferos en materiales granulares y en rocas ígneas fracturadas. Sin embargo de acuerdo a las secciones hidrogeológicas del trabajo del IMTA (1990), es probable que en algunos sitios muy localizados pueda estar saturada y conformar acuíferos pobres de distribución muy localizada.

Unidad V Acuiludo del Triásico-Jurásico

Constituida por las unidades litológicas: J1 y Tri

Los principales afloramientos del Jurásico se localizan al oriente de Santo Tomás y sobre el camino a Pastoría, a 3 Km al oeste de Pastoría y en la parte alta de la sierra; consiste de una serie de lutitas color gris verdoso, generalmente intrusionadas por pórfidos riolíticos y graníticos, en su contacto superior se aprecian una serie de calizas arcillosas (ACSA, 1972). Por las características físicas de esta secuencia, es considerada como capas confinantes, dada su baja permeabilidad.

Las rocas del Triásico (Tri) afloran a 17 Km al oriente de la ciudad de Aguascalientes y sobre la carretera que va de Aguascalientes a Calvillo, consisten de areniscas bien cementadas y limolitas sumamente fracturadas e intrusionadas por diabasas y cubiertas por arenas tobáceas (ACSA, 1972). Aunque las limolitas muestran fracturamiento, el alto grado de cementación de las areniscas y materiales arcillosos asociados a las limolitas, permiten considerar a esta unidad como de baja permeabilidad.

La unidad V por ocupar la posición estratigráfica más antigua, aunado a que presenta características de muy baja permeabilidad, conforma el basamento y barrera vertical impermeable de las unidades acuíferas descritas anteriormente.

3.2 Modelo de funcionamiento hidrogeológico conceptual

El valle de Aguascalientes es de origen tectónico, en su porción norte presenta una serie de lomeríos de riolitas a la altura de Ojo Caliente; hacia su parte sur está compuesto por materiales granulares permeables (arenas tobáceas y gravas) que permiten el paso del flujo subterráneo.

El flanco oriental del valle presenta zonas impermeables, como son los núcleos de la sierra localizada al poniente de Saucedá de Mulatos y sierra Tepezalá, que están formados por rocas ígneas intrusivas y metamórficas, que funcionan como barreras al flujo subterráneo; sin embargo puede existir comunicación hidráulica entre los valles de Aguascalientes y Tierra Blanca, mediante el parteaguas topográfico de Noria de Molinos, el cual está compuesto por materiales poco permeables como son las areniscas y conglomerados de la unidad III. Estas mismas condiciones hidrogeológicas existen al sur de la sierra

Tepezalá, a la altura de la ranhería El Chiquihuite, donde vuelven a aflorar las areniscas y conglomerados, sirviendo de comunicación subterránea entre los valles de Aguascalientes y Chicalote.

El flanco occidental del valle de Aguascalientes por estar parcialmente afallado, puso en contacto los sedimentos permeables de la planicie con rocas impermeables de dicho flanco, actuando las últimas como barreras al flujo subterráneo entre este valle y las zonas localizadas al poniente del mismo; esto se infiere por la presencia de rocas impermeables que conforman buena parte del flanco mencionado, como son las rocas ígneas intrusivas, metamórficas y volcánicas, que afloran desde Palmillas en la porción norte, hasta la presa La Virgen en la parte sur.

El principal acuífero del valle, es la unidad que corresponde a las arenas tobáceas, gravas y arenas que rellenan las fosas tectónicas, presumiéndose que funciona como un acuífero granular de tipo libre, cuyos espesores son superiores a los 200 m.

El flujo subterráneo ocurre en dirección norte a sur, recibiendo alimentaciones en los siguientes sitios: del norte, provenientes del valle Ojo Caliente; por el flanco oriental en la zona de Tepezalá, río Chicalote y área de El Llano; por

el poniente recibe aportaciones de las subcuencas de los ríos Santiago y Pabellón, siendo la descarga natural mediante flujo subterráneo a través de los rellenos localizados en el extremo sur del valle.

Debido a la intensa extracción que se realiza mediante pozos ubicados en el valle de Aguascalientes, el sistema presenta efectos que denotan la sobreexplotación de los acuíferos que lo conforman, con inversión de los gradientes hidráulicos en las inmediaciones de la ciudad de Aguascalientes, en forma de un cono de abatimiento definido por los pozos que abastecen a la propia ciudad, industrias y a los terrenos de cultivo de ese sector.

Es importante mencionar que en su etapa inicial, el agua que satura los depósitos granulares del centro del valle, ha circulado en algunos sitios por rocas volcánicas fracturadas.

4. HIDROGEOQUIMICA

El agua almacenada en el acuífero, por su naturaleza química al infiltrarse y circular a través de los materiales permeables, disuelve gran cantidad de elementos, modificando su composición original.

La concentración de cada uno de los iones presentes en el agua, refleja el entorno geológico por donde se ha desplazado y determina el uso al que puede destinarse.

Para conocer las características físico-químicas del agua de la zona, se seleccionaron y muestrearon un total de 60 aprovechamientos, cuya ubicación se presenta en el plano 1, mientras que en plano 2 se distinguen los análisis mayoritarios realizados, así como las determinaciones especiales practicadas.

4.1 Parámetros físicos

Los parámetros físicos que fueron determinados en el campo son: conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), alcalinidad y temperatura (T) los resultados se anotan en la tabla 4.1., mientras que en la tabla 4.1a se muestran las concentraciones mínimas detectables mediante las técnicas utilizadas en laboratorio.

AGUASCALIENTES

No.LAB.	CLAVE FINAL	LOCALIDAD	TEMP(CAMPO) (°C)	pH(CAMPO)	CE(CAMPO) (μmhos/cm)	ALC(CAMPO) (ppm)	CE (μmhos/cm)	pH	ALCT (ppm)	DTOT (ppm)	DCA ⁺⁺ (ppm)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁼ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	F ⁻ (ppm)	rCa ⁺⁺ (meq/l)	rMg ⁺⁺ (meq/l)	rNa ⁺ (meq/l)	rK ⁺ (meq/l)	rHCO ₃ ⁻ (meq/l)	rCl ⁻ (meq/l)	rSO ₄ ⁼ (meq/l)	rF ⁻ (meq/l)	Cr ⁺⁶ (mg/l)	Pb ⁺⁺ (mg/l)	Fe ⁺⁺ (mg/l)	
1	NO TIENE	COL. OJO CALIENTE	32.4	6.56	900	316	980.0	6.65	320.0	154.0	150.0	60.0	1.0	113.5	14.5	390.4	14.7	58.0	7.9	6.19	3.00	0.08	4.93	0.37	6.40	0.41	1.21	0.33				
2	NO TIENE	SAN ANTONIO PEÑUELOS	20.0	6.78	364	100	503.0	7.74	200.0	114.0	94.0	37.6	4.8	46.7	9.6	244.0	6.5	0.0	10.1	6.17	1.88	0.40	2.03	0.25	4.00	0.18	0.00	0.32				
3	NO TIENE	TANQUE LOS JIMENES	19.0	6.75	774	220	756.0	7.19	268.0	170.0	146.0	58.4	5.8	62.5	26.8	327.0	10.4	32.0	8.4	1.46	2.92	0.48	2.72	0.69	5.36	0.29	0.67	0.08				
NO TIENE	PEÑUELOS	PEÑUELOS	17.0	6.73	361	100	379.0	6.74	94.0	64.0	50.0	20.0	3.4	28.5	20.6	114.7	6.8	25.0	16.7	1.09	1.00	0.28	1.24	0.53	1.88	0.19	0.52	0.06	0.00	0.04		
5	NO TIENE	RUSTICO CALPULLI	23.0	7.35	544	180	544.0	7.34	208.0	138.0	122.0	48.8	3.8	45.0	9.8	253.8	4.0	0.0	10.1	3.01	2.44	0.32	1.96	0.25	4.16	0.11	0.00	0.16	0.00	0.05		
6	NO TIENE	RANCHO LA COTORRA	26.0	7.13	669	200	669.0	7.36	230.0	134.0	128.0	51.2	1.4	61.9	12.5	280.6	5.8	27.0	8.4	0.95	2.56	0.12	2.69	0.32	4.60	0.16	0.56	0.05				
7	NO TIENE	JESUS MARIA	30.6	6.43	1460	360	1247.0	6.52	380.0	200.0	126.0	50.4	17.8	125.0	30.8	463.6	7.5	87.0	5.3	3.70	2.52	1.48	5.43	0.79	7.60	0.21	1.81	0.19				
8	NO TIENE	POSITOS (COYOTES)	22.4	6.56	1222	440	1302.0	6.87	460.0	264.0	164.0	65.6	24.0	121.1	33.1	561.2	4.3	82.0	7.5	1.46	3.28	2.00	5.27	0.85	9.20	0.12	1.71	0.08				
9	NO TIENE	VIÑEDO AGUASCALIENTES	29.0	6.7	1413	380	1265.0	6.71	380.0	214.0	126.0	50.4	21.1	107.7	30.0	463.6	7.4	77.0	6.2	4.97	2.52	1.76	4.68	0.77	7.60	0.21	1.60	0.26	0.00	0.05		
10	NO TIENE	SAN JOSE DEL RIO	24.2	6.9	1266	300	1160.0	6.95	422.0	308.0	260.0	104.0	11.5	89.3	32.1	514.8	11.3	70.0	10.1	1.80	5.20	0.96	3.88	0.82	8.44	0.32	1.46	0.09				
11	NO TIENE	RANCHO LOS ARBOLITOS	17.7	7.19	1110	300	1020.0	7.07	323.0	122.0	90.0	36.0	7.7	100.0	27.6	394.1	10.1	8.0	5.3	5.15	1.80	0.64	4.35	0.71	6.46	0.28	0.17	0.27				
12	53	SAN IGNACIO	24.8	7.08	1340	360	1208.0	7.06	462.0	288.0	254.0	101.6	8.2	123.1	27.2	563.6	7.1	62.0	7.4	5.08	5.08	0.68	5.35	0.70	9.24	0.20	1.29	0.27		0.05	0.00	
13	10	LA PUNTA	21.0	6.63	660	200	620.0	6.64	240.0	143.0	92.0	36.8	12.2	67.5	15.2	292.8	6.8	34.0	7.5	2.74	1.84	1.02	2.93	0.39	4.80	0.19	0.71	0.14		0.05	0.00	
14	85	AL W DE EL SAUCILLO	16.5	7.25	780	220	744.0	7.00	313.0	192.0	142.0	56.8	12.0	86.1	17.6	381.9	6.6	53.0	7.5	1.66	2.84	1.00	3.74	0.45	6.26	0.19	1.10	0.09				
15	NO TIENE	EL SAUCILLO	17.2	6.97	885	240	819.0	6.95	274.0	126.0	75.0	30.0	12.2	91.1	22.0	334.3	8.5	42.0	4.4	1.39	1.50	1.02	3.96	0.56	5.48	0.24	0.88	0.07		0.05	0.00	
16	NO TIENE	EL BAJIO	20.3	7.4	595	200	568.0	7.16	192.0	103.0	70.0	28.0	7.9	48.9	42.4	234.2	6.7	36.0	12.8	2.00	1.40	0.66	2.13	1.09	3.84	0.19	0.75	0.11				
17	20	RINCON DE ROMOS	21.7	7.63	757	220	700.0	7.34	247.0	129.0	71.0	28.4	13.9	70.8	29.6	301.3	8.4	36.0	10.6	1.62	1.42	1.16	3.08	0.76	4.94	0.24	0.75	0.09		0.03	0.00	
18	23	RINCON DE ROMOS	23.5	7.47	805	260	728.0	7.08	245.0	117.0	72.0	28.8	10.8	74.2	23.4	298.9	7.6	40.0	9.7	2.02	1.44	0.90	3.23	0.60	4.90	0.21	0.83	0.11		0.05	0.00	
19	149	RANCHO EL MOSCO	26.2	7.3	950	200	575.0	7.25	218.0	109.0	62.0	24.8	11.3	54.3	11.0	266.0	5.0	7.0	7.9	2.90	1.24	0.94	2.36	0.28	4.36	0.14	0.15	0.15				
20	28	RANCHO CAROLINA	22.3	7.25	775	260	699.0	7.23	286.0	173.0	144.0	57.6	7.0	75.0	24.1	348.9	8.1	36.0	12.3	1.73	2.88	0.58	3.26	0.62	5.72	0.23	0.75	0.09				
21	12-A	VIÑEDOS SAN JUAN	32.7	7.07	797	260	685.0	6.59	291.0	116.0	112.0	44.8	1.0	90.0	17.6	355.0	3.8	14.0	5.3	2.14	2.24	0.08	3.91	0.45	5.82	0.11	0.29	0.11		0.05	0.00	
22	165	PABELLON DE HIDALGO	17.0	7.64	756	260	663.0	7.45	260.0	144.0	124.0	49.6	4.8	71.7	26.5	317.2	6.7	40.0	8.8	2.31	2.48	0.40	3.12	0.68	5.20	0.19	0.83	0.12				
23	28-A	PABELLON DE ARTEAGA	22.3	7.14	815	260	706.0	7.33	287.0	168.0	128.0	51.2	9.6	78.3	26.5	350.1	8.6	37.0	8.4	1.94	2.56	0.80	3.40	0.68	5.74	0.24	0.77	0.10				
24	NO TIENE	AL W DE PABELLON ARTEAGA	17.9	6.97	287	100	258.0	7.12	115.0	88.8	72.8	29.1	3.8	20.4	15.8	140.3	4.7	18.0	10.1	0.73	1.46	0.32	0.89	0.41	2.30	0.13	0.38	0.04				
25	192	SANTIAGO	21.9	7.02	604	180	516.0	7.17	200.0	116.0	104.0	41.6	2.9	52.1	19.8	244.0	6.8	33.0	8.4	0.99	2.08	0.24	2.27	0.51	4.00	0.19	0.69	0.05		0.03	0.00	
26	68	EMILIANO ZAPATA	23.0	7.12	623	160	563.0	7.09	205.0	120.0	104.0	41.6	3.8	43.9	30.1	250.1	6.4	29.0	8.8	0.89	2.08	0.32	1.91	0.77	4.10	0.18	0.60	0.05		0.04	0.00	
27	193	LA CONCHA	22.4	7.33	752	240	735.0	7.19	290.0	176.0	142.0	56.8	8.2	77.5	27.4	353.8	8.7	38.0	10.0	1.85	2.84	0.68	3.37	0.70	5.80	0.25	0.79	0.10				
28	40	VALLADOLID	22.9	6.98	1080	300	1005.0	7.05	360.0	228.0	202.0	80.8	6.2	89.2	33.5	439.2	11.8	54.0	12.3	0.96	4.04	0.52	3.88	0.86	7.20	0.33	1.13	0.05				
29	41-A	SAN ANTONIO DE LOS ORCONES	22.3	6.76	1182	300	1287.0	6.73	439.0	264.0	230.0	92.0	8.2	119.2	34.7	535.6	12.0	74.0	11.0	2.73	4.60	0.68	5.18	0.89	8.78	0.34	1.54	0.14		0.02	0.00	
30	36	EL TIRON	24.0	7.54	746	220	772.0	7.31	251.0	158.0	130.0	52.0	6.7	70.0	25.3	306.2	9.2	58.0	7.0	2.00	2.60	0.56	3.04	0.65	5.02	0.26	1.21	0.11		0.04	0.00	
31	25	SE DE SAN FCO. DE LOS ROMO	25.3	7.55	778	220	631.0	7.10	245.0	155.0	123.0	49.2	7.7	73.3	20.0	298.9	10.6	62.0	7.9	1.69	2.46	0.64	3.19	0.51	4.90	0.30	1.29	0.09		0.02	0.00	
32	164	CENTRO DE EST. AGROPECUARIOS	21.0	7.7	563	180	372.0	7.38	190.0	140.0	116.0	46.4	5.8	39.0	12.3	231.8	10.6	16.0	12.3	1.51	2.32	0.48	1.70	0.32	3.80	0.30	0.33	0.08		0.06	0.00	
33	147	MONTORO	22.3	7.09	747	220	477.0	7.13	262.0	190.0	174.0	69.6	3.8	48.3	19.1	319.6	13.0	18.0	9.2	0.99	3.48	0.32	2.10	0.49	5.24	0.37	0.38	0.05				
34	187	VIÑEDOS CHURUBUSCO	21.8	7.07	787	220	482.0	7.17	260.0	186.0	170.0	68.0	3.8	52.9	18.1	317.2	11.6	28.0	8.8	1.68	3.40	0.32	2.30	0.46	5.20	0.33	0.58	0.09				
35	NO TIENE	EL SALTO DEL SALADO	22.1	7.72	1137	280	781.0	7.16	325.0	266.0	264.0	105.6	0.5	85.4	31.2	396.5	55.8	54.0	27.2	0.90	5.28	0.04	3.71	0.80	6.50	1.57	1.13	0.05	0.00	0.03		
36	146	SAN JOSE DE LA ESPERANZA	18.6	7.25	1066	300	686.0	7.08	335.0	234.0	232.0	92.8	0.5	65.0	25.3	408.7	40.1	3.0	4.4	0.93	4.64	0.04	2.83	0.65	6.70	1.13	0.06	0.05	0.00	0.02		
37	NO TIENE	ZONA SUR CD. AGUASCALIENTES	25.8	7.3	707	240	440.0	7.24	240.0	152.0	132.0	52.8	4.8	57.9	16.7	292.8	10.7	28.0	8.8	1.85	2.64	0.40	2.52	0.43	4.80	0.30	0.58	0.10	0.00	0.03		
38	NO TIENE	CALVILLITO	19.0	7.05	750	240	678.0	7.54	339.0	46.0	43.8	17.5	0.5	187.5	4.0	413.6	22.9	42.0	7.4	9.26	0.88	0.04	8.15	0.10	6.78	0.65	0.88	0.49				
39	96	LOS CAÑOS	14.1	7	511	200	336.0	6.82	209.0	126.0	118.0	47.2	1.9	38.0	12.4	255.0	2.5	3.0	5.3	0.90	2.36	0.16	1.65	0.32	4.18	0.07	0.06	0.05				
40	77	SAN PEDRO CIENEGUILLAS	21.1	7.45	412	200	271.0	7.13	153.6	74.0	59.6	23.8	3.5	40.0	13.6	187.4	4.5	3.0	11.0	0.81	1.19	0.29	1.74	0.35	3.07	0.13	0.06	0.04				
41	144	AL SW DE LA COTORRA	22.7	8	445	160	291.0	7.69	173.0	104.0	84.0	33.6	4.8	33.0	10.3	211.1	2.6	2.0	7.9	0.90	1.68	0.40	1.43	0.26	3.46	0.07	0.04	0.05				
42	NO TIENE	LA FORTUNA	29.0	7.5	756	260	476.0	7.19	269.0	122.0	118.0	47.2	1.0	86.1	17.8	328.2	5.5	29														

**TABLA 4.1a. LIMITES MINIMOS DETECTADOS POR
LOS METODOS DE ANALISIS EMPLEADOS**

(VALLE DE AGUASCALIENTES)

pH	0.01
SO ₄ ⁼	1 ppm
Cl ⁻	0.1 ppm
Durezas, Ca ⁺⁺ y Mg ⁺⁺	0.1 ppm
Na ⁺ y K ⁺	0.1 ppm
Alcalinidad, HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁼	0.1 ppm
F ⁻	0.01 ppm
NO ₃ ⁻	0.1 ppm
CE	0.1 micromhos/cm
Cu ⁺⁺	0.003 ppm
Hg ⁺⁺	0.002 ppm
Pb ⁺⁺	0.02 ppm

NOTA: Por debajo de estos límites el método no detecta contenido del ion correspondiente

Conductividad eléctrica (CE)

El uso de éste parámetro refleja un comportamiento en relación directa con la concentración de la salinidad, aunque es conveniente señalar que varía en función del tipo de sales para una misma fracción.

Los resultados de la conductividad eléctrica oscilan entre 361 y 1490 micromhos/cm, para los pozos Peñuelos y Viñedos Elizondo respectivamente; teniéndose un valor promedio de 750 micromhos/cm.

Potencial hidrógeno (pH)

Es el parámetro usado para determinar la actividad iónica del hidrógeno, que además puede alterar el equilibrio para que la molécula del agua se disocie y así reaccione con otras sustancias.

Los valores presentes varían en el rango de 6.43 a 8, correspondiendo el primer valor a los pozos Jesús María y Viñedos Elizondo, mientras que el segundo para el pozo 41.

Temperatura (T)

Representa la temperatura del agua del acuífero y varía de acuerdo a diversos factores como pueden ser, la profundidad y su relación con el gradiente geotérmico, presencia de zonas volcánicas, etc.

Las mediciones de temperatura realizadas en captaciones de aguas subterráneas dieron un valor promedio de 25 °C, sin embargo algunas presentaron una temperatura superior a la temperatura media ambiental, estas son: Col. Ojo Caliente, Jesús María, Viñedo Aguascalientes, Viñedos San Juan, La Fortuna, Viñedos Elizondo y Ojo Caliente, entre otras; por lo anterior se clasificó a estas aguas como aguas de termalismo bajo (Custodio, E. Llamas, M. R. 1983).

4.2 Características de los iones analizados

En este inciso se describirán los resultados de los análisis físico-químicos realizados en el laboratorio, sus concentraciones se muestran en la tabla 4.1.

Las técnicas de análisis empleadas, han sido las propuestas en el "Standard Method for the Examination of water and wastewater" por la APHA, AWWA

Y WCP (1975), así como por la Norma Oficial Mexicana. Los límites permitidos para el consumo humano y anotados durante la descripción de algunos iones, fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989, por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (antes SEDUE hoy SEDESOL), en conjunto con la Secretaría de Salud.

Cationes

Calcio

Es un ion bivalente de carga positiva que se encuentra formando parte de la mayoría de las rocas que constituyen la corteza terrestre.

Proviene principalmente de la alteración que sufren los feldespatos de las rocas volcánicas aflorantes en la zona, así como de las arenas de relleno.

La concentración más baja se detectó en la obra 38 con 17.5 ppm, en tanto que la máxima concentración de 105.6 ppm corresponde al pozo 35 ubicado en El Salto del Salado.

Como puede observarse los valores obtenidos no sobrepasan el límite máximo permitido, fijado por la SEDESOL que es de 200 ppm.

Magnesio

Se presenta como ion bivalente que es afectado por el intercambio iónico; forma parte de un buen número de rocas.

El magnesio no existe libre en la naturaleza, se le encuentra combinado con carbonatos, sulfatos, cloruros y silicatos.

Las rocas ígneas como el basalto son la principal fuente de aporte de este elemento en la región.

Las concentraciones en las obras analizadas, estuvieron en el rango entre 0.5 y 24 ppm, la primera para las obras: 35, 36, 38 y 44, mientras que la segunda corresponde al pozo 8 ubicada en Coyotes.

Estos valores están por debajo de los límites máximos permisibles admitidos por la SEDESOL que es de 125 ppm.

Sodio

Este elemento junto con el calcio y el magnesio, corresponden a los principales cationes encontrados en la naturaleza. Proviene de la disolución de los feldespatos que constituyen a las rocas ígneas, así como por el intercambio catiónico de las arcillas, por medio del cual el sodio pasa a solución mientras que el calcio permanece en el suelo.

La principal fuente de sodio la constituyen los feldespatos y silicatos presentes en las rocas ígneas y por el cambio de base con las arcillas ampliamente distribuidas.

Los valores encontrados oscilan entre 20.4 y 187.5 ppm para la captación 24 y el pozo 38, respectivamente; en zonas donde la presencia de este ion es notoria, su presencia se asocia con paquetes arcillosos.

Potasio

Es producto de la descomposición meteórica de silicatos, en ocasiones procede de contaminación industrial, minera y agrícola (abonos). Tiende a ser fijado irreversiblemente por el terreno durante la formación de arcillas.

El valor más bajo que se encontró corresponde al pozo 38 con 4 ppm, en tanto que la concentración más alta, se ubica en la obra 47 localizada en Chichimecos, con un valor de 43.8 ppm. No provoca efectos secundarios que dañen la salud si se encuentra en exceso.

Aniones

Bicarbonatos

Pertenece al grupo de los aniones, el bicarbonato a diferencia de los otros iones analizados es una consecuencia de reacciones químicas producto de la interacción entre el agua, gases y rocas, en tanto que los demás iones provienen de la disolución de las rocas.

De los análisis reportados se encontraron concentraciones mínimas de 114.7 ppm en Peñuelos y la concentración máxima para la obra 12 con 563.6 ppm localizada en San Ignacio.

Este ion por si sólo no representa peligro tóxico alguno para la salud, sin embargo en presencia de sodio provoca la fijación de éste en el suelo creando un medio alcalino.

Cloruros

El cloro es un elemento que pertenece al grupo de los halógenos, es considerado como el más importante dentro del grupo, así como el más ampliamente distribuido en la naturaleza.

En el área estudiada la fuente principal de cloro la constituye la disolución de los minerales que forman las rocas ígneas.

Los valores de concentración oscilan de 2.5 ppm en el pozo 39 localizado en Los Caños y de 55.8 ppm para la obra 35 en El Salto del Salado.

Los resultados obtenidos no rebasan la norma máxima permitida de 250 ppm que establece la SEDESOL.

Sulfatos

Se pueden formar a partir de la oxidación de sulfuros en rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, igualmente se obtienen del intemperismo de rocas ígneas, de emanaciones volcánicas y de la lixiviación de suelos que contienen desperdicios orgánicos y fertilizantes.

Los pozos 60 y 61 reportan el menor valor encontrado con 1 ppm, en tanto que la máxima concentración es de 110 ppm para el pozo 44 (Viñedos Elizondo). En las obras 2 (San Antonio de Peñuelos) y 5 (Rústico Calpulli), este anión está en concentraciones menores 1 ppm.

Los valores encontrados no rebasan los límites máximos establecidos para los sulfatos, que es de 250 ppm.

Nitratos

La presencia de este ion en el agua subterránea, generalmente se asocia a la descomposición de materia orgánica o de elementos químicos de origen agrícola o industrial.

El valor más bajo fue de 4.4 ppm para las muestras 15 (El Saucillo) y 36, en tanto que el máximo valor determinado fue de 27.2 ppm, para la muestra del pozo 35 (El Salto del Salado).

El límite establecido por la SEDESOL es de 5 ppm, por lo que muchas de las muestras rebasan esta norma, reflejando con ello problemas en cuanto este anión se refiere.

Flúor

La solubilidad de este ion en general es limitada y al parecer contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua; se encuentra en concentraciones muy pequeñas en casi todo tipo de rocas y suelos, entre 0.1 y 1 ppm, pudiendo llegar a veces hasta 10 y raramente a 50 ppm en aguas muy sódicas con muy poco calcio. Esto es indicativo de actividad termal en el subsuelo.

Por lo que se refiere a los efectos que este ion provoca en la salud, parece jugar un papel muy importante en la conservación de la dentadura, creando problemas cuando está tanto por exceso como por defecto; la concentración óptima parece ser de 1 ppm.

La mínima concentración encontrada fue de 0.73 ppm que corresponde a la muestra 24, en tanto que la concentración máxima fue de 9.26 ppm en la muestra 38.

4.3 Calidad del agua

De las variaciones de iones encontrados en los análisis químicos de las aguas subterráneas muestreadas, se establece que en general no rebasan las concen-

traciones máximas permitidas por la SEDESOL; sin embargo hay muestras que sobrepasan las normas en algunos iones o metales pesados, lo anterior se muestra de forma resumida en la tabla 4.2.

TABLA 4.2 Obras que sobrepasan las normas permitidas para uso de agua potable

ACUIFERO DE AGUASCALIENTES

PARAMETRO ANALIZADO	ANALISIS ESPECIALES OBRAS QUE REBASAN LA NORMA PERMISIBLE PARA POTABILIDAD
Cr ⁺⁶ (LP=0.05)	NS
Pb ⁺⁺ (LP=0.05)	32, 45
Fe ⁺⁺ (LP=0.30)	NS
<p>32 = CLAVE FINAL DE LA MUESTRA</p> <p>NS = NO EXISTE OBRA QUE SOBREPASE EL LIMITE PERMISIBLE</p> <p>LP = LIMITE PERMISIBLE PUBLICADO EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION EL 13 DE DICIEMBRE DE 1989 [mg/l]</p>	

EXYCO S.A.

TABLA 4.2 Obras que sobrepasan las normas permitidas para uso de agua potable

ACUIFERO DE AGUASCALIENTES

ANALISIS MAYORITARIOS	
PARAMETROS ANALIZADOS	OBRAS QUE REBASAN LA NORMA PERMISIBLE PARA POTABILIDAD
pH (LP=8)	NS
DUREZA TOTAL (LP=75)	01, 02, 03,05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61
Ca ⁺⁺ (LP=200)	NS
Mg ⁺⁺ (LP=125)	NS
Cl ⁻ (LP=250)	NS
SO ₄ ⁼ (LP=250)	NS
NO ₃ ⁻ (LP=5.0)	01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 57, 58, 59, 60, 61
F ⁻ (LP=1.5)	01, 02, 05, 07, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 27, 29, 30, 31, 32, 34, 37, 38, 44, 45, 47, 48, 49, 58, 59, 60, 61
32 = CLAVE FINAL DE LA MUESTRA	
NS = NO EXISTE OBRA QUE SOBREPASE EL LIMITE PERMISIBLE	
LP = LIMITE PERMISIBLE PUBLICADO EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION EL 13 DE DICIEMBRE DE 1989 [mg/l] CON EXCEPCION DEL pH	

EXYCO S.A.

No obstante, se puede decir que en general predomina el agua de calidad química aceptable para uso potable. Sin embargo, en el plano 3 se muestran las áreas que presentan problemas en cuanto a límites permisibles para potabilidad se refiere.

Para determinar la calidad del agua para riego, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: salinidad del agua y la cantidad de sodio en relación a las cantidades de calcio y magnesio.

Los efectos nocivos más importantes producidos por el sodio es el aumento de la dureza. Este efecto es causado por el intercambio iónico del calcio y magnesio con el sodio, que tiene lugar en los coloides y suelos arcillosos.

La intensidad de este intercambio puede ser estimada por la relación de adsorción de sodio (RAS); esta relación se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{RAS} = \frac{r\text{Na}}{[(r\text{Ca} + r\text{Mg})/2]^{1/2}}$$

en donde $r =$ miliequivalentes/litro.

El valor del RAS indica la posibilidad de sodificación o de daños al suelo, ocasionado por el uso de agua de riego con alto contenido de sodio.

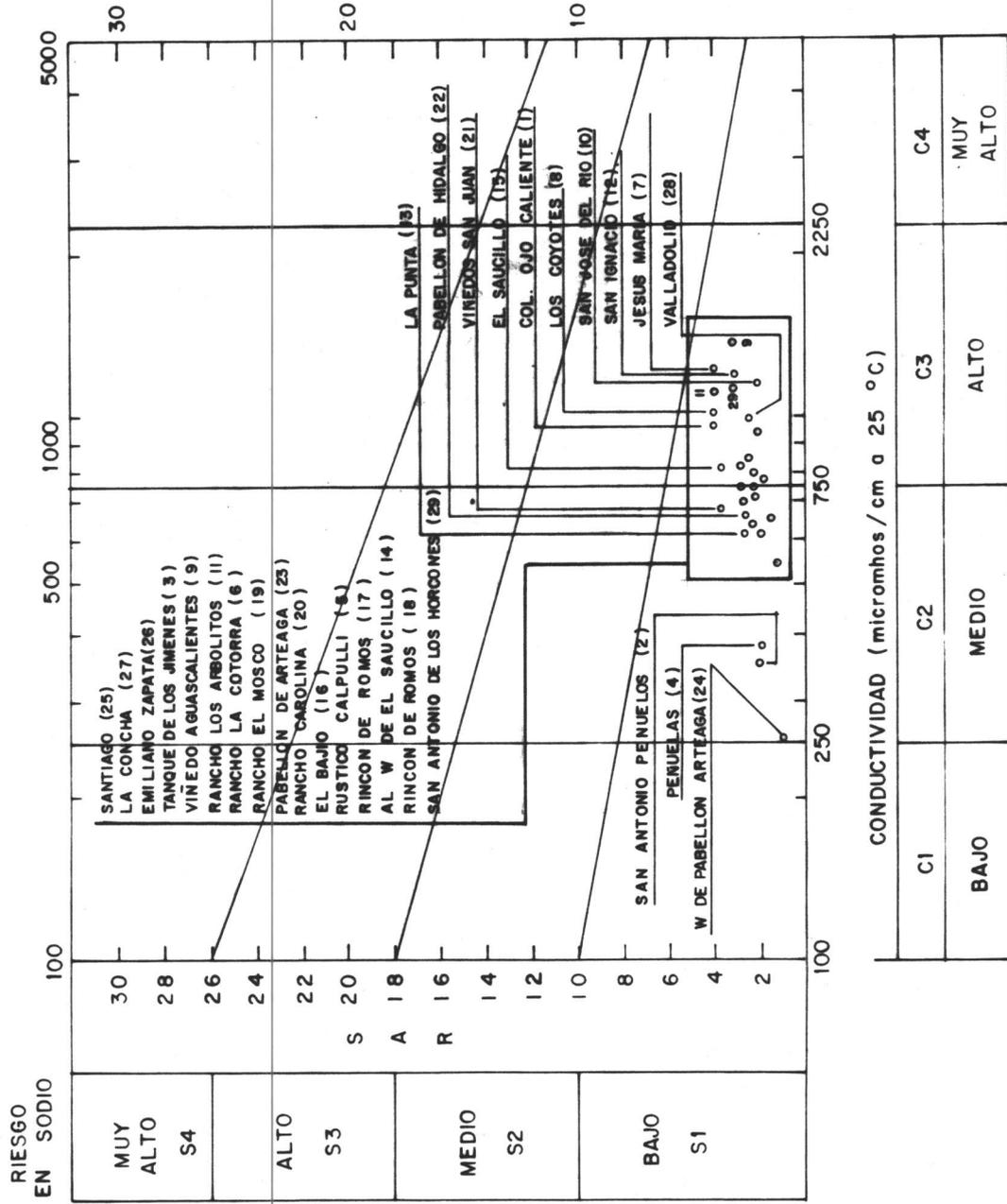
Los valores obtenidos del RAS y de la conductividad eléctrica se anotan en el diagrama de Wilcox; en este diagrama, en el eje de las ordenadas se vierten los valores de RAS, en tanto que en el eje de las abscisas se colocan los valores de la conductividad eléctrica.

Los resultados observados de las figuras 2 y 3 se consignan en la tabla siguiente:

**TABLA 4.3 CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO
ACUIFERO DE AGUASCALIENTES**

CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO	MUESTRAS	TOTAL DE MUESTRAS	PORCENTAJE
C ₁ -S ₁	NINGUNA	0	0 %
C ₂ -S ₁	2, 4, 5, 6, 13, 16, 17, 21, 22, 24, 25, 26, 30, 32, 33, 37, 39, 40, 41, 42, 45, 48, 51, 54	24	40 %
C ₃ -S ₁	1, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 23, 28, 29, 31, 33, 34, 35, 36, 43, 44, 46, 47, 49, 50, 52, 53, 57, 58, 59, 60, 61	35	59 %
C ₃ -S ₃	38	1	1 %

ACUIFERO DE AGUASCALIENTES



RIESGO EN LA SALINIDAD

ACUIFERO DE AGUASCALIENTES

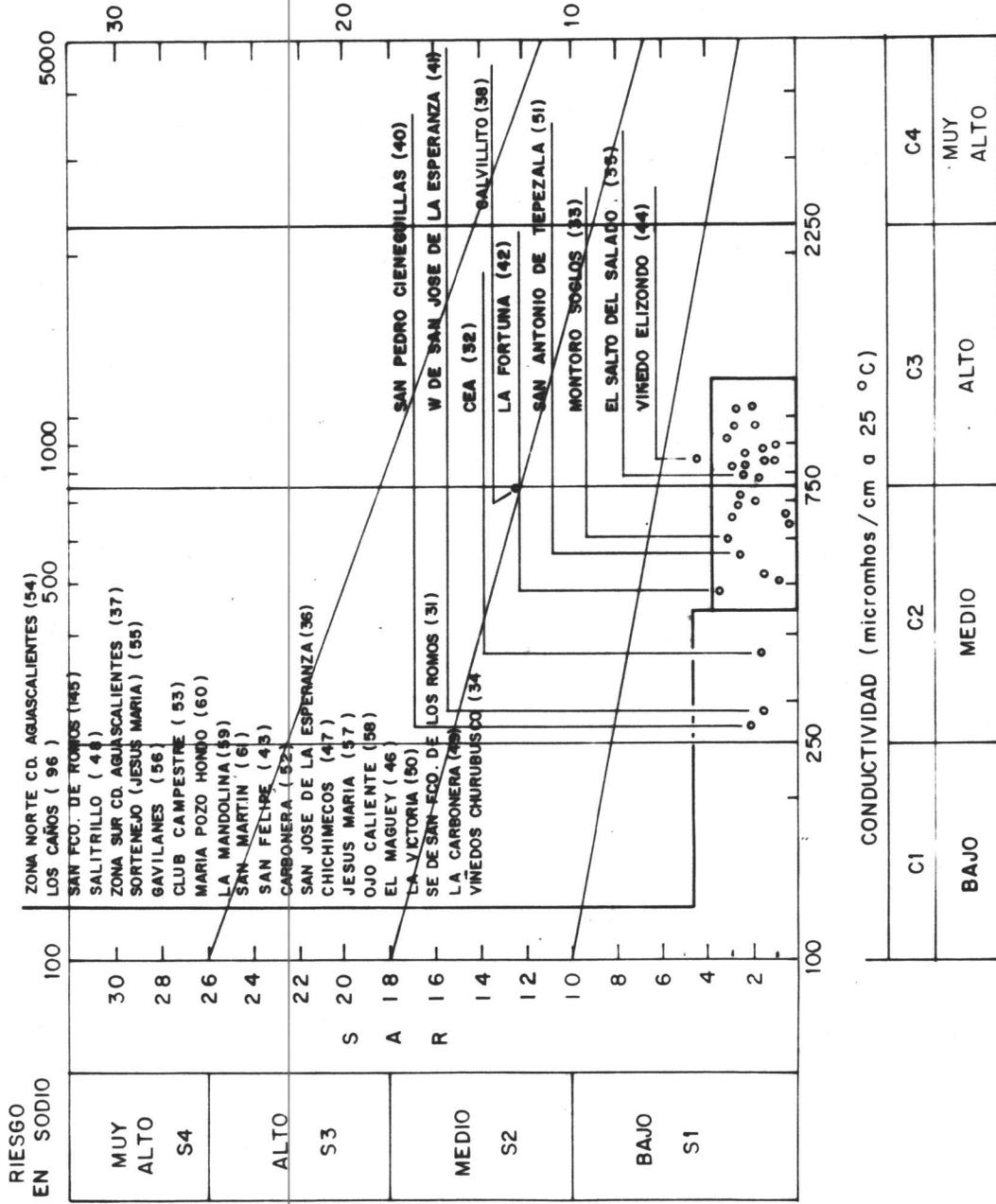


FIGURA 3

A continuación se describirá el significado de las clases resultantes, así como algunas recomendaciones para el uso de agua.

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (C)

C₁- Agua de baja salinidad. Este tipo de agua puede utilizarse para riego en la totalidad de los suelos y es recomendable para casi todos los sembradíos, prácticamente sin peligro de salinidad.

C₂- Agua de media salinidad. Se utiliza en todos los suelos excepto en aquellos de poca permeabilidad. Se recomienda para cultivo de plantas moderadamente tolerantes a las sales. En la mayoría de los casos no suelen ser necesarias precauciones especiales.

C₃. Aguas de alta salinidad. No puede utilizarse en suelos con drenaje deficiente, aún con buen drenaje se requiere una atención especial para el control de la salinidad. Sólo es recomendable usarse con cultivos que sean muy tolerantes a las sales.

C₄. Agua muy altamente salina. No es apropiada en condiciones ordinarias para el riego. Puede utilizarse con una selección de cultivos en suelos permeables, de buen drenaje y con exceso de agua para lograr un buen lavado.

RELACION DE ADSORCIÓN DE SODIO (S)

S₁- Agua con poco sodio. Puede emplearse para riego en casi todos los suelos sin peligro de que el sodio intercambiable llegue a niveles perjudiciales.

S₂- Agua con contenido medio de sodio. Es peligrosa en suelos de textura fina (arcillosos) y en aquellos que contengan una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavados leves, a menos que exista yeso en el suelo. Esta agua puede utilizarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.

S₃- Agua alta en sodio. En la mayor parte de los suelos puede alcanzarse un límite de toxicidad de sodio intercambiable, por lo que es preciso un buen drenaje, lavados intensos y adiciones de materia orgánica. En los suelos yesíferos el riesgo es menor.

S4- Agua con muy alto contenido de sodio. Generalmente no es apropiada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la solución del calcio del suelo o la utilización de yeso u otros mejoradores hagan factible el uso de esta clase de agua.

Como conclusión y con base en las figuras 2 y 3, se determina que el riesgo en la salinidad en este valle es medio a alto. Por otro lado, el riesgo en sodificación es bajo.

4.4 Validación de análisis químicos.

Como una parte importante para determinar tanto el historial como la evolución geoquímica del acuífero, fue necesario evaluar el grado de confiabilidad de los análisis químicos realizados tanto en estudios anteriores como en éste.

Para la validación de los resultados anteriores se utilizó el programa GW (Groundwater) de las Naciones Unidas, mientras que los análisis efectuados por esta empresa se utilizó tanto el GW como el WATEQ-F, ya que son programa aceptados mundialmente y que además se tienen en uso en la CNA.

Es importante mencionar que en los términos de referencia del presente trabajo, se indica que para la validación de resultados deberá utilizarse el paquete CHEMAN; sin embargo, una vez analizadas las ventajas y desventajas de su uso con respecto al GW y al WATEQ-F, se consideró que éstos últimos presentaban ciertas ventajas como son:

En el programa WATEQ-F (utilizado también para el cálculo del Equilibrio Químico), el cálculo de las sumas de cationes y aniones se realiza "analíticamente" (suma aritmética) y mediante un balance de masas, el cual sirve como base para el equilibrio químico y que se diferencia del anterior como la suma de cationes y aniones "computadas". De esta manera, estos resultados se utilizan para establecer el error de los análisis químicos, ya que el programa WATEQ-F no realiza los cálculos subsecuentes si se encuentra un error en el análisis químico mayor al 15%.

En forma paralela, el programa GW permite seleccionar el índice de error permitido, que en este caso no fue mayor al 10%.

Estos programas en su conjunto superan en calidad analítica e hidrogeoquímica el propuesto por CNA, por lo que el análisis de los resultados químicos se basó en estos programas. Además, al aplicar las formulas que

propone el CHEMAN, con los resultados del WATEQ-F, en lo referente a las sumas de cationes y aniones computados, se aprecia una gran inconsistencia en el análisis para el error permisible, lo que puede significar que la fórmula que se propone en el Artículo Técnico del CHEMAN, pudiera estar equivocado.

De esta manera, los resultados obtenidos por el GW para los análisis históricos efectuados en el valle y que en este caso sólo son los de 1972, indican que para los 168 aprovechamientos, el 83.1% del total presentan un error menor al 10%; 30 obras que representan al 17% del total, arrojaron un error mayor de 10%. Es importante destacar que la mayoría de estas obras fueron analizadas en varias ocasiones durante ese año, en muchas de las cuales presentaron un error mayor al 10% por no tener el análisis completo, mientras que en otras al ser éste completo, el error fue menor al 10%.

En base a este comportamiento, se concluye en términos generales que los análisis de 1972 se encuentran en un aceptable grado de validez, considerando que una misma obra fue analizada en varias ocasiones y que cuando se realizó su análisis completo, siempre tuvo un error menor al 10%.

En el anexo de análisis históricos se presentan los diagramas de Stiff, obtenidos a partir de esta validación en las obras que no rebasan el 10% de error y que tienen además el análisis completo de iones mayoritarios.

Por lo que se refiere a los análisis de 1993, la validación con el paquete GW indicó que de las 60 obras muestreadas, solo dos de ellas presentaron un error mayor al 10% (pozos 10 y 59), que equivalen al 3% del total, teniendo por lo tanto, que el 97% de los análisis presentan un error menor al 10%, lo que indica un alto grado de validez en los mismos.

4.5 CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DE LOS ACUIFEROS

4.5.1 Introducción

La composición química del agua dentro de un acuífero, se ve modificada desde el momento de la infiltración en las áreas de recarga, hasta las zonas de descarga. De esta manera, su química inicial se ve alterada por una variedad de procesos geoquímicos derivados de la interacción agua-roca así como por el tiempo de permanencia del agua en el subsuelo.

El proceso más común, es la disolución de minerales que incrementan el total de sólidos totales disueltos en el agua a lo largo de su trayecto; sin embargo, existen otros procesos que pueden presentarse durante su recorrido como son: Intercambio Iónico, Oxidación-Reducción, Difusión, Mezcla, Dilución, Fijación y Adsorción entre otros.

La caracterización hidrogeoquímica del valle de Aguascalientes, se realizó con los resultados de los análisis fisico-químicos efectuados en los 60 sitios de este estudio.

Con los resultados de laboratorio, se procedió a obtener la clasificación geoquímica de las aguas a través del programa GW, mismo que se utilizó para generar los Diagramas de Stiff, Piper y Wilcox (éste último descrito ya en el apartado anterior); para su análisis estadístico, se empleo el programa Statgraphics en su versión 5.0;asimismo, para tener una visión espacial en la variación de los principales parámetros y concentraciones ionicas, se elaboraron las configuraciones respectivas, que apoyaron a identificar las zonas de recarga, descarga y dirección del flujo subterráneo. Con respecto a la forma en que se elaboraron las configuraciones, es oportuno mencionar que éstas se hicieron en forma manual en sustitución de los medios magnéticos, debido principalmente a que el primero hace intervenir el aspecto hidrogeológico, mientras que en el

segundo interviene sólo el mecánico.

Como un apoyo importante en el planteamiento del modelo hidrogeoquímico, se elaboraron gráficas de relaciones iónicas de calcio, magnesio, sodio y sulfatos contra cloruros. Finalmente, se corrió el programa WATEQ-F para establecer la condición de equilibrio químico y verificar los procesos geoquímicos identificados.

De esta forma, en el presente capítulo se analizarán en diferentes apartados la "Zonificación Hidrogeoquímica", la "Evolución en la Concentración del los Parámetros Físico-Químicos del Agua" y la "Descripción del Modelo Hidrogeoquímico".

En el primer apartado se describirá como es la distribución de los diferentes parámetros analizados en la zona de estudio, sin hacer mucho énfasis en los procesos o fenómenos que provocan variaciones en las concentraciones; es un apartado de tipo descriptivo.

En el apartado de "Evolución en la Concentración de los Parámetros Físico-Químicos", se describe con base a una comparación entre las configuraciones realizadas en estudios anteriores y las elaboradas en el presente trabajo, los cambios en la magnitud y distribución de las concentraciones.

Finalmente en el apartado donde se hace la "Descripción del Modelo Hidrogeoquímico", se explican ampliamente las razones por las cuales se tienen determinadas concentraciones en los parámetros analizados, asociando lo anterior a procesos naturales (litología), antrópicos o ambos.

4.5.2 Zonificación hidrogeoquímica

En el valle de Aguascalientes los diagramas de Stiff (plano 4), muestran que existen dos tipos de agua:

- I - Aguas Bicarbonatada-Sódica
- II - Aguas Bicarbonatada-Cálcica

Su distribución en la región es claramente dominada por aguas de tipo I, y en los sitios donde existen aguas del tipo II, éstas son limitadas a su alrededor por las de tipo I.

De acuerdo a ésta distribución, se identificaron dos zonas hidrogeoquímicas:

Zona I. En ésta el agua predominante es Bicarbonatada-Sódica (tipo I) y abarca la mayor parte del valle, desde su parte norte hasta la ciudad de Aguascalientes.

Zona II. En ésta el agua es de tipo Bicarbonatada-Cálcica (tipo II) y se limita sólo a la parte sur, sureste y suroeste de la ciudad de Aguascalientes, así como a la zona este y oeste de la población de Pabellón de Arteaga

De la zonificación anterior, se plantearon las primeras hipótesis sobre el funcionamiento hidrogeoquímico del valle, y que fueron tomadas como referencia durante el análisis del comportamiento espacial de los iones.

De las conclusiones más importantes destacan:

- a) La ubicación de aguas Bicarbonatadas-Sódicas (tipo I), con zonas en donde es posible, tanto una rápida infiltración hacia el acuífero con un tránsito por rocas volcánicas ácidas, como a la presencia de horizontes arcillosos. Este tipo de agua se asocia con aguas de reciente

infiltración siempre y cuando su contenido salino sea bajo. La presencia de sodio se asocia con la alteración de los feldespatos durante la circulación del agua por las riolitas, así como por un probable intercambio iónico.

- b) El tipo de agua Bicarbonatada-Cálcica (tipo II) también indica una posible agua de reciente infiltración si su contenido salino es bajo, pero a diferencia del agua tipo I, su circulación ha sido preferentemente por medios granulares con bajo contenido de arcillas y ocasionalmente por rocas carbonatadas.

Al analizar las variaciones de los iones principales dentro del diagrama de Stiff, se encontró que la mayoría de ellos presentan porcentajes muy semejantes dentro del grupo de los cationes, como son en este caso los porcentajes de calcio y sodio, por lo que podrían ser clasificadas también como aguas Bicarbonatadas-Sódicas y/o Cálcicas, lo que estaría indicando aguas de reciente infiltración con un tránsito del agua no sólo por rocas volcánicas, sino también por materiales granulares al presentar un enriquecimiento semejante en calcio.

En cuanto al comportamiento en los aniones, aquí si se observa un claro predominio del Bicarbonato sobre los demás iones, lo cual está indicando efectivamente, que el agua es de reciente infiltración

Estas ligeras variaciones en los iones principales, indican que existen zonas en el valle como las de la parte sur, sureste y suroeste de la ciudad de Aguascalientes, donde existen tipos de aguas secundarias cuya semejanza en los porcentajes es motivado por la circulación en medios volcánicos y granulares o por los procesos geoquímicos que intervienen.

Con objeto de profundizar en el conocimiento de la caracterización hidrogeoquímica del valle, así como para comprobar las hipótesis descritas anteriormente, se analizó el comportamiento espacial de algunos parámetros físico-químicos.

De esta manera, sabiendo que de acuerdo con Matthes (1982), el agua subterránea cambia de composición química durante su trayectoria a través de un acuífero porque siempre, en cierto grado, están ocurriendo una serie de procesos como Disolución, Intercambio Ionico, etc., se elaboró la configuración de sólidos totales disueltos (STD), ya que éstos son una medida del contenido de los constituyentes disueltos en el agua, que comprende a las sustancias

disociadas y a los pares iónicos (sustancias no disociadas); su comportamiento espacial permite además de forma general, identificar las zonas de recarga, descarga y dirección del flujo subterráneo.

En la configuración de STD del plano 5, se observa que los valores menores a 400 ppm se ubican en las estribaciones de las sierras tanto del este como del oeste que limitan al valle, incrementándose a partir de estas zonas hacia el centro del mismo; aquí, los valores de los STD son del orden de 500 ppm, presentándose en la parte oeste de la ciudad de Aguascalientes los valores más altos de toda la región, siendo éstos de 750 ppm en promedio.

Este comportamiento en los valores de los STD, sugiere en términos generales que el flujo subterráneo en el valle proviene del norte, teniendo aportaciones importantes de las sierras que lo limitan lateralmente, mientras que el incremento que se presenta al oeste de la ciudad de Aguascalientes, es provocado probablemente por una concentración en la explotación en esa zona.

Para complementar el conocimiento en el comportamiento de los demás parámetros analizados y para confirmar la hipótesis del flujo subterráneo establecida en párrafos anteriores, se realizaron las configuraciones de: conductividad eléctrica (CE), cloruros, calcio, sulfatos, sodio, flúor, temperatura y

nitratos.

De esta manera, la configuración de la conductividad eléctrica (CE) en el valle (plano 6), la cual de acuerdo a su comportamiento puede indicar también al igual que los STD la dirección del flujo subterráneo, muestra dos zonas que presentan incremento en sus valores, pero de diferente origen: la primera se ubica al norte del área, entre la población de Pabellón de Arteaga y Rincón de Romos, en donde las curvas incrementan su valor de poniente a oriente, desde 400 hasta 900 micromhos/cm; este incremento indica que el agua se mueve por un medio granular y en dirección también poniente-oriente, pero a medida que se acerca al río San Pedro (conocido también como río Aguascalientes), se mezcla con aguas que han circulado incipientemente por un medio carbonatado, siendo esta la razón de que se tenga un incremento de 500 micromhos/cm, en una distancia aproximada de 13 km.

Hacia la parte central del valle, se observa un incremento de forma concéntrica en los valores, que comprende una franja aproximada de 20 Km al oeste de la ciudad de Aguascalientes en dirección norte-sur, desde Jesús María hasta la ranchería "La Cotorra"; en esta zona se tiene un incremento en la CE de 600 a 1200 micromhos/cm, que indican que hacia esa parte confluye el flujo subterráneo; de forma puntual se presentó en el pozo 44 al W del poblado de

Valladolid, la curva más alta en CE de todo el valle, con 1300 micromhos/cm.

Por otro lado, el comportamiento de los cloruros (plano 7) es de gran ayuda, ya que es un buen trazador natural en el agua subterránea, al ser un ion que difícilmente precipita además de ser conservativo; las curvas de isovalores de este ion muestran un comportamiento similar al de la CE, ya que en la parte norte de valle las curvas incrementan su valor de 6 a 15 mg/l con dirección oeste-este; hacia la parte centro y sur de la zona, aumentan progresivamente las concentraciones de 6 a 15 mg/l en promedio, destacandose de manera importante el pozo 35, al sur de San José de la Esperanza, en donde se obtuvo un valor de 55.8 mg/l.

Hacia las estribaciones de la sierra del oriente, se observan dos comportamientos en las concentraciones de cloruros, uno comprende valores del orden de 10 mg/l, en la zona que está entre Aguascalientes y Pabellón de Arteaga; el segundo presenta valores menores y se ubica de la ciudad de Aguascalientes hacia el sur, en la zona próxima a la sierra, la parte norte de la población de Calvillo marca este cambio; por lo que toca a las variaciones entre el centro del valle y la sierra de la parte oeste, se observa que los valores más bajos en cloruros se ubican tanto en los pozos ubicados al oeste de Pabellón de Arteaga, como los del suroeste del área de estudio, entre los ranchos "La Cotorra" y "Las Cañas",

donde en ambos casos las concentraciones fueron inferiores a 6 mg/l, (valores representativos de áreas de recarga). En los pozos localizados al oeste de la ciudad de Aguascalientes, se observa que las concentraciones son del orden de los 15 mg/l, indicativas también de aguas con tiempos de residencia relativamente cortos en el acuífero.

En cuanto a la distribución iónica del calcio (plano 8), muestra el mismo comportamiento que los descritos anteriormente, sólo que en este caso se distinguen tres zonas: la primera se ubica entre Rincón de Romos y Pabellón de Arteaga, en donde las concentraciones se incrementan de noroeste a sureste de 30 a 50 mg/l; la razón de este aumento es la presencia (mezcla) de aguas que han circulado por medios carbonatados. La segunda zona se localiza al oeste de la población de Valladolid, en donde los valores aumentan de 50 a 90 mg/l. La última zona comprende de la ciudad de Aguascalientes hasta 15 Km al suroeste de la misma, donde las curvas se comportan de forma concéntrica con valores de 50 a 100 mg/l, lo que indica que hacia esa zona se dirige el flujo subterráneo.

La distribución de los sulfatos (plano 9), se comporta de igual forma que los parámetros anteriores, oscilando los valores en la parte norte entre 20 y 50 mg/l (zona de Pabellón de Arteaga), en la región de Valladolid entre 40 y 100 mg/l y por último al suroeste de la ciudad de Aguascalientes, los valores están

entre 40 y 70 mg/l. Por otro lado a diferencia del calcio, se aprecia hacia el sureste de la población de San Francisco de los Romo, que los valores se incrementan en dirección oeste-este hacia el pozo 31, de forma contraria a como lo manifestó el calcio. Las concentraciones encontradas para este ion son el resultado del lavado del terreno, acumulado en condiciones de gran aridez.

En cuanto a las concentraciones encontradas para el ion flúor (plano 10), éstas presentan variaciones desde menos de 1 mg/l hasta más de 6 mg/l; los valores más bajos corresponden a los pozos ubicados entre las rancherías San José de la Esperanza, tanque de los Jiménez y Las Cañas, así como los que se localizan en la franja que va del norte de la ciudad de Aguascalientes, pasa por Valladolid y llega a la zona que está entre San José del García y Pabellón de Arteaga (pozos 24 y 25). Las concentraciones más elevadas se localizan en las obras ubicadas al este y oeste de la ciudad de Aguascalientes (pozos 1 y 12), así como en la obra 2 ubicada en la rancharía Antonio de Pañuelos, al sur del área de estudio.

Las altas concentraciones en este ion, corresponden casi siempre con zonas donde se tienen temperaturas superiores a 25 °C, tal y como puede observarse en el plano 11, donde se configuró la temperatura del agua tomada en campo.

Debido al comportamiento que presenta el flúor, se configuraron las concentraciones de sodio, ya que algunos investigadores como Custodio (1974), consideran que las aguas naturales con elevados contenidos en sodio, suelen tener también contenidos elevados en flúor; comparando las curvas de isovalores del sodio (plano 12), con las de flúor, se observa que efectivamente las zonas con concentraciones mayores a 70 mg/l en sodio, corresponden con aquellas en donde los valores de flúor son mayores a 1.5 mg/l, como las ubicadas en las inmediaciones de Pabellón de Arteaga y en la ciudad de Aguascalientes.

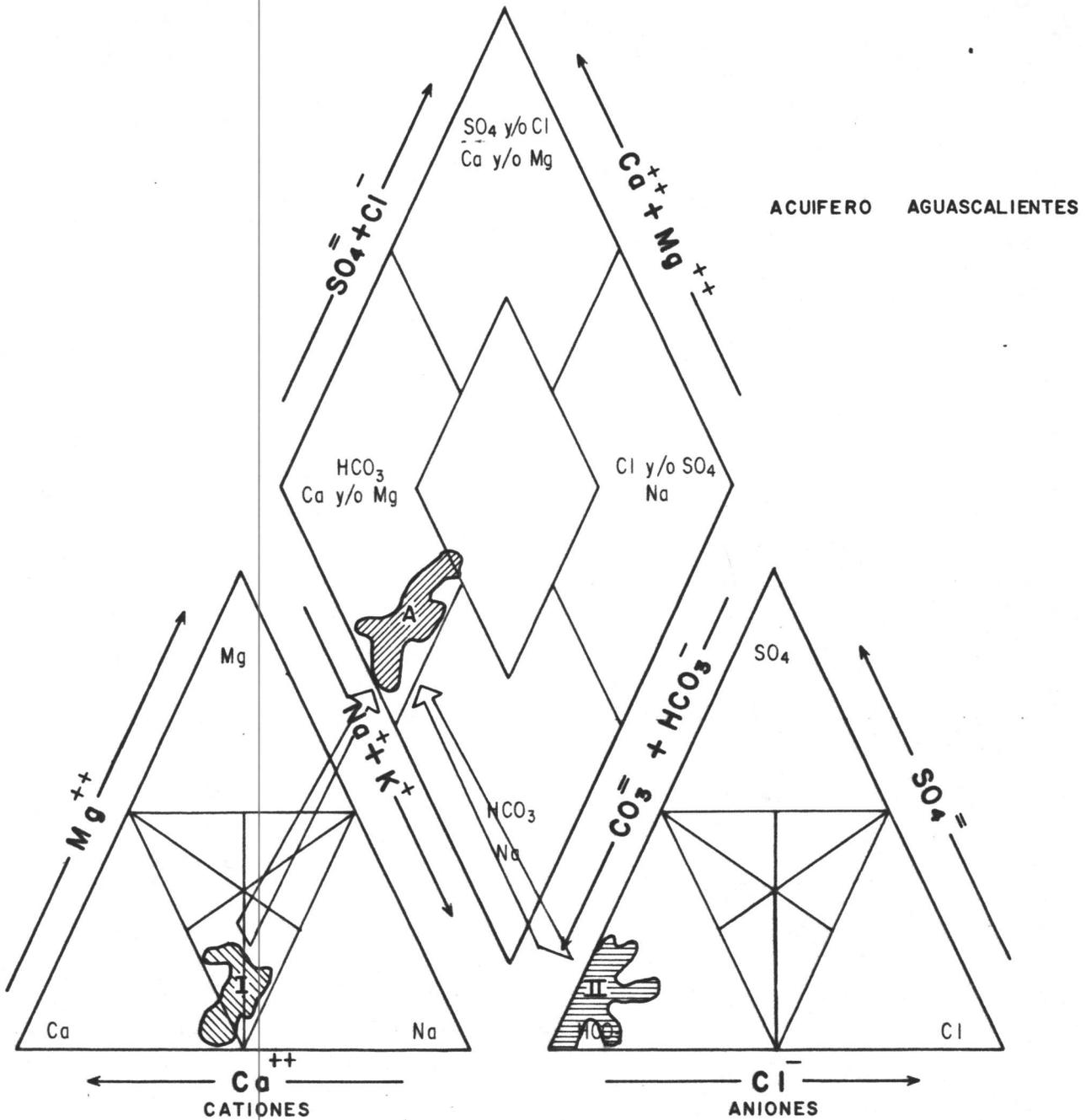
El comportamiento iónico mencionado anteriormente, confirma lo expuesto durante la descripción de los diagramas de Stiff (plano 4), donde se observa que a lo largo del valle existe poca variación en los polígonos, ya que desde la parte norte del área de estudio, hasta la ciudad de Aguascalientes el tipo de agua es bicarbonatada-sódica, aún en las obras ubicadas en el extremo noreste de Pabellón de Arteaga (50, 51 y 52), las cuales sólo muestran un incremento del calcio, evidenciando la proximidad de las calizas que afloran hacia el este.

En cuanto a las obras ubicadas al sur y suroeste de la ciudad de Aguascalientes, el agua es de los tipos bicarbonatada-sódica y bicarbonatada-cálcica, predominando la primera, lo que evidencia flujo a través de rocas volcánicas ácidas y de medios granulares.

Por lo que toca a la representación gráfica a través de los diagramas de Piper (figura 4, 5 y 6), se observa que las obras en general presentan poca evolución iónica, ya que por el relativo predominio de bicarbonatos sobre los otros iones, se infiere que el agua tiene un tiempo de estancia en el acuífero relativamente corto; en el caso de los cationes no se observa un comportamiento bien definido, lo cual se atribuye a la mezcla de aguas en de todo el valle, pues no obstante que el flujo regional es norte-sur, se presentan aportes laterales de las sierras del oeste y este, así como un flujo sur-norte en la ciudad de Aguascalientes.

En cuanto a la determinación de la concentración de parámetros especiales en el valle como son: nitratos, plomo, fierro y cromo hexavalente, sólo los dos primeros se encuentran por encima del límite establecido para consumo humano (plano 3).

FAMILIA BICARBONATADA CALCICA - SODICA



I AGUA CALCICA - SODICA

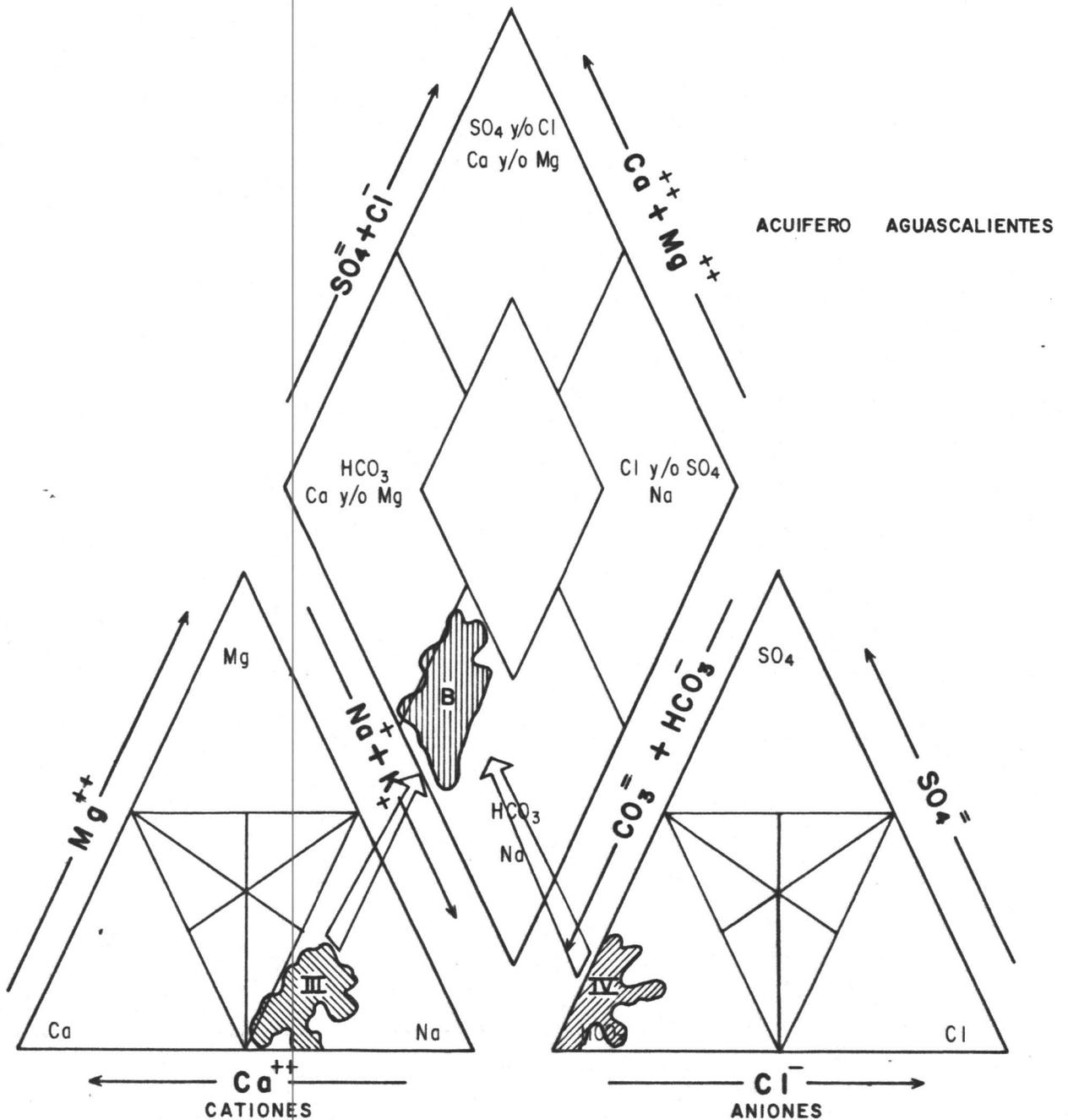
II AGUA BICARBONATADA

AGUA TIPO A:

En depósitos conforma el agua que ha fluido por rocas ígneas, fracturadas y depósitos granulares.

Por la alta concentración relativa de bicarbonatos se le considera de reciente filtración los contenidos en calcio y sodio reflejan su circulación por rocas volcánicas y materiales granulares.

FAMILIA BICARBONATADA SODICA



III AGUA SODICA

IV AGUA BICARBONATADA

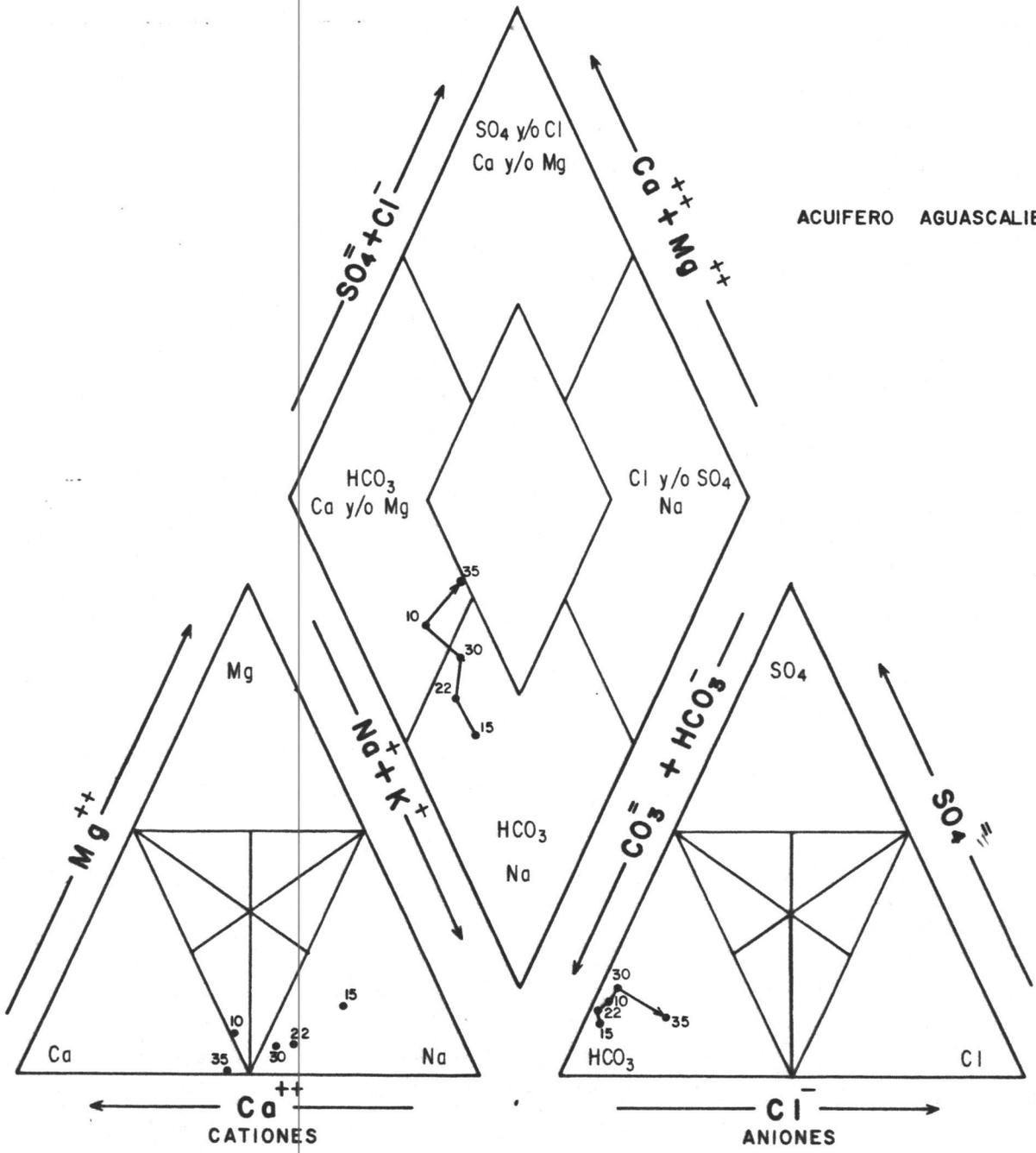
AGUA TIPO B :

Conforma el agua que ha fluido a través de rocas ígneas fracturadas de composición riolítica.

Por el predominio de bicarbonatos se le infiere un reducido tiempo de residencia en el acuífero, debido al alto grado de fracturamiento que exhiben estas rocas, originando con ello que el agua circule rápidamente: Las obras son representativas de las zonas de recarga.

DIRECCION DEL AGUA SUBTERRANEA

ACUIFERO AGUASCALIENTES



→ DIRECCION DEL FLUJO SUBTERRANEO

Enriquecimiento en aniones de HCO₃ → SO₄ sin llegar a definirse claramente.
 En los cationes no se observa un patrón bien definido, quizás por la influencia de la mezcla de aguas.

FIGURA 6

Para el caso de los nitratos (plano 13), únicamente los pozos 15 y 36 ubicados al norte y sur del valle respectivamente, contienen concentraciones menores a 5 mg/l, que es el límite máximo permitido para su consumo, obteniéndose en ambos casos 4.4 mg/l; los valores promedio en la región se encuentran en 10 mg/l, siendo el pozo 35 ubicado al sur del rancho San José de la Esperanza, el que presenta los valores más elevados con 27 mg/l.

Como es conocido el origen de los nitratos en el agua subterránea se debe principalmente a la contaminación por descargas de desechos municipales e industriales, a la descomposición natural de la materia orgánica, así como a microorganismos derivados de abonos orgánicos; de acuerdo a las concentraciones encontradas en la zona, los valores más elevados se ubican en zonas agrícolas y ganaderas, con lo cual la fuente de contaminación deben ser los desechos emitidos y los abonos empleados por las rancherías diseminadas al norte y sur del área de estudio.

Por lo que toca a los valores encontrados para el plomo, los 12 aprovechamientos que rebasan el límite permitido para consumo humano, se encuentran distribuidos en todo el valle, por lo que no existe un foco específico de contaminación, como podría ser una industria metal-mecánica; por lo anterior se considera que la probable fuente de origen de este ion debe encontrarse cerca

del pozo, como puede ser la lixiviación de algunos desechos metálicos de las propias rancherías, por las mismas reacciones físico-químicas de las tuberías de los pozos, o también puede deberse a residuos en el pozo provenientes de los lubricantes o combustibles derivados de su antigua operación, cuando se hacía mediante motores de combustión interna.

4.5.3 Evolución en la concentración de parámetros físico-químicos del agua

Una parte importante del presente trabajo, consistió en determinar la evolución en la concentración físico-química del agua, para lo cual se analizaron y compararon las configuraciones iónicas y los parámetros estadísticos realizados en trabajos anteriores, siendo útiles para este caso sólo parte de las reportadas en el "Estudio Hidrogeológico del acuífero de Aguascalientes", realizado por la Cía. Ariel Construcciones S.A. en el año de 1971, ya que los datos químicos obtenidos en el estudio "Transporte de Contaminantes en Acuíferos", efectuado por el IMTA en 1990, no se utilizaron para el análisis de evolución, debido a que en el mencionado trabajo se indica que "no se dispuso de determinaciones directas de laboratorio de todos los iones mayoritarios, algunos de éstos han sido calculados o deducidos en base a relaciones entre ellos", perdiéndose de esta manera el grado de validez requerido para un análisis de éste tipo. Lo

anterior se confirma con los valores de la tabla 4.4., donde se aprecia una homogeneidad en todos los parámetros estadísticos de 1984 a 1990, que fue el período donde se obtuvieron por deducción varios iones mayoritarios.

**TABLA 4.4 COMPARACION DE PARAMETROS ESTADISTICOS
1972-1993
ACUIFERO DE AGUASCALIENTES**

	VARIABLE					
	MINIMO (mg/l)	MAXIMO (mg/l)	PROMEDIO (mg/l)	MEDIANA (mg/l)	COEFICIENTE DE VARIACION * (%)	
Ca ⁺⁺	1972	28.7	87.8	63.2	60.0	33.7
	1984	22.0	90.6	48.6	48.9	43.0
	1985	18.0	89.8	43.6	44.5	46.0
	1986	17.6	95.8	49.7	47.3	47.4
	1987	16.4	105.0	50.4	49.3	48.1
	1988	12.4	101.8	47.2	46.5	45.2
	1989	14.4	97.0	48.6	46.5	43.9
	1993	17.5	105.6	52.7	50.4	37.7
Mg ⁺⁺	1972	0.0	17.4	5.8	4.4	105.3
	1984	9.9	18.9	13.9	13.6	16.9
	1985	5.8	17.9	10.7	10.7	23.6
	1986	6.3	15.6	9.9	9.7	19.6
	1987	8.0	21.2	11.4	10.7	26.3
	1988	1.5	25.0	6.6	5.4	77.6
	1989	3.7	21.2	7.1	6.1	47.6
	1993	0.5	24.0	7.0	7.0	67.5
Na ⁺	1972	35.7	169.5	95.1	76.5	58.2
	1984	13.8	173.8	50.5	47.1	65.8
	1985	25.8	202.8	63.1	60.2	49.8
	1986	0.0	109.4	42.6	39.1	59.1
	1987	7.4	113.3	41.6	35.4	61.6
	1988	24.4	120.2	59.9	57.5	44.2
	1989	18.4	158.9	58.8	54.5	55.8
	1993	20.4	187.5	73.2	70.8	41.4

**TABLA 4.4 COMPARACION DE PARAMETROS ESTADISTICOS
1972-1993
ACUIFERO DE AGUASCALIENTES
(Continuación)**

		VARIABLE				
		MINIMO (mg/l)	MAXIMO (mg/l)	PROMEDIO (mg/l)	MEDIANA (mg/l)	COEFICIENTE DE VARIACION * (%)
HCO ₃ ⁻	1972	188.5	634.6	416.0	405.2	41.5
	1984	167.2	636.9	277.3	255.0	36.4
	1985	181.8	787.1	304.4	278.2	39.2
	1986	134.2	550.3	270.6	259.9	35.4
	1987	134.2	549.1	257.8	247.7	38.2
	1988	141.6	530.8	263.3	239.2	34.9
	1989	133.0	575.9	269.8	246.5	41.5
	1993	114.7	563.6	331.8	319.6	28.8
Cl ⁻	1972	17.0	45.8	32.7	32.2	26.1
	1984	4.6	25.5	13.4	12.4	48.9
	1985	3.5	24.5	11.9	10.6	53.8
	1986	3.5	41.8	12.5	9.9	65.5
	1987	4.6	25.9	12.1	9.2	57.3
	1988	3.5	27.3	11.3	8.2	59.0
	1989	3.9	28.4	12.2	10.9	58.2
	1993	2.5	55.8	10.3	8.6	78.9
SO ₄ ⁼	1972	8.3	69.2	38.0	32.6	51.9
	1984	9.4	06.0	41.6	37.9	63.4
	1985	6.4	50.3	26.7	25.6	38.5
	1986	1.9	48.3	16.7	15.3	77.1
	1987	3.9	148.9	35.8	32.1	86.3
	1988	6.4	146.9	43.2	39.9	76.9
	1989	3.9	148.9	39.5	34.0	82.3
	1993	0.0	110.0	37.6	37.0	64.3

* Coeficiente de variación = desviación standard/promedio

De esta manera, en el análisis estadístico de 1972 y 1993 se encontró para el primer caso, que en una población de 7 muestras, el calcio se presenta en un rango de 28 a 87 ppm con un promedio de 63 ppm y un coeficiente de variación de 33%; el magnesio varía entre 0.01 y 17 ppm, tiene un promedio de 5 ppm y

un coeficiente de variación de 105%; por su parte el sodio se encuentra desde 35 hasta 169 ppm, tiene un promedio de 95 ppm y un coeficiente de variación del 58%.

Por lo que toca a los aniones para 1972, el bicarbonato varía entre 188 y 634 ppm, presenta un promedio de 416 ppm y tiene un coeficiente de variación del 41%; el sulfato se presenta en un rango de 8 a 69 ppm, un promedio de 38 ppm y un coeficiente de variación de 51%; el cloruro varía de 17 a 45 ppm, con un valor medio de 32 ppm y un coeficiente de variación del 26%.

Es importante aclarar, que si bien en el apartado 4.4. se mencionó que el análisis de validación se hizo para 168 obras, fueron realmente 7 las que contaron en todos los casos con el análisis completo, siendo éstas las que se consideraron en el análisis estadístico descrito en el párrafo anterior.

En cuanto a los datos de 1993, con un muestreo en 60 aprovechamientos, se encontró que el calcio presenta un rango de 17 a 105 ppm, con un promedio de 52 ppm y un coeficiente de variación del 37%; el magnesio varía desde 0.5 a 24 ppm con un promedio de 7 ppm y un coeficiente de variación del 67%; el sodio se presenta desde 20 ppm hasta 187 ppm con un promedio de 73 ppm y un coeficiente de variación del 41%.

Con respecto a los aniones, el bicarbonato se presentan con un mínimo de 114 ppm y un máximo de 563 ppm teniendo un promedio de 331 ppm y un coeficiente de variación del 28%; el cloruro varía desde 2 hasta 55 ppm con un promedio de 10 ppm y un coeficiente de variación del 78%; por su parte el sulfato varía desde 0 hasta 110 ppm con un promedio de 37 ppm y un coeficiente de variación del 64%. El resto de los parámetros estadísticos para ambos años se pueden consultar en el anexo correspondiente.

De este análisis comparativo, se observa que existe en general una cierta similitud en todos los parámetros estadísticos para ambos años, lo que indica que la explotación sigue siendo en la actualidad, sobre los mismos niveles acuíferos que en 1972, no obstante de que existen zonas como la de la parte oeste de la ciudad de Aguascalientes, donde la extracción se ha intensificado en los últimos años, pero que no presentan evidencias en la composición química del agua, de estar explotando niveles acuíferos más profundos.

Para confirmar lo anterior, se comparó la configuración reportada de sólidos totales disueltos (STD), de 1972 y 1993; de esta comparación se observa que en la región de Rincón de Romos y Pabellón de Arteaga se tienen prácticamente las mismas concentraciones en ambos años, ya que en 1972 se reportaron entre 500 y 700 ppm y en 1993 se obtuvieron 500 ppm en promedio; este mismo comportamiento en evolución se observó en el resto del valle, sin

embargo, en donde si se aprecia una diferencia, es en el comportamiento de las isoclinas, ya que en 1972 su trazo para la parte norte es paralelo a ambas sierras, cambiando progresivamente hacia el sur, hasta ser prácticamente perpendiculares a las mismas, conservándose este mismo comportamiento para toda la parte sur del valle. Por lo que toca a su distribución para 1993, se aprecia tal y como ya se comentó anteriormente en la descripción de la CE del apartado anterior, que se tienen dos comportamientos: uno para la parte norte en donde se conserva el mismo trazo que en 1972, y otro hacia el centro y sur del valle, que es concéntrico hacia la ciudad de Aguascalientes, siendo precisamente esta forma de las isoclinas las que difieren con respecto a 1972.

La diferencia observada en el comportamiento para 1993, es originada como ya se comentó, por la sobreexplotación existente en la zona de la ciudad de Aguascalientes y en la parte poniente de la misma.

En cuanto a la evolución en la concentración de sulfatos, cloruros y bicarbonatos, que son los iones analizados y configurados en 1972, no se encontró prácticamente ninguna variación para 1993, salvo el comportamiento en el trazo que se describió anteriormente.

Por lo que toca a la evolución iónica de los resultados del trabajo del IMTA de 1990, con los encontrados en 1993, sólo pudo compararse el comportamiento del flúor y de la relación iónica rMg/rCa .

Para el caso del flúor se analizó su evolución anual desde 1984 hasta 1989, observándose poca variación en las concentraciones pero no así en su trazo, ya que inicialmente era concéntrico hacia el oriente de la ciudad de Aguascalientes, posteriormente desapareció este efecto y finalizó en 1989 interpretándose nuevamente este fenómeno, en donde las concentraciones llegaron a ser hasta de 6 mg/l.

De lo anterior se concluye que de 1984 a 1989 se presentaron siempre valores por encima de la norma que es de 1.5 mg/l, a excepción de una zona ubicada aproximadamente a 3 Km al suroeste de la ciudad de Aguascalientes, donde sólo en 1984 se encontraron concentraciones menores a 1 mg/l.

En cuanto a la evolución de la relación iónica rMg/rCa , sólo se reporta en el multicitado estudio, las configuraciones para 1984 y 1989, encontrándose en ambas un comportamiento diferente en cuanto a trazo y valores, correspondiendo a 1989 los valores más bajos del orden de 0.1 para todo el valle.

Analizando las configuraciones reportadas por el IMTA y las efectuadas por esta empresa, se observa que no existe similitud en la distribución de las isolíneas, ni en las concentraciones iónicas, lo cual se atribuye a la diferencia en la densidad del muestreo, ya que en 1984 y 1989 sólo se contó con 14 estaciones de monitoreo para todo el valle, mientras que en 1993 se tuvo el apoyo de 60 datos para una área un poco menor, aspecto relevante particularmente para las características de este valle, en el que se tienen cambios notables en las concentraciones de este ion, aún en extensiones reducidas; sin embargo se puede hacer una comparación gruesa, observándose que las concentraciones se incrementaron un poco en 1993, particularmente en la porción occidental de la ciudad de Aguascalientes.

4.5.4. Descripción del modelo hidrogeoquímico

En zonas donde la litología es muy variada, la interacción agua-roca provoca que se tengan diferentes familias de agua, así como mezclas entre ellas; el análisis comparativo de algunos iones que varían poco (como los cloruros en este caso), con otros que se encuentran fuertemente influenciados por los procesos hidrogeoquímicos de la zona (como el sodio y calcio), permite conocer los principales fenómenos que se están verificando entre el agua y la roca.

Para comprender y asociar mejor estos procesos, es oportuno recordar que en el valle de Aguascalientes el acuífero en explotación está constituido por materiales granulares (arenas tobáceas, gravas y arenas), la dirección del flujo subterráneo en norte-sur y que en algunos sitios recibe alimentación de flujos locales tanto del flanco oeste como del este, habiendo circulado ambos en su parte inicial por rocas volcánicas; asimismo, debido a la intensa explotación que se tiene hacia la parte poniente de la ciudad de Aguascalientes, la dirección del flujo subterráneo se ha modificado formandose un cono de abatimiento.

Con base en lo anterior se pueden asociar y/o comparar mejor las variaciones en las concentraciones de los parámetros analizados, concentraciones que son el resultado de los diversos procesos físico-químicos que se están verificando (disolución, precipitación, intercambio iónico, etc), los cuales junto con el análisis de algunas relaciones iónicas y planos, permiten establecer el modelo hidrogeoquímico del valle de Aguascalientes.

Para este caso, las relaciones iónicas utilizadas fueron las de calcio, sodio, y sulfatos contra cloruros (figuras 7 a 10). Estas relaciones permiten conocer el grado de sensibilidad o semejanza con la línea de dilución del agua de mar, además, el comportamiento de calcio, sodio y sulfatos en la zona permite identificar su correlación con el incremento en la salinidad de cloruros, ya que

de existir ésta en el incremento de ambos iones, estaría indicando que el enriquecimiento iónico del agua de la zona ha resultado por la adición neta del ion, siempre y cuando este incremento se de en la dirección del flujo subterráneo.

Por el contrario, una pobre correlación entre estos iones es una evidencia clara de la diversidad del medio de depósito de la formación y en consecuencia de la composición química del agua.

La primer gráfica a comentar es la de calcio contra cloruros (figura 7), en donde se observa que existe una baja correlación entre estos iones, debido a la mezcla de aguas que se tiene en el valle, sin embargo se pueden diferenciar obras con reducidas concentraciones de cloruros que representan zonas de recarga (pozos 39 y 41) y obras con mayores concentraciones de este ion que manifiestan un tiempo de residencia en el acuífero relativamente mayor, como es el caso de la zona suroeste del valle, donde se localizan los pozos 35 y 36.

La influencia de rocas carbonatadas en las aguas subterráneas no es evidente en la gráfica citada, ya que a pesar de que hacia el este del valle están próximos los afloramientos de calizas, el agua que proviene de esta zona al mezclarse con la del centro del valle, genera un nuevo tipo de agua con concentraciones diferentes.

ACUIFERO DE AGUASCALIENTES
RELACION CALCIO-CLORUROS
(1993)

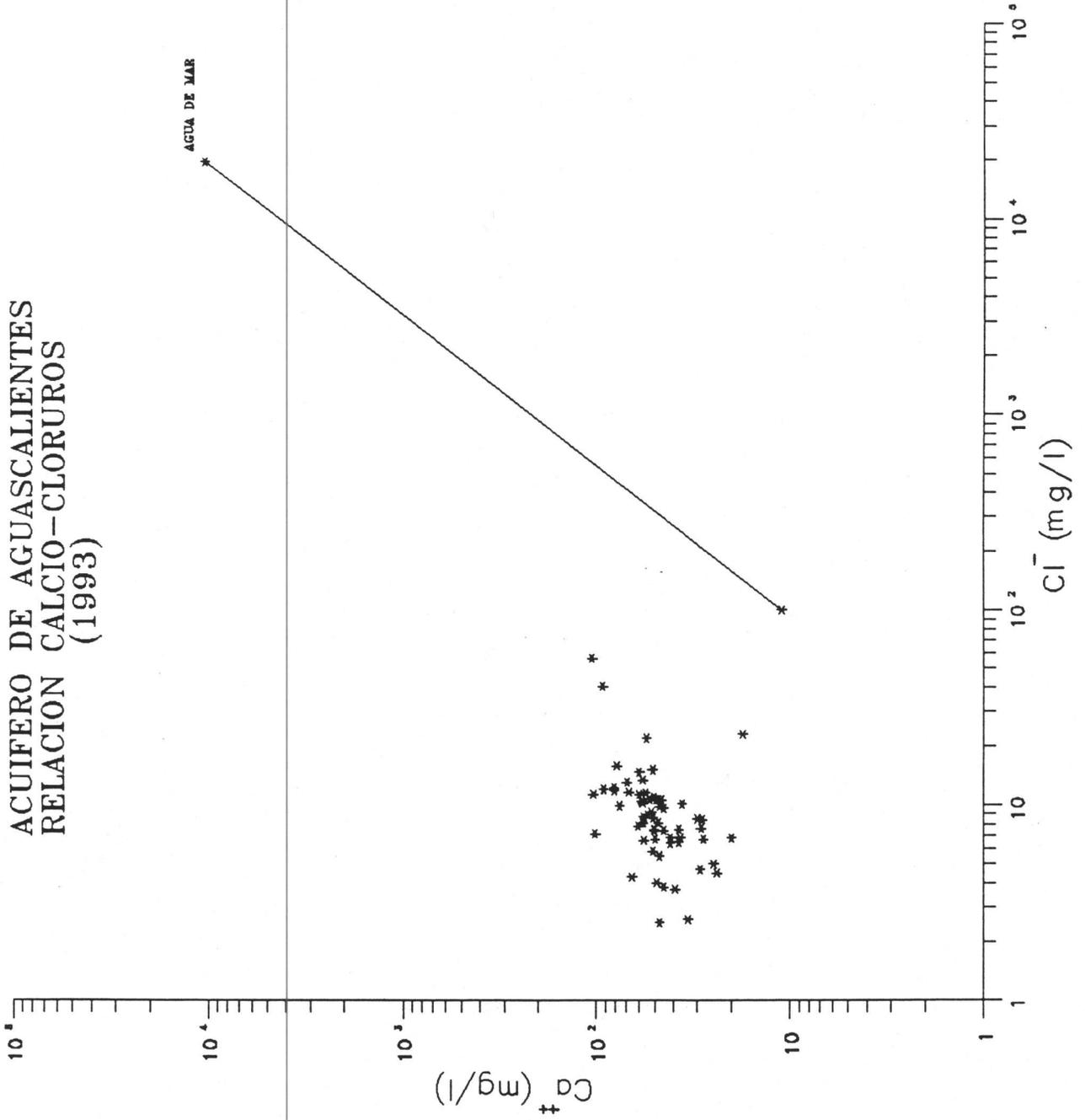


FIGURA 7

La gráfica que muestra la relación iónica del magnesio contra cloruros (figura 8) tampoco manifiesta una alta correlación, como ocurre cuando el agua ha estado en contacto con litologías diferentes, en donde los contenidos minerales varían, como es el caso del valle de Aguascalientes.

Sin embargo la gráfica de la relación sodio contra cloruros (figura 9), permite comprobar la dirección que sigue el agua subterránea en el valle, ya que los valores más bajos corresponden con obras localizadas en zonas de recarga, con flujo en litologías donde aún no se presenta la mezcla de aguas (pozos 39 y 41) y los valores más altos de estos iones se encuentran en las obras ubicadas hacia la ciudad de Aguascalientes, sitio hacia donde el agua ha tenido un mayor recorrido en el subsuelo.

De igual forma la gráfica de sulfatos contra cloruros (figura 10), con buena correlación, identifica este proceso y permite distinguir las obras de la zona de recarga de las de descarga.

Por lo que toca al comportamiento de la relación rMg/rCa (plano 14), varía en todo el valle entre 0.1 y 0.2, aunque ocasionalmente en algunos sitios como al este de Rincón de Romos y en Jesús María, llega a alcanzar valores de 0.6; estos valores son indicativos de que el agua ha circulado principalmente por

ACUIFERO DE AGUASCALIENTES
RELACION MAGNESIO-CLORUROS
(1993)

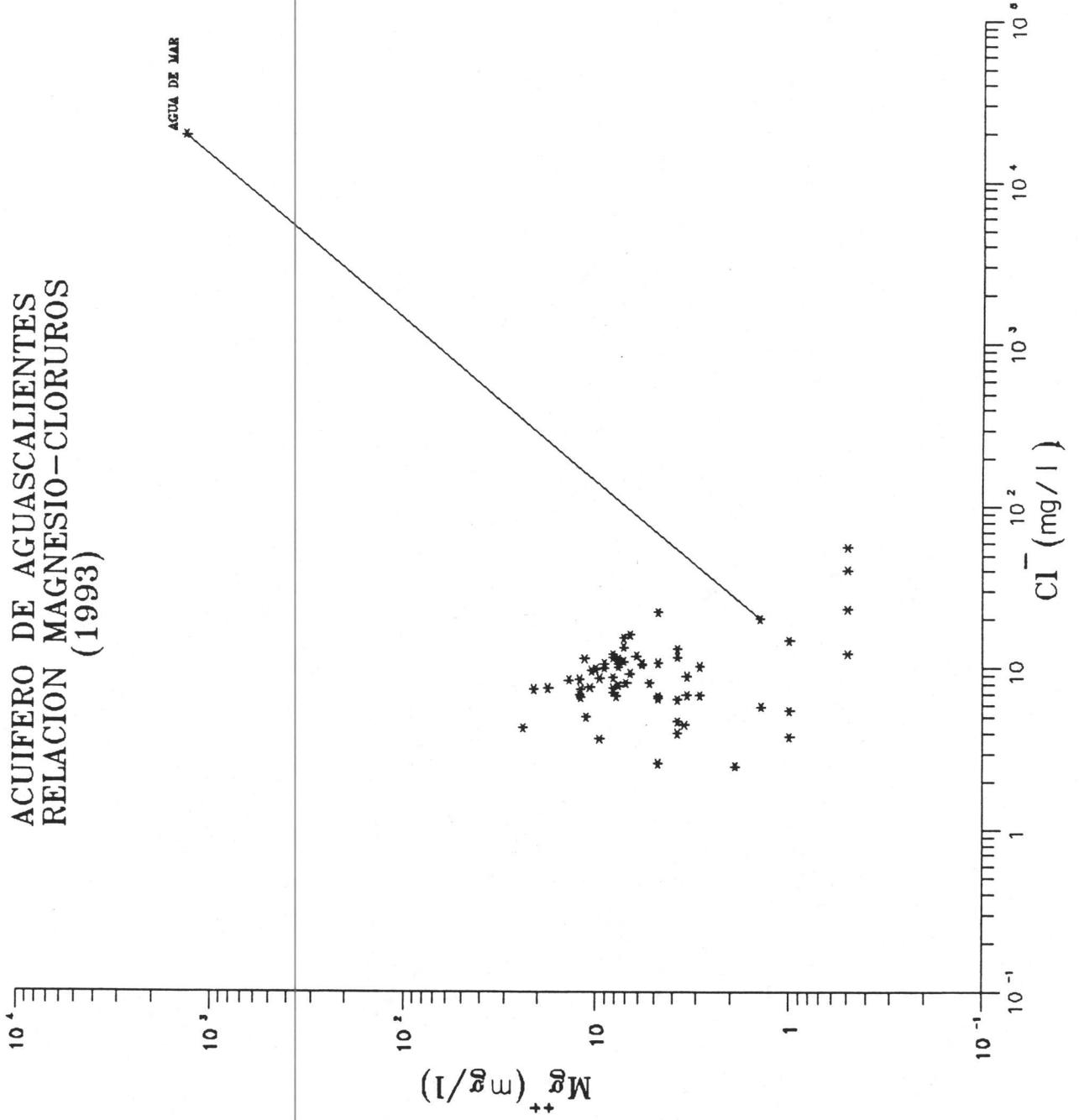


FIGURA 8

ACUIFERO AGUASCALIENTES
RELACION SULFATOS-CLORUROS
1993

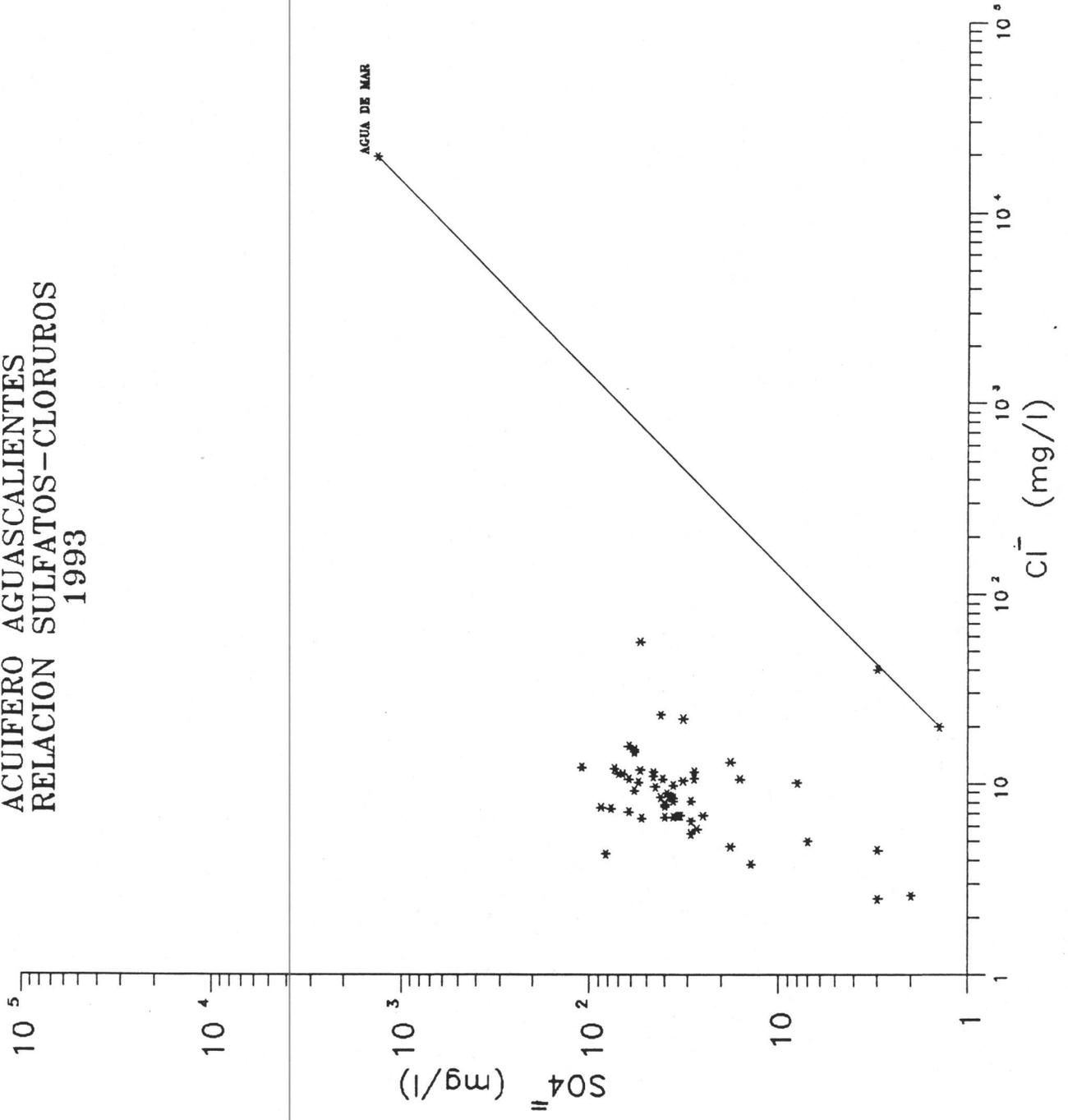


FIGURA 10

materiales granulares derivados de rocas volcánicas de composición ácida.

En cuanto a las concentraciones de flúor encontradas y su correlación con la temperatura del agua, como se comentó en el apartado 4.5.2., la correspondencia hace concluir que son producidos por el mismo proceso; una de las hipótesis planteadas cita que el comportamiento térmico en la zona, se deriva parcialmente del decaimiento de elementos radioactivos, de los constituyentes mineralógicos de las rocas volcánicas del área, como son en este caso las riolitas.

Asimismo, tradicionalmente la presencia de elementos menores en el agua subterránea, como es el flúor, se asocia a fenómenos de origen magmático, sin embargo algunos autores como Ellis y Mahon (1964), han probado que se pueden obtener concentraciones de elementos como el flúor, haciendo reaccionar muestras de roca encajonante del yacimiento con soluciones de agua caliente.

Para el caso particular del valle de Aguascalientes, es probable que las altas concentraciones en el ion flúor se originen de esta manera.

Por otro lado y analizando nuevamente los diagramas de Stiff, éstos confirman que existe un predominio de agua de tipo bicarbonatado-sódico, como resultado de aguas de reciente infiltración que han circulado preferentemente

por rocas volcánicas ácidas, como las riolitas del poniente del valle; hacia la parte suroeste de la ciudad de Aguascalientes, se observa un cambio en el predominio de los cationes, destacándose la presencia del calcio en lugar del sodio, lo cual es evidencia que la recarga del suroeste hacia la ciudad de Aguascalientes, ha circulado preferentemente por depósitos granulares.

Igual comportamiento se observa en los diagramas de Piper (figuras 4, 5 y 6), en donde se tiene agua bicarbonatada-sódica y en menor frecuencia bicarbonatada-cálcica, siendo más bien el predominio del tipo bicarbonatada-mixta. Esto comprueba nuevamente que las sierras tanto del oriente como del poniente recargan también al acuífero, y que originalmente deben presentar un predominio de aguas del tipo bicarbonatada-sódica y bicarbonatada-cálcica, respectivamente, pero que al circular hacia el centro del valle se mezclan.

Por lo que se refiere al índice de cambio de bases (ICB), se configuró para identificar las zonas donde este proceso esté ocurriendo, como son las regiones con altos contenidos de arcillas, donde el ion sodio que predomina es adsorbido en su superficie e intercambiado por el calcio contenido en el agua, ocurriendo de esta manera una pérdida de calcio en la solución y una ganancia de sodio en la misma, hasta el punto en que el contenido de sodio en la solución llega al equilibrio.

La forma de conocer la magnitud de este proceso, es a través de la siguiente expresión:

$$\text{ICB} = \frac{r_{\text{Cl}} - r(\text{Na} + \text{K})}{r_{\text{Cl}}}$$

en donde r equivale a concentraciones en miliequivalentes/litro

Este valor en el agua subterránea puede ser positivo o negativo pero próximo a cero, encontrándose que cuando éste aumenta se presenta un endurecimiento del agua y cuando disminuye notablemente representa un ablandamiento en la misma.

La representación del ICB en el plano 15, muestra que hacia la zona de Pabellón de Arriaga y al noroeste de la ciudad de Aguascalientes, deben presentarse procesos importantes de ablandamiento en el agua, ya que en esos sitios se tienen los valores del ICB más negativos, coincidiendo donde se presentan los valores más altos de sodio.

Como confirmación al conocimiento de los principales fenómenos químicos de la región, se analizó el comportamiento del equilibrio químico de diversas

especies minerales a través del uso del programa WATEQ-F (Truesdell and Jones, 1979); los principios teóricos pueden ser consultados en el anexo de equilibrio químico.

El programa citado toma en cuenta los parámetros de campo como pH, temperatura y alcalinidad, así como las siguientes determinaciones: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$ y HCO_3^- .

De igual forma el programa calcula el balance iónico y los parámetros para el cálculo de los índices de saturación (IS) de algunas especies minerales, los cuales están en función de los datos de entrada. Los resultados para cada uno de los sitios muestreados se incluyen también en el anexo de equilibrio químico.

Para este estudio se analizaron únicamente los valores de los índices de saturación de la calcita (ISC), ya que a pesar de que el programa determinó otras 17 especies minerales en solución, su presencia es insignificante con respecto a la litología de la zona, siendo sólo relevante la influencia de la calcita en la composición del agua subterránea de la región, ya que el ISC apoya la interpretación del sentido de flujo del agua subterránea, pues las zonas bajosaturadas se asocian con zonas de recarga, incrementándose en el sentido del flujo hasta alcanzar la sobresaturación.

Su distribución en la zona se muestra en el plano 16, en donde se observa que existen algunas áreas dentro del valle, que se encuentran sobresaturadas en este mineral, como son la parte norte de Pabellón de Arteaga donde se presentan valores de 1.7, al noreste de Jesús Gómez Portugal así como la parte oeste y suroeste de la ciudad de Aguascalientes, donde llegan a presentarse valores de 5.0, como es el caso del pozo 35 ubicado al sur de San José de la Esperanza. El resto de la zona se encuentra subsaturada con respecto a este mineral.

Este comportamiento en el equilibrio de la calcita, puede estar influenciado por la temperatura, tal y como sugiere Custodio (1983): "El contenido en HCO_3 y Ca es función de la temperatura, decreciendo la solubilidad del CaCO_3 al crecer ésta, aunque pueden influir otros factores".

Analizando la distribución de ambos parámetros en el valle, no se observa de forma clara la correspondencia entre ellos, aunque esto puede estar enmascarado por la mezcla de aguas que se tiene en la mayor parte de la zona.

En resumen se establece que el modelo hidrogeoquímico del valle, muestra la existencia de un acuífero en materiales granulares, con concentraciones iónicas reducidas, lo que permite concluir que el tiempo de residencia del agua en el

acuífero ha sido corto; que presenta problemas de contaminación por actividades antrópicas, manifestados por las altas concentraciones de nitratos y plomo, así como de forma natural con valores elevados de flúor y altas temperaturas.

En lo que se refiere a la evolución hidrogeoquímica del agua de este acuífero, sólo es notorio el cambio en la dirección que siguen las curvas en sitios donde la explotación ha sido más intensa, por lo que más que una evolución en la calidad del agua, la diferencia en el comportamiento se debe a la concentración de obras en zonas específicas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En este capítulo se presentan los resultados alcanzados en el estudio, tomando como referencia los objetivos propuestos.

1º Validar los resultados de los análisis físico-químicos realizados

Para cubrir este objetivo, se utilizó el programa GW (Groundwater) para validar los análisis físico-químicos de estudios anteriores, que fueron en éste caso sólo los reportados en 1972, ya que no obstante que desde 1984 hasta 1989 en el estudio del IMTA de 1990 se incluyen resultados de los iones principales, en la mayoría de las ocasiones el valor de algunos se obtuvo por relación directa entre ellos, forzando de esta manera el porcentaje de error, siendo esta la razón de que no se les consideró para su validación; por otro lado, los análisis efectuados por esta empresa se validaron utilizando tanto el GW como el WATEQ-F.

Para los resultados obtenidos en 1972, se encontró que de los 168 análisis reportados, el 83.1% del total presentan un error menor al 10%; 30 obras que representan al 17% del total, arrojaron un error mayor de 10%. Es importante destacar que la mayoría de estas obras fueron analizadas en

varias ocasiones durante ese año, en muchas de las cuales presentaron un error mayor al 10% por no tener el análisis completo, mientras que en otras al ser éste completo, el error fue menor al 10%.

En base a este comportamiento, se concluye en términos generales que los análisis de 1972 se encuentran en un aceptable grado de validez

En los análisis de 1993 de las 60 obras muestreadas, solo dos de ellas presentaron un error mayor al 10% (pozos 10 y 59), que equivalen al 3% del total, teniendo por lo tanto, que el 97% de los análisis presentan un error menor al 10%, lo que indica un alto grado de validez en los mismos.

2º Definir la distribución de las concentraciones iónicas mediante gráficas y planos

Este objetivo fue totalmente cubierto con la representación iónica a través de los planos de cloruros, sulfatos, calcio, sodio, nitratos y flúor.

La distribución de estos iones muestra para el caso de los cuatro primeros, que las concentraciones más bajas se presentan al norte del área, incrementándose ligeramente hacia la ciudad de Aguascalientes y de forma particular hacia el poniente de ésta ciudad.

Los nitratos presentan concentraciones superiores a 5 mg/l en todo el valle, con excepción de los pozos 15 y 36 ubicados al norte y sur del mismo respectivamente. Lo anterior debe estar relacionado con el empleo de fertilizantes nitrogenados en las rancherías del norte y sur del valle así como por la contaminación probable de descargas industriales o domésticas.

El flúor presenta valores superiores a 1.5 mg/l en las obras ubicadas al este y oeste de la ciudad de Aguascalientes (pozos 1 y 12), así como en la obra 2 ubicada en la rancharía Antonio de Pañuelos. Las altas concentraciones en este ion, corresponden casi siempre con zonas donde se tienen temperaturas superiores a 25°C, que indican su asociación con procesos de termalismo.

La representación mediante gráficas se hizo a través de los diagramas de Stiff, Piper y log-log de calcio, sulfatos y sodio contra cloruros.

Los diagramas de Stiff permitieron identificar que en la zona existe agua tipo Bicarbonatada-Sódica que predomina prácticamente en todo el valle; existe también agua Bicarbonatada-Cálcica pero se restringe sólo a algunas obras al noroeste y sur del valle.

La primera indica que son aguas de reciente infiltración que han circulado por rocas volcánicas ácidas; las segundas indican también aguas de reciente infiltración pero que han circulado tanto por rocas volcánicas como por medios granulares.

Los diagramas de Piper así como de calcio, sodio y sulfatos contra cloruros permitió confirmar la dirección de enriquecimiento iónico en el valle, el cual es de norte a sur con inflexiones hacia el poniente de la ciudad de Aguascalientes.

3ª Definir la evolución de la calidad química del agua contenida en los acuíferos.

Esta actividad se cubrió sólo parcialmente, ya que no pudo conocerse con claridad lo ocurrido de 1984 a 1989, teniendo únicamente la evolución de 1972 a 1993.

En este período se encontró que los STD en la región de Rincón de Romos y Pabellón de Arteaga se tienen prácticamente las mismas concentraciones en ambos años, ya que en 1972 se reportaron entre 500 y 700 ppm y en 1993 se obtuvieron 500 ppm en promedio; este mismo comportamiento en evolución se observó en el resto del valle, apreciándose únicamente cambios en el comportamiento de las isolíneas para 1993 al poniente de la ciudad de Aguascalientes, como consecuencia de la sobreexplotación en esa zona.

4º Definir zonas con mala calidad química del agua

Este objetivo queda cubierto en su totalidad con la ilustración de estas zonas en el plano 3, donde se observa de forma puntual que muchas obras analizadas sobrepasan los límites de nitratos; 12 aprovechamientos rebasan el límite permitido para el consumo del plomo, no observándose un foco específico de contaminación, considerando por lo tanto que su probable origen debe encontrarse cerca del pozo (lixiviado de algunos desechos metálicos de las propias rancherías o por las reacciones físico-químicas de la tubería con el agua).

5º Definir mediante modelos de equilibrio químico los índices de saturación y con éstos, los procesos ocurridos en los acuíferos.

Este objetivo se cumplió utilizando el programa WATEQ-F, a través del cual se obtuvo el índice de saturación de la calcita (ISc), el cual muestra que existen algunas áreas dentro del valle, que se encuentran sobresaturadas en este mineral, como son la parte norte de Pabellón de Arteaga donde se presentan valores de 1.7, al noreste de Jesús Gómez Portugal así como la parte oeste y suroeste de la ciudad de Aguascalientes, donde llegan a presentarse valores de 5.0, como es el caso del pozo 35 ubicado al sur de San José de la Esperanza. El resto de la zona se encuentra subsaturada con respecto a este mineral.

Las zonas de sobresaturación se asocian a áreas de sobreexplotación, y las zonas bajosaturadas a áreas de recarga.

El proceso que predomina en la mayor parte del valle es el de disolución.

6º Con base en los objetivos anteriores, corroborar y complementar las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos.

De acuerdo al comportamiento hidrogeoquímico descrito en los puntos anteriores, se concluye que, en la actualidad el modelo hidrogeológico coincide con el enriquecimiento iónico de especies conservativas en el medio, como son los cloruros, correspondiendo los valores bajos con obras situadas en zonas de recarga, como son la parte norte así como en las sierras del oriente y poniente; los valores altos se sitúan en áreas de descarga representadas por zonas con elevada densidad de pozos, como es principalmente hacia la parte poniente de la ciudad de Aguascalientes.

La dirección de enriquecimiento iónico y en consecuencia del flujo subterráneo, es norte sur, con ligeras inflexiones hacia la población de Pabellón de Arteaga y ciudad de Aguascalientes, donde inclusive las curvas son concéntricas por la sobreexplotación

7º Establecimiento de bases de datos para la sistematización y manejo digitalizado de la información hidrogeoquímica

Este objetivo fue cubierto totalmente con la elaboración de la base de datos que acompaña al presente informe, y en la cual se incluyen los análisis químicos históricos y los del presente trabajo.

5.2 Recomendaciones

- 1º Considerando que los análisis químicos históricos confiables realizados en la zona son muy escasos, se recomienda que las futuras campañas de muestreo se realicen tomando como base las obras utilizadas en este estudio, y de ser posible, ampliar la cobertura del análisis para tener un mayor detalle en el modelo hidrogeoquímico de la zona.
- 2º Que las mediciones se realicen en la misma época, para minimizar los efectos estacionales.

- 3° Para definir con detalle la calidad físico-química en la vertical de los pozos de la zona, se recomienda realizar registros continuos de parámetro físico-químicos principalmente en los ubicados al poniente de la ciudad de Aguascalientes.
- 4° En estos mismos pozos efectuar periódicamente registros con cámara de televisión, para conocer las zonas que presentan problemas de incrustación derivados de la saturación de la calcita, efecto que provoca la disminución del caudal específico.
- 5° Debido a que en todas las obras se encontraron altos contenidos de nitratos, se recomienda revisar el estado actual de la parte superficial de las mimas para disminuir la infiltración directa al acuífero.
- 6° En los pozos con altos contenidos de flúor y plomo restringir su uso para consumo humano por los efectos que provocan estos iones.
- 7^a En lo referente a la contaminación por plomo, se recomienda tomar muestras adicionales en otras obras del entorno afectado, para emplear las concentraciones resultantes como trazadores, que permitan identificar la zona de donde puede provenir la contaminación; lo anterior permitirá

definir con detalle la localización de nuevas obras en donde se deba tomar muestras y llegar finalmente a localizar el foco o área de contaminación y su zona de influencia.

BIBLIOGRAFIA

Ariel Construcciones, S.A., 1972. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos en el estado de Aguascalientes.

CNA, 1990. Estudio de prospección geohidrológica en las zonas marginadas del estado de Zacatecas.

Trabajo elaborado por EXYCO S.A. para la CNA bajo el contrato de trabajo No. SGAA-90-36

CNA, 1992. Estudio de exploración geofísica y actividades geohidrológicas complementarias en el acuífero de La Laguna, estados de Coahuila y Durango.

Trabajo elaborado por EXYCO S.A. para CNA bajo el contrato de trabajo No. SGAA-92-

Custodio, E. y Llamas, M.R., 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona

Edmunds, W.M., 1986. The hydrogeochemical characterization of Ground Water in the Sirt Basin, using Strontium and other Elements. Institute of Geological Sciences. Wallingford, Oxon-England

Edmunds, W.M., 1986. The origin of Saline Ground Waters in the Carnmenellis Granite, Cornwall (U.K.): Further Evidence from Minor and Trace Elements. British Geological Survey, Wallingford

Edmunds, W.M., 1986. The susceptibility of UK groundwaters to acidic deposition. Journal of the Geological Society, London Vol. 143, pp. 707-720

Edmunds, W.M.; et al. 1987. Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, W.K.: a basis for groundwater quality management. Applied Geochemistry, Vol. 2 pp. 251-274

Freeze, R.A. & Cherry, J.A., 1979. Groundwater Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey

IMTA, 1990. Transporte de contaminantes en acuíferos; Estudio geohidrológico de Aguascalientes.

IMTA, 1992. Actualización Geohidrológica-Segunda Parte

IMTA,----. Análisis Físico-químicos de agua I y II del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua de la Comisión Nacional del Agua

Lloyd, J.W. & Heathcote, J.A., 1985. Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater.
Clarendon Pres-Oxford

SEDUE, 1989. Criterios ecológicos de calidad del agua.
Diario Oficial

TACSA, 1990. Estudios de piezometría y nivelación de brocales de pozos en los estados de Tlaxcala, Puebla y Aguascalientes.

Truesdell & Jones, 1972. Software WATEQF-4.
Consortio Niel Plummer, EUA