

03060



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO EN LA
COMARCA LAGUNERA, MEXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
(AGUAS SUBTERRÁNEAS)

P R E S E N T A

ANGÉLICA MOLINA MALDONADO



MÉXICO, D.F.

MAYO, 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

A Alma Areli

Por ser mi motivación, mi fascinación, mi amor y la luz que ilumina mi existencia

A Lino

Por su apoyo incondicional, nuestro hermoso amor y todos los sueños compartidos

A Alicia y Alberto

Por la vida, su invaluable ejemplo, todo su apoyo y su inmenso amor

A Alicia y Adriana

Por el cariño, la alegría y el entusiasmo que han dado siempre a mi vida

A Omar y Carlos

Por haberse convertido en mis queridos hermanos

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE:

Angélica Molina Maldonado

FECHA:

9-Junio-2004

FIRMA:

Angélica Molina Maldonado

Agradecimientos:

Primeramente agradezco al Dr. Luis Marín por todo el apoyo e interés en la dirección de este trabajo.

Agradezco sinceramente a la Dra. Ma. Aurora Armienta, a la Dra. Rosario Iturbe, al Dr. Alejandro Carrillo y al Dr. Eugene Perry por sus acertados comentarios y sus valiosas aportaciones durante la revisión de este trabajo.

Agradezco de manera especial al M. en C. Antonio Cardona por su apoyo, asesoría y guía durante el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a CONACyT, a la DEGEP por la ayuda otorgada durante mis estudios de maestría.

Agradezco al Ing. Oscar Escolero por el apoyo brindado para realizar mi maestría.

Mi sincero agradecimiento a María del Carmen Villegas Molina, Diego y Darío Mora Villegas, y Darío Mora por su cálida hospitalidad.

INDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1 ANTECEDENTES
- 1.2 OBJETIVO
- 1.3 LOCALIZACIÓN
- 1.4 CLIMATOLOGÍA
- 1.5 GEOLOGÍA
- 1.6 HIDROGEOLOGÍA
- 1.7 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

2. METODOLOGÍA

- 2.1 ACTIVIDADES DE CAMPO
- 2.2 ANÁLISIS QUÍMICO
- 2.3 MODELACIÓN E INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

3. RESULTADOS

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 4.1 **CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA**
 - 4.1.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS
 - 4.1.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA DEL AGUA SUBTERRÁNEA
 - 4.1.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL PH
 - 4.1.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO
 - 4.1.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA
 - 4.1.6 FAMILIAS DE AGUA
 - 4.1.7 DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA
-

4.2 CLASIFICACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

4.2.1 GRUPO 1

4.2.2 GRUPO 2

4.2.3 GRUPO 3

4.2.4 GRUPO 4

4.2.5 GRUPO 5

4.2.6 GRUPO 6

4.2.7 GRUPO 7

4.2.8 GRUPO 8

4.3 REACCIONES HIDROGEOQUÍMICAS

4.3.1 EVAPORACIÓN

4.3.2 DISOLUCIÓN DE YESO

4.3.3 EQUILIBRIO CON RESPECTO A LA CALCITA Y LA DOLOMITA

4.3.4 PROCESO DE DEDOLOMITIZACIÓN

4.3.5 INTERCAMBIO CATIONICO

4.3.6 COMPORTAMIENTO GEOQUÍMICO DEL ARSÉNICO EN LA
COMARCA LAGUNERA

4.4 MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA INVERSA

5. CONCLUSIONES

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INDICE DE FIGURAS

- 1.1 Localización de la zona de estudio
 - 1.2 Poblaciones en la zona de estudio
 - 1.3 Mapa geológico
 - 1.4 Columna estratigráfica
 - 1.5 Secciones geológicas
 - 1.6 Secciones geológicas
 - 1.7 Dirección de flujo en condiciones originales
 - 1.8 Suelos salinos en la exlaguna de Viesca en el año 2000.
 - 1.9 Dirección de flujo en 1975
 - 1.10 Dirección de flujo en 1999
 - 1.11 Profundidad al nivel estático en 1999
-
- 2.1 Descarga de agua subterránea en el Cementerio El Carmen, en Torreón
 - 2.2 Descarga de agua subterránea en el Relleno Sanitario de la Ciudad de Torreón
 - 2.3 Enjuague de envases para el muestreo de agua subterránea en la descarga del pozo
 - 2.4 Filtrado y acidificación de las muestras para metales
 - 2.5 Preservación con sulfato de calcio pentahidratado y ácido fosfórico para la muestra de fenoles
 - 2.6 Celda de aislamiento utilizada para la medición de parámetros de campo
 - 2.7 Calibración del equipo de pH
 - 2.8 Titulación por el método de Gran para determinar la alcalinidad
 - 2.9 Ventana principal del programa MODELAGUA
 - 2.10 Ventana de ajuste del delta iónico del Programa MODELAGUA
 - 2.11 Ventana de selección de las reacciones químicas a modelar y cálculo de la masa transferida en cada una
-
- 3.1 Localización de pozos muestreados
-
- 4.1 Concentración de sólidos totales disueltos en el agua subterránea
 - 4.2 Distribución espacial de la temperatura del agua subterránea
 - 4.3 Distribución espacial del pH
 - 4.4 Distribución espacial de la concentración de oxígeno disuelto en el agua subterránea
 - 4.5 Diagramas de Stiff
 - 4.6 Diagrama de Piper
 - 4.7 Distribución del arsénico disuelto en el agua subterránea
 - 4.8 Distribución espacial de los grupos de agua identificados a través de los diagramas de Stiff
-

-
- 4.9 Diagrama de Piper mostrando los grupos hidrogeoquímicos identificados
 - 4.10 Gráficas de concentraciones de algunos iones para los distintos grupos
 - 4.11 Concentración de sólidos totales disueltos contra concentración de litio
 - 4.12 Relación isotópica entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua superficial
 - 4.13 Relación isotópica entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua subterránea
 - 4.14 Concentración de sulfato contra concentración de cloruro
 - 4.15 Relación entre las concentraciones de sólidos totales disueltos y sulfato
 - 4.16 Concentración de litio contra concentración de sulfato
 - 4.17 Sólidos totales disueltos contra concentración de calcio
 - 4.18 Concentración de sólidos totales disueltos contra índice de saturación con respecto al yeso
 - 4.19 Concentración de sulfato contra concentración de calcio más sodio menos cloruro
 - 4.20 Índices de saturación con respecto a la calcita
 - 4.21 Índices de saturación con respecto a la dolomita
 - 4.22 Índices de saturación con respecto a la aragonita
 - 4.23 Relación entre calcio y sulfato conforme a la línea teórica de dedolomitización
 - 4.24 Diagrama de Piper mostrando el intercambio catiónico
 - 4.25 Relación de sólidos totales disueltos contra concentración de sodio
 - 4.26 Relación de sólidos totales disueltos contra concentración de calcio
 - 4.27 Relación de sodio menos cloruro contra calcio más magnesio
 - 4.28 Relación de sodio menos cloruro contra calcio más magnesio para muestras de baja salinidad
 - 4.29 Relación entre la temperatura del agua subterránea y la concentración de sílice
 - 4.30 Relación de las concentraciones de cloruro y arsénico
 - 4.31 Relación entre las concentraciones de sólidos totales disueltos
 - 4.32 Relación entre la temperatura del agua subterránea y la concentración de arsénico
 - 4.33 Relación entre las concentraciones de fluoruro y arsénico
 - 4.34 Relación entre las concentraciones de sulfato y arsénico
 - 4.35 Diagrama de estabilidad para las diferentes especies de arsénico
 - 4.36 Relación entre el pH del agua subterránea y la concentración de arsénico
 - 4.37 Relación entre el Eh y la concentración de arsénico
 - 4.38 Modelo conceptual hidrogeoquímico simplificado

ÍNDICE DE TABLAS

- 1.1 Unidades estratigráficas
 - 2.1 Límites de detección para el análisis por ICP-MS
 - 3.1 Datos de campo de los aprovechamientos muestreados
 - 3.2 Resultados fisicoquímicos e isotópicos del agua subterránea en La Comarca Lagunera
-

3.3 Balance iónico

4.1 Familias de agua definidas con el criterio de ion dominante

4.2 Grupos de agua identificados

4.3 Comparación de los grupos de agua identificados

4.4 Índices de saturación calculados mediante modelación hidrogeoquímica

4.5 Resultados de la modelación hidrogeoquímica inversa entre el agua de reciente infiltración (3441) y una muestra representativa del Grupo 2 en el área de Matamoros (Desafío) (mmol/L)

4.6 Resultados de la modelación hidrogeoquímica inversa entre el agua de reciente infiltración (3441) y una muestra representativa del Grupo 2 en el área de Finisterre (996) (mmol/L)

RESUMEN

La Comarca Lagunera, localizada en la porción norte de la República Mexicana, es una zona económica muy importante de México, cuyo desarrollo se ve amenazado por la grave problemática del agua subterránea, tanto en cantidad como en calidad, que prevalece en la zona desde hace varias décadas. El objetivo de este trabajo es determinar los principales procesos que controlan la composición química del agua subterránea en la Comarca Lagunera.

El acuífero está integrado por un medio granular conformado por sedimentos aluviales, fluviales y lacustres y un medio fracturado correspondiente a rocas calcáreas. La dirección de flujo subterráneo original ha sido fuertemente afectada por la extracción de agua subterránea que ha generado fuertes conos de abatimiento de más de 100 m de profundidad. Desde 1960 el arsénico ha sido de interés en la Comarca Lagunera por sus elevadas concentraciones en gran parte de la zona de estudio.

Se tomaron muestras de agua subterránea en 58 pozos y en dos sitios de descarga, donde se midieron en campo la temperatura, pH, Eh, oxígeno disuelto, alcalinidad, conductividad eléctrica y en laboratorio se determinaron iones principales, elementos traza, isótopos de oxígeno e hidrógeno, e indicadores de contaminación antropogénica. Se caracterizó el agua subterránea de acuerdo a su concentración de sólidos totales disueltos, temperatura, pH, oxígeno disuelto, su composición química de iones principales y de algunos elementos traza. Se efectuó una clasificación hidrogeoquímica del agua subterránea de acuerdo con sus características químicas, físicas y su relación con la geología del subsuelo, logrando diferenciar ocho grupos de agua. Se realizó modelación hidrogeoquímica para calcular índices de saturación y modelación hidrogeoquímica inversa para verificar la presencia de las reacciones identificadas en una zona del área de estudio.

Las grandes diferencias en la composición del agua subterránea observadas en la zona de estudio sugieren la presencia de distintos medios geológicos con características hidrogeoquímicas e hidrogeológicas diferentes, así como distintos sistemas de flujo subterráneo y distintos procesos hidrogeoquímicos.

Los resultados isotópicos de oxígeno 18 y deuterio permitieron identificar a la evaporación como un proceso importante en aquellas muestras que representan zonas de descarga, y en muestras con posible influencia de las aguas residuales que han sufrido evaporación durante su recorrido a través de los canales a cielo abierto, así como mínimo fraccionamiento isotópico debido a evaporación en muestras cuya recarga ocurre a través de fracturas en el medio calcáreo.

Se identificó como un proceso importante a la disolución de yeso a partir de los afloramientos de este mineral, que condiciona las elevadas concentraciones de sulfato en el agua subterránea y cuyo contenido se incrementa conforme aumenta el tiempo de residencia en el acuífero. Los índices de saturación con respecto al yeso calculados mediante modelación hidrogeoquímica confirman la presencia de esta reacción. Por carecer de información isotópica de azufre y de muestras de sedimentos fue imposible distinguir las altas concentraciones de sulfato que pudieran provenir de la oxidación de la pirita u otros sulfuros.

La totalidad del agua subterránea analizada para la zona de estudio se encuentra dentro de la franja de equilibrio con respecto a los minerales de calcita, dolomita y aragonita, por lo que la geoquímica de carbonatos puede ser clave en el control del calcio, magnesio y bicarbonato en el agua subterránea de la zona de estudio.

Existen las condiciones geológicas e hidrogeoquímicas para que ocurra el proceso de dedolomitización, en el que el incremento en la concentración de calcio debido a la disolución de yeso, ocasiona la transformación de dolomita en calcita en el material geológico, y se genera agua subterránea con concentraciones de magnesio, calcio y sulfato incrementadas y con la alcalinidad disminuida.

En zonas que corresponden geológicamente a sedimentos lacustres y planicies de inundación que se caracterizan por ser altamente arcillosas, localizadas en la porción norte de la zona de estudio entre los poblados de Finisterre y El Lucero y al sureste de Matamoros, ocurre el proceso de intercambio catiónico que disminuye las concentraciones de calcio e incrementa las de sodio. Las reacciones de intercambio catiónico, aunadas a la disolución de carbonatos tienen gran importancia en ciertas porciones del acuífero, debido a que favorecen el incremento del pH. Estas reacciones se verificaron y cuantificaron mediante modelación hidrogeoquímica inversa.

Las elevadas concentraciones de arsénico en el agua subterránea no se asocian directamente a alta salinidad, alta temperatura, elevadas concentraciones de litio o fluoruro, ni a la composición química del agua subterránea. Por lo que se deduce que en la zona de estudio existen diferentes procesos geoquímicos que controlan y movilizan al arsénico desde la fase sólida hacia el agua subterránea. La precipitación de minerales de arsénico no constituye un factor de importancia que controle los valores de arsénico medidos en el agua subterránea de la zona de estudio.

Elevadas concentraciones de arsénico están asociadas con agua que circula por rocas calcáreas, en las que existe una relación directa con la intensidad de interacción agua-roca calcárea, producida por un mayor tiempo de residencia en el subsuelo, por lo que un mayor recorrido a lo largo de la dirección de flujo se traduce en mayores concentraciones de arsénico. De aquí se deduce que el arsénico en esta zona se deriva de fuentes naturales presentes en las rocas calcáreas. Existe la posibilidad de que una fuente de arsénico sea la oxidación de los sulfuros diseminados en las rocas calcáreas, sin embargo no se cuenta con la información suficiente para establecer la importancia relativa de la disolución de yeso o la oxidación de sulfuros en relación con el origen del sulfato en el agua subterránea, por lo que no es posible cuantificar hasta que punto la oxidación de sulfuros justifica la presencia de arsénico en la Región Lagunera.

Al sur de Tlahualilo y en la zona de Finisterre y en la zona de Matamoros las concentraciones de arsénico son muy elevadas, pero las características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas en estas zonas son muy diferentes a las observadas en las zonas marginales de la cuenca asociadas a las Sierras calcáreas. En estas zonas la salinidad del agua subterránea es muy baja, y se capta a partir del medio granular, caracterizado por sedimentos arcillosos de origen lacustre y de planicie de inundación. La adsorción-desorción del arsénico a partir de los materiales arcillosos en esta porción del acuífero parece ser el proceso que controla la concentración de arsénico en el agua subterránea, condicionada por el pH.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La Comarca Lagunera es una zona económica muy importante del país, por su gran desarrollo agropecuario e industrial, que se caracteriza por una alta producción lechera, ganadera, agrícola y minera. El desarrollo socioeconómico de la región depende prácticamente en su totalidad de la extracción del agua subterránea. Por lo que es de fundamental importancia para la región preservar la cantidad y la calidad del recurso hídrico subterráneo.

En 1840 ya existía en la zona una agricultura incipiente en pequeñas áreas que eran regadas, en forma natural, por las inundaciones ocasionadas por las avenidas de los ríos Nazas y Aguanaval. El desarrollo agrícola se fue extendiendo mediante la construcción de obras hidráulicas rudimentarias que derivaban y conducían los escurrimientos para regar terrenos dispersos en las inmediaciones de su curso. Durante las primeras décadas del siglo XX se inició la extracción del agua subterránea, con lo que se extendió la agricultura. En 1941 comenzó el auge de la región con la creación del Distrito de Riego No. 17. En 1950 ya había aproximadamente 3000 pozos en la región.

Aunado al aprovechamiento del agua subterránea, la construcción de la Presa Lázaro Cárdenas interceptó el agua que recargaba al acuífero a lo largo del cauce del río Nazas; por lo que el exhaustivo aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, transformaron a la Comarca Lagunera de una zona de gran atractivo hidrogeológico, a un acuífero sobreexplotado con una severa crisis por la escasez de agua.

La sobreexplotación del acuífero ha provocado fuertes abatimientos del nivel freático, hundimientos diferenciales del terreno, la desaparición de los lagos que le dieron el nombre a la región y la eliminación de los ecosistemas asociados.

Extensas áreas de la Comarca Lagunera presentan concentraciones de arsénico mayores a 0.05 mg/l, límite máximo permisible para consumo humano hasta el año 2000, según la legislación mexicana. Así mismo otros iones como sulfato, fluoruro, cloruro, sodio, boro, litio y nitratos también rebasan las concentraciones permisibles para consumo humano.

La calidad del agua subterránea es amenazada cada vez en mayor medida por las actividades antropogénicas que la contaminan, y así mismo la extensiva extracción propicia el avance de altas concentraciones de arsénico y otros iones de origen natural hacia zonas de buena calidad.

Cabe destacar que la única fuente de abastecimiento de agua potable para más de un millón doscientos mil habitantes de la Comarca Lagunera es el agua subterránea, por lo que es de fundamental importancia preservar el recurso, tanto en cantidad como en calidad.

Es entonces indispensable entender los procesos hidrogeoquímicos que condicionan la calidad del agua subterránea, así como conocer su evolución espacial y temporal, identificar el origen y los procesos que controlan la concentración de los distintos iones que finalmente condicionan el uso del agua. Únicamente mediante el conocimiento de estos aspectos podrá contarse con los elementos necesarios que permitirán llevar a cabo políticas de manejo del recurso hídrico subterráneo que garanticen la preservación de su calidad.

Se han efectuado numerosos estudios en torno a la calidad del agua subterránea en la Comarca Lagunera, entre ellos los siguientes: Ortiz, 1963; Espinosa, 1963; Escobar, 1964; Catellano, 1964; Viniegra, 1964; Chávez, 1964; Quiñones, 1979; Sánchez de la Fuente, 1976; Cebrián, 1987; Albores, 1979; Cebrián, 1983; CINVESTAV, 1986; García, 1991; SSA, 1986; Del Razo, 1993; IMTA, 1991; Gutiérrez, 1995. Sin embargo la mayoría de ellos se han enfocado únicamente a estudiar las elevadas concentraciones de arsénico, sin analizar los componentes principales del agua subterránea, ni explicar los procesos hidrogeoquímicos que condicionan la composición química del agua subterránea y la relación de estos procesos con el contenido de arsénico. Los estudios que presentan datos más completos siguieron procedimientos de muestreo, preservación y almacenamiento de las muestras inadecuados, por lo que los datos generados no son del todo confiables. Adicionalmente algunos estudios tienden a hacer generalizaciones para toda la zona de estudio, con el comportamiento de muestras aisladas.

Por lo anterior se justifica la realización del presente estudio, debido a la necesidad y gran importancia de contar con datos confiables, así como con una interpretación que no sólo se centre en el arsénico, sino que desde un enfoque sistémico, analice de manera integral los principales procesos hidrogeoquímicos que controlan en general la composición química del agua subterránea. Con ello se logrará contar con una base sólida que permita enfocar estudios posteriores a la búsqueda de factores clave que ayuden a esclarecer el origen del arsénico, los mecanismos y procesos que lo liberan al agua subterránea y a establecer las medidas que deberán llevarse a cabo para su control en el agua destinada para consumo humano.

1.2 OBJETIVO

El objetivo central de este trabajo es determinar cuales son los principales procesos hidrogeoquímicos que controlan la composición química del agua subterránea en la Comarca Lagunera.

Para ello se plantea lograr los siguientes objetivos particulares:

- Caracterizar el agua subterránea de La Comarca Lagunera.
- Clasificar el agua subterránea de la Comarca Lagunera de acuerdo a sus características hidrogeoquímicas.
- Analizar el comportamiento espacial y las relaciones entre los distintos iones principales y elementos traza
- Entender la composición química del agua subterránea en relación con las unidades geológicas que conforman el acuífero.
- Entender cada uno de los procesos hidrogeoquímicos definidos.

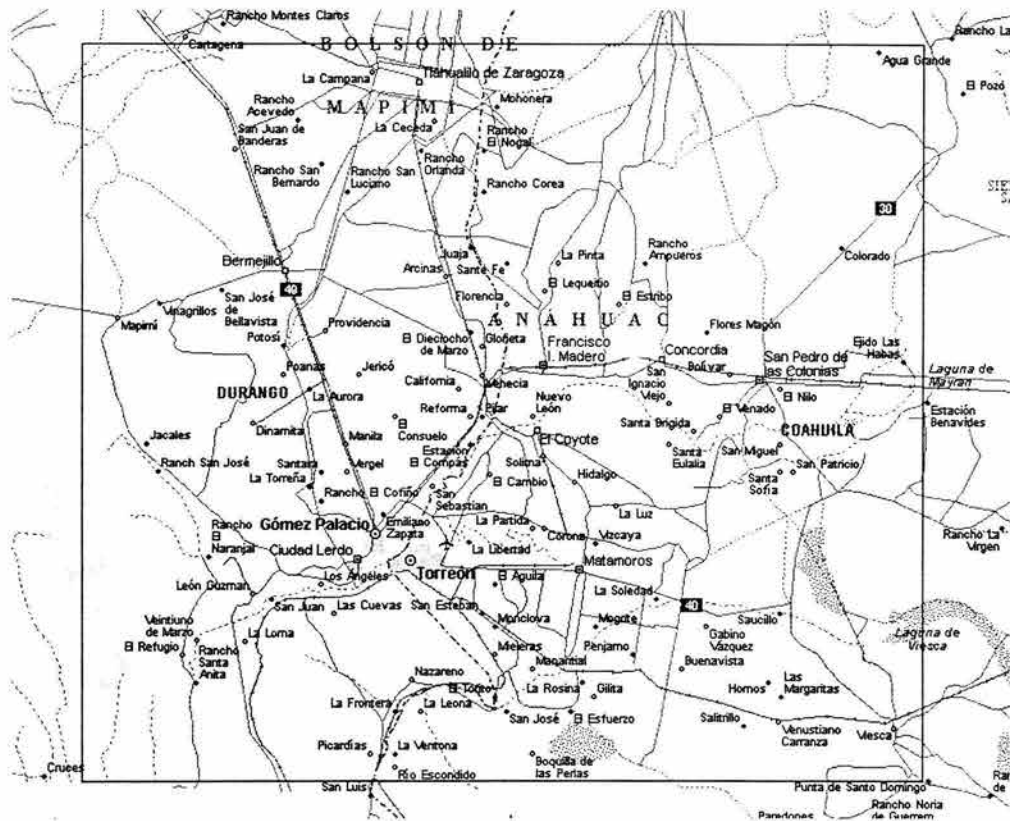
1.3 LOCALIZACIÓN

La Comarca Lagunera se localiza en la porción norte de la República Mexicana; abarca la porción suroeste del Estado de Coahuila y la porción noreste del Estado de Durango, entre los paralelos 25°15' y 26°15' de latitud Norte y entre los meridianos 102°40' y 104°00' de longitud oeste (Figura 1.1). Las altitudes varían entre 750 y 1250 msnm en el valle y más de 2000 msnm en la zona montañosa.

La zona de estudio abarca total o parcialmente los municipios de Francisco I. Madero, Matamoros, San Pedro de las Colonias, Torreón y Viesca en el Estado de Coahuila y los municipios de Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo de Zaragoza y Mapimí en el Estado de Durango.

La zona conurbada más importante de la Comarca Lagunera es la conformada por las ciudades de Torreón, Gómez Palacio y Ciudad Lerdo, que de acuerdo con el INEGI (2000) tienen una población de aproximadamente 502,964, 210,113 y 58,862 habitantes, respectivamente, lo que suma una población de 771,939 habitantes. Las ciudades que le

Figura 1.2 Poblaciones en la zona de estudio



La región se caracteriza por fuertes variaciones de temperatura. Existen dos estaciones bien definidas, una incluye los meses de noviembre a marzo con temperatura media de 13.7 a 19.4 °C y la segunda estación incluye los meses cálidos de mayo a agosto en los que la temperatura media varía de 25.3 a 26.6 °C. La temperatura mínima ocurre en enero y la máxima en junio. La temperatura media anual es de 21 °C. Más de 200 días por año son soleados. La mayoría de la precipitación ocurre en verano de junio a octubre, siendo agosto y septiembre los meses más lluviosos. La precipitación media anual en la región es de 221 mm. La evaporación media anual alcanza valores de 2406 mm, once veces mayor que la precipitación media anual (CNA, 1992).

1.5 GEOLOGÍA

La Comarca Lagunera se encuentra dentro de una depresión topográfica conformada por un valle intermontano cuya génesis está asociada con los procesos tectónicos de la Orogenia Laramide desarrollados durante el Terciario Inferior, que dieron origen al plegamiento de las rocas sedimentarias marinas del Mesozoico, al emplazamiento de cuerpos intrusivos y la

erupción de rocas volcánicas en el Terciario, así como la conformación de una depresión tectónica que ha actuado como receptáculo de sedimentos de origen continental durante el Cuaternario.

En la figura 1.3 se presenta el mapa geológico de la zona de estudio y la figura 1.4 muestra la columna estratigráfica de la región, en la que se observa la edad relativa de cada una de las unidades cartografiadas, así como la correlación con las formaciones que conforman los elementos paleogeográficos adyacentes. En la tabla 1.1 se describen en orden cronológico las unidades estratigráficas presentes en la zona de estudio, incluyendo el autor que la define, sus características litológicas, relaciones estratigráficas, edad y ambiente geológico (CNA, 1999).

La estratigrafía Mesozoica de la Comarca Lagunera comprende unidades sedimentarias del Jurásico Inferior al Cretácico Superior, conformadas en términos generales por intercalaciones de calizas, dolomitas, margas, yesos, lutitas, areniscas y conglomerados de ambientes marinos de plataforma abierta, borde arrecifal, lagunar, de supramarea y de mar abierto. Las Formaciones geológicas Mesozoicas afloran en anticlinales y sinclinales de dirección NW-SE y E-W que conforman las elevaciones topográficas de la región y son, de la más antigua a la más reciente, las Formaciones Nazas, La Gloria, La Casita, Taraises, Carbonera, Cupido, La Peña, Tamaulipas Superior, Viesca, Treviño, Acatita, e Indidura (CNA, 1999).

La secuencia Mesozoica se encuentra afectada por los plegamientos y fallamiento inverso ocurrido durante la fase compresiva de la Orogenia Laramide, por una falla de desplazamiento lateral que corre a lo largo del borde meridional y occidental de la Plataforma de Coahuila, así como por una serie de fallas normales que ocurrieron durante los eventos tectónicos distensivos ocurridos en el Mioceno Temprano y Plioceno-Pleistoceno (CNA, 1999).

Las unidades sedimentarias mesozoicas fueron intrusionadas por cuerpos intrusivos Terciarios de composición granítica, granodiorítica y monzonítica, como el intrusivo denominado El Sarnoso, que aflora al oeste de la zona de estudio.

La estratigrafía del Cenozoico incluye rocas volcánicas de composición riolítica, andesítica y basáltica del Terciario y Cuaternario, así como sedimentos de ambientes continentales, como la Formación Terciaria Ahuichila y las Unidades del Cuaternario conformadas por terrazas continentales, y materiales sedimentarios aluviales, fluviales y lacustres, cuyas facies se interdigitan lateral y verticalmente (CNA, 1999). Los sedimentos se originaron a partir de los materiales geológicos Mesozoicos que afloran en la región, por lo que la presencia de calcita, yeso, óxidos de hierro son característicos del material granular.

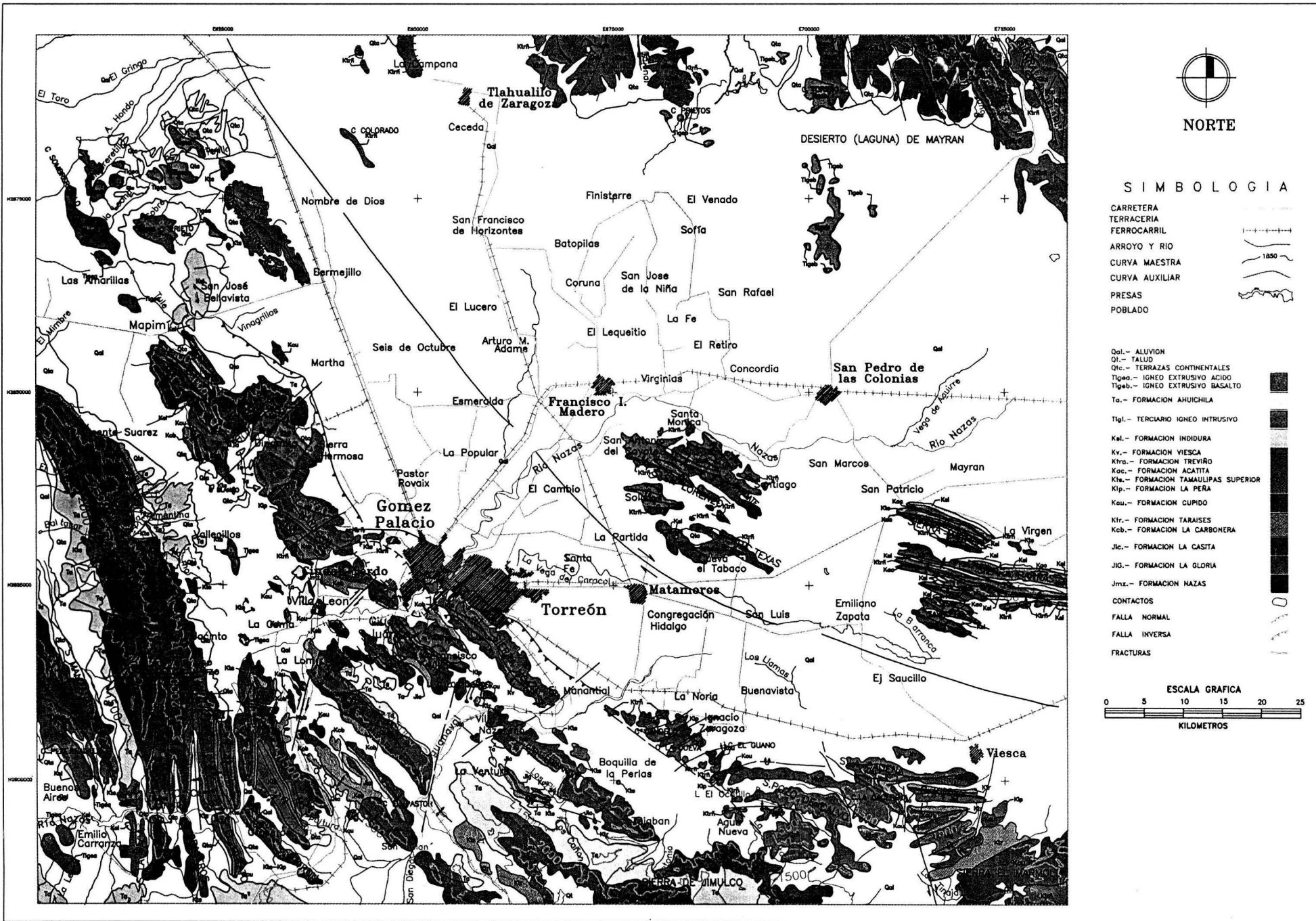


Figura 1.3 Mapa geológico

Las rocas volcánicas del Terciario presentan una escasa distribución en la zona de estudio, pues las rocas riolíticas sólo afloran en la porción noroccidental, al norte de Mapimí, Dgo. y las rocas basálticas sólo están presentes en la parte noreste del valle.

Las rocas volcánicas de composición riolítica consisten de flujos piroclásticos o ignimbritas, dispuestos en cuerpos tabulares pseudoestratificados con intenso fracturamiento vertical. Las rocas basálticas se encuentran emplazadas en coladas, y presentan un sistema de fracturamiento de enfriamiento, principalmente en dirección vertical, así como estructura vesicular (CNA, 1999).

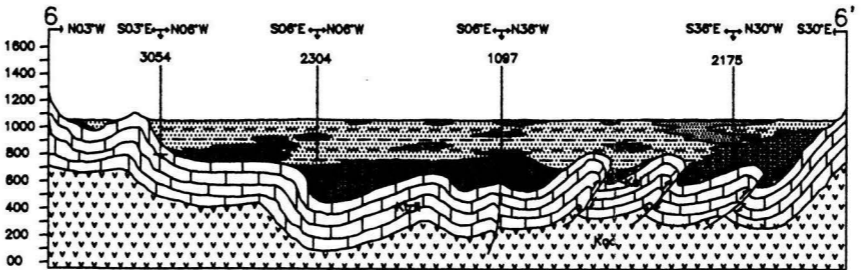
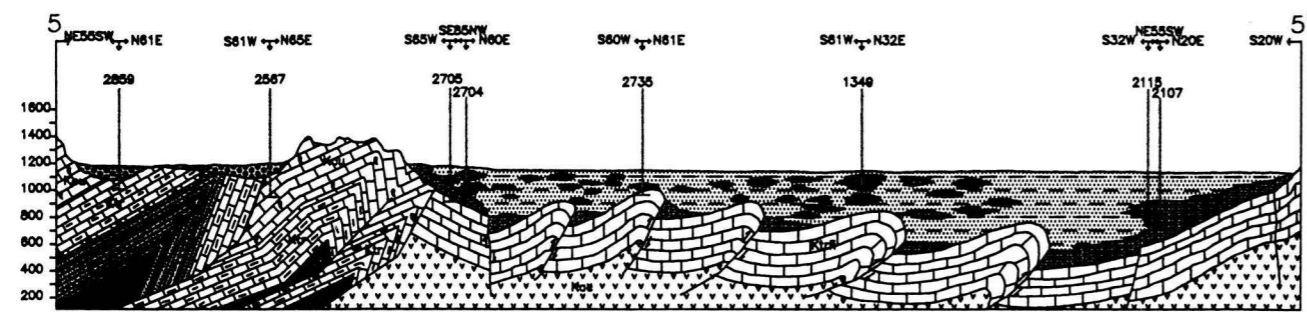
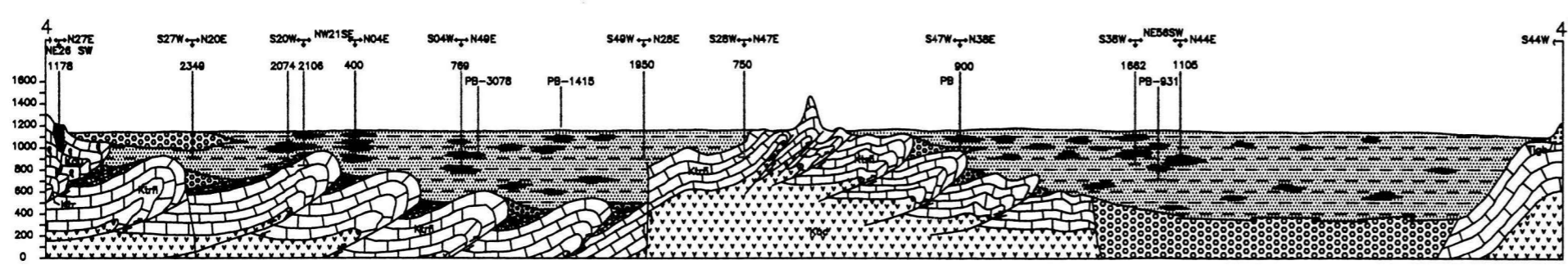
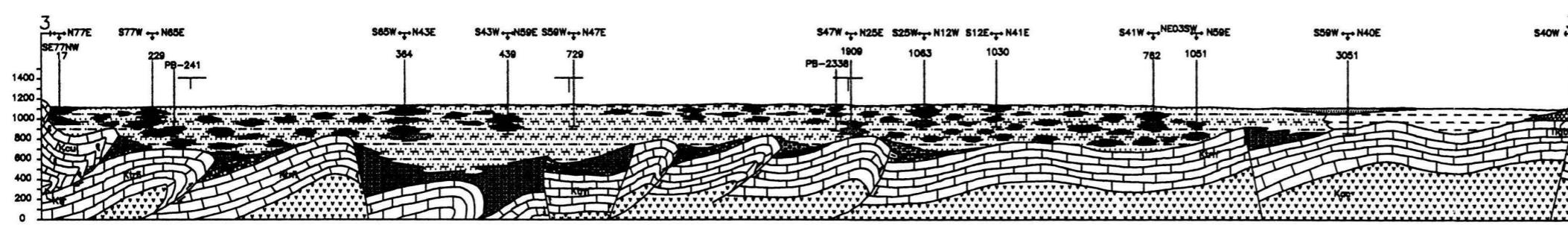
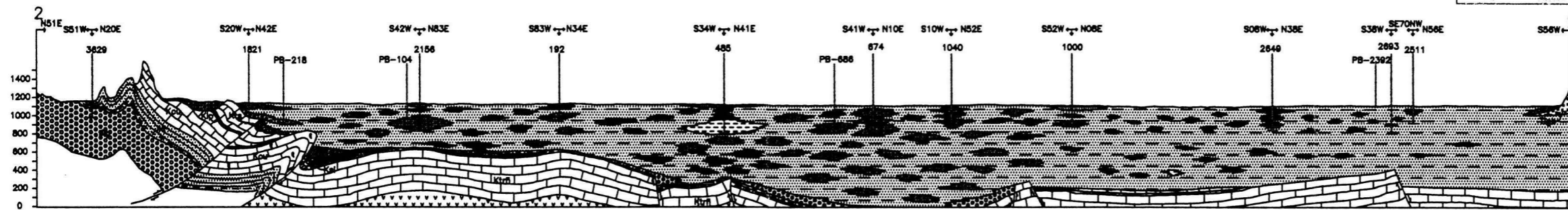
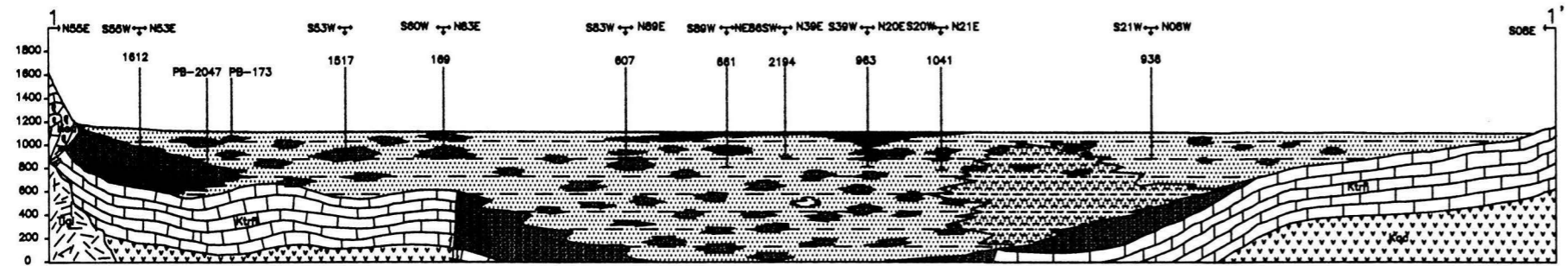
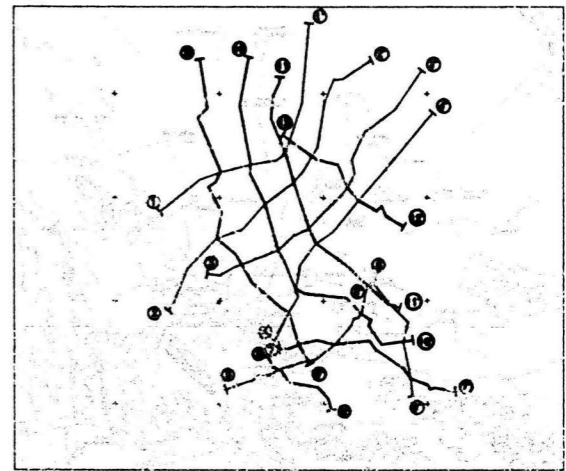
El comportamiento subsidente de las fosas tectónicas, asociado a las fallas normales permitió la acumulación de espesores considerables de sedimentos continentales de facies aluviales y fluviales durante el Cuaternario (CNA, 1999).

La descripción de la geología del subsuelo se apoya en secciones geológicas resultado de la integración de los cortes litológicos y la información geofísica disponible para la zona de estudio realizada por CNA, 1999. En las secciones mostradas en las figuras 1.5 y 1.6, se observa la distribución espacial de las unidades, así como las estructuras y discontinuidades geológicas que las afectan. En las secciones no se presenta el espesor completo de todas las Formaciones Mesozoicas, sino únicamente el de las Formaciones Treviño e Indidura con espesores de 300 a 400 y de 100 a 150 m de espesor respectivamente. La secuencia granular continental presenta un espesor promedio de 400 m, disminuyendo hasta 50 m en las inmediaciones de las elevaciones topográficas e incrementándose a más de 1000 m en los bajos estructurales (CNA, 1999).

La disposición en el subsuelo de los sedimentos de origen aluvial, fluvial y lacustre será descrita con detalle debido a su gran importancia desde el punto de vista hidrogeológico.

Los materiales de mayor granulometría corresponden a depósitos de abanicos aluviales en las inmediaciones de las sierras, así como de canales entrelazados derivados de un ambiente fluvial. Los sedimentos arenosos se ligan con los canales meandriformes dentro del sistema fluvial, mientras que los sedimentos arcillosos definen un ambiente lacustre y de planicies de inundación dentro del ambiente fluvial (CNA, 1999).

LOCALIZACION DE SECCIONES

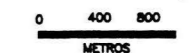


SIMBOLOGIA

- ARENAS
- ARCILLAS
- GRAVAS
- GRAVAS ARENASAS
- ARCILLA-ARENOSA
- Tígb Terciario Igneo Basáltico
- Tígl Terciario Igneo Intrusivo
- Kal Fm. Indidura
- Ktrñ Fm. Treviño
- Kac Fm. Acatita
- Kta Fm. Tamauipas Superior
- Klip Fm. La Peña
- Kcu Fm. Cupido
- Ktr Fm. Tarales
- Jlc Fm. La Casita
- Jlg Fm. La Gloria

Qal

ESCALA VERTICAL 1:20,000



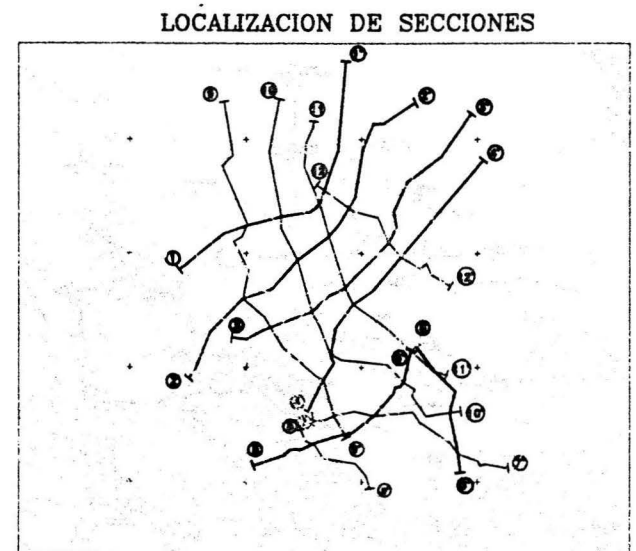
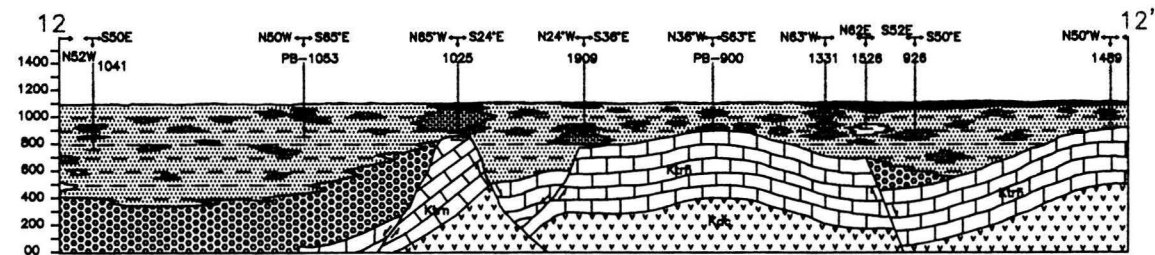
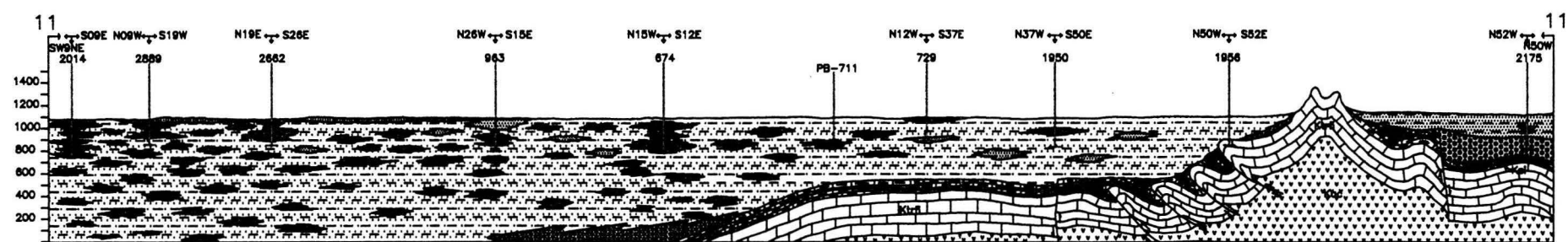
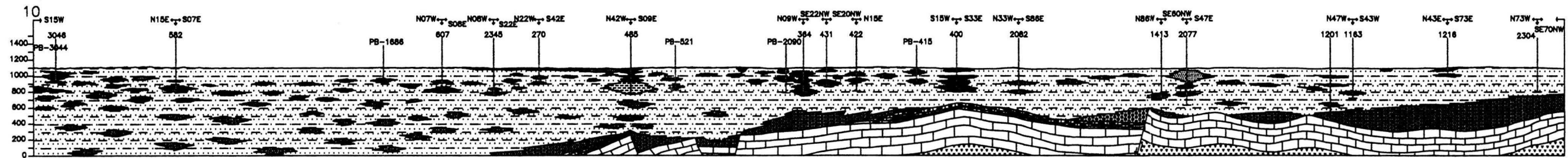
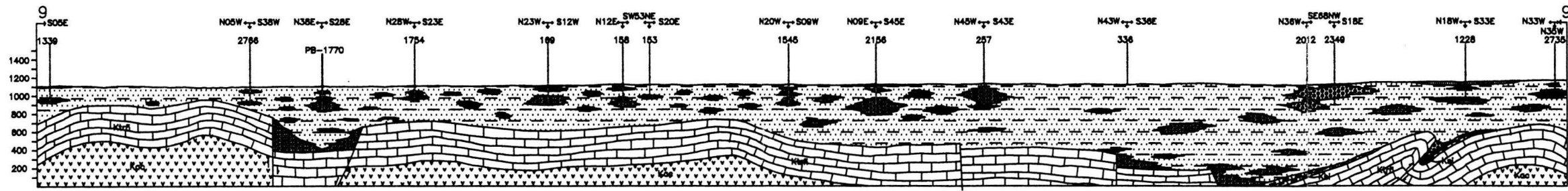
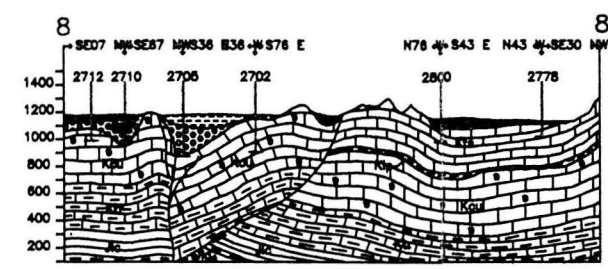
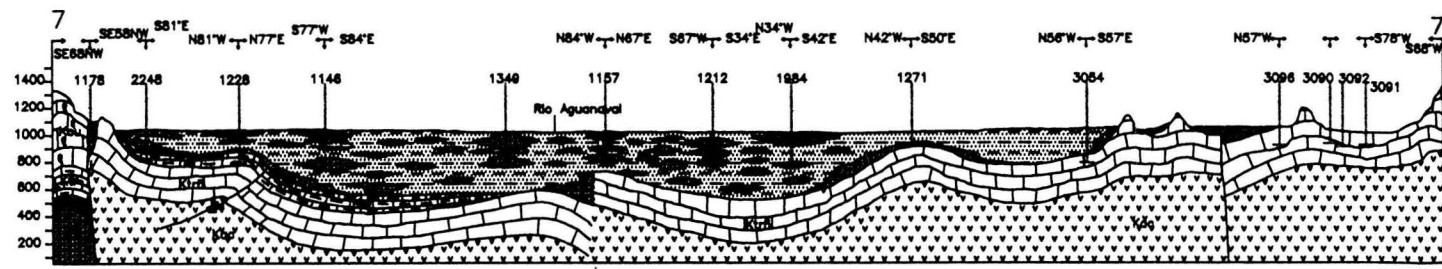
ESCALA HORIZONTAL 1:100,000



Figura 1.5 Secciones geológicas

SIMBOLOGIA

- ARENAS
- ARCILLAS
- GRAVAS CON ARENA Y ARSILLA
- GRAVAS
- GRAVAS ARENOSAS
- ARCILLA-ARENOSA
- Tigb Terclario Igneo Basaltico
- Kal Fm. Indidura
- Ktrñ Fm. Treviño
- Kac Fm. Acattifa
- Kts Fm. Tamaulipas Superior
- Klp Fm. La Peña
- Kcu Fm. Cupido
- Ktr Fm. Taraises
- Jlc Fm. La Casita
- Jlg Fm. La Gloria



ESCALA VERTICAL 1:20,000
 200 0 400 800
 METROS

ESCALA HORIZONTAL 1:100,000
 0 1 2 3 4 5
 KILOMETROS

Figura 1.6 Secciones geológicas

Figura 1.4. Columna estratigráfica (Tomada de CNA, 1999)

ERA	SIST.	SERIE	PISO	ÁREA	ÁREA	ÁREA
				COMARCA LAGUNERA	ESMERALDA PLAT. COAH.	P. OVALLOS GOLFO SABINAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE		SED. CONT. (CC)	SED. CONT. (CC)	SED. CONT. (CC)
		PLEISTOCENO		BASALTOS		
	TERCIARIO	PLIOCENO				
		MIOCENO		RIOLITAS	RIOLITAS	
		OLIGOCENO		ANDI BAS. GRANITO	ANDESITAS	
			EOCENO		AHUCHILA	
		PALEOCENO				
		MESOZOICO	SUPERIOR	MASTRICHTIANO		
	CAMPANIANO					DIMOS
	SANTONIANO					
CONIACIANO				FM. INDIDURA	SAN CARLOS	AUSTIN
TURONIANO						E FORD
CENOMANIANO						WASHITA
						AURORA
INFERIOR	SUP.					
	MED.					
	INF.					
	GARGASIAN.			LA PEÑA	LA PEÑA	LA PEÑA
	BEDOULIA.					
	BARREMIA.					
	HAUTERIV.				SAN MARCOS	
JURÁSICO	TITHONIANO			LA CASITA		LA CASITA
	KIMMERIDGIANO					
	ARGOVIANO					
	DIVESIANO					
	MEDIO INFERIOR		NAZAS			

Los sedimentos de origen aluvial se localizan en las inmediaciones de las sierras, donde alcanzan espesores de 100 a 250 m y extensiones laterales de 2.5 hasta 5.0 km, conformando una geometría lenticular, interdigitándose lateralmente con los sedimentos fluviales de facies de planicies de inundación. En las zonas donde se encuentran los bajos estructurales (secciones 4, 11 y 12) las facies aluviales alcanzan a conformar cuerpos granulares de 150 hasta 700 m, debido a la actividad de las fallas normales (CNA, 1999).

Los sedimentos depositados como producto de la actividad de los ríos Nazas y Aguanaval en facies de canal, bancos de arenas y planicies o llanuras de inundación, constituyen gran parte del volumen del material granular que relleno el valle de la Comarca Lagunera. Las facies de canal asociadas al río Nazas (figura 1.2) se encuentran distribuidas principalmente

a lo largo de una franja orientada N-S, entre la ciudad de Gómez Palacio y la población de Tlahualilo de Zaragoza, dirección en la que el cauce original del Río Nazas corría bajo un sistema de canales entrelazados (secciones 1, 2, 3, 9, 10 y 11). A través de su historia evolutiva el cauce del río Nazas ha migrado hacia el oriente, en forma de corrientes meandriiformes depositando sedimentos de paleocanal orientados NW-SE observados en las secciones 2, 3 y 4. En este sector, el espesor de los cuerpos gravillentos disminuye, en tanto que la presencia de paquetes arenosos se manifiestan con mayor frecuencia, indicando una notoria disminución del régimen de energía del río. Es probable que estos sedimentos alcancen profundidades de 600 hasta 1000 m. La distribución de las facies de canal derivadas del cauce del río Aguanaval es más restringida y se observa solamente en las secciones 5 y 7, lo que indica una baja energía del río y su limitada capacidad para acarrear fragmentos de mayor granulometría que las arenas, limos y arcillas (CNA, 1999).

En lo que respecta a la facies de canal derivada del cauce del río Aguanaval, su distribución es más esporádica, lo que indica una baja energía del río tipo meandriiforme y su limitada capacidad para acarrear fragmentos de mayor granulometría que las arenas, limos y arcillas.

El mayor volumen de sedimentos depositados en el acuífero corresponde a facies de planicies de inundación, representadas por clásticos del tamaño de las arenas, limos y arcillas. Las zonas en donde las facies de planicies de inundación predominan sobre las de canales fluviales, se localizan hacia los flancos de la zona de canales asociados a la antigua trayectoria del río Nazas, a lo largo de una franja orientada N-S (secciones 1, 2, 3, 9, 10 y 11), entre la ciudad de Gómez Palacio y la población de Tlahualilo de Zaragoza, así mismo, facies de planicies de inundación se encuentran tanto al norte como a lo largo del cauce del río Aguanaval. Los espesores considerados para esta secuencia clástica areno-pelítica varían de 400 m a 700 m (CNA, 1999).

Las facies lacustres conformadas por sedimentos arcillosos se localizan hacia los sectores centro septentrional (Laguna de Tlahualilo), centro oriental (Laguna de Mayrán) y sur oriente del valle (Laguna de Viesca), estos sitios establecen la desembocadura de los ríos Nazas y Aguanaval. El espesor de esta facies se estima entre 100 y 400 m. Las zonas al sur de Tlahualilo, Finisterre en la porción norte de la zona de estudio y en la zona de Matamoros, al sur de la Región pertenecen a facies lacustres con altos contenidos de arcilla, como se observa en las figuras 1.5 y 1.6.

TABLA 1. UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS. Se indica nombre de la Formación, el autor que la definió, su descripción, ambiente geológico y edad (Adaptado de CNA, 1999)

FORMACIÓN	DESCRIPCIÓN	AMBIENTE Y EDAD
Formación Nazas (Pantoja, 1963)	Materiales vulcanosedimentarios Lutitas, limolitas, areniscas rojas y conglomeráticas. Aflora en la Sierra de Jimulco.	Arco continental Jurásico inferior-medio
Formación Gloria (Imay, 1936)	Areniscas cuarcíferas de grano medio a grueso en partes conglomeráticas, cementadas con carbonato de calcio intercaladas con calizas de textura mudstone y wackstone de peletoides y oncolitos, y con limolitas y lutitas. Descansa sobre la F. Nazas en discordancia angular. Aflora en los núcleos de los anticlinales al sur de Viesca y al sur de Torreón.	Ambiente marino de plataforma en facies intralitorales Oxfordiano
Formación La Casita (Imay, 1936)	En su parte inferior areniscas cuarzosas despáticas interestratificadas con delgados horizontes de lutitas; la porción media, por lutitas fisiles con intercalaciones de laminillas de yeso y algunos estratos delgados de caliza; y en la parte superior lutitas con amonitas y nódulos calcáreos interestratificados con calizas arcillosas. Contactos concordantes con F. La Gloria y Taraises. Aflora al sur de Viesca y poniente y sur de Torreón	Ambiente marino, en aguas cercanas a la costa y a la fuente de sedimentos. Fase transgresiva local Kimmerigdiano-Tithoniano
Formación Taraises (Imay, 1936)	Calizas con textura mudstone y en ocasiones wackstone, con intercalaciones de margas y calizas arcillosas. Abundantes nódulos de hematita de tamaños variados, que disminuyen hacia la base. Muy características las vetas y vetillas de calcita, así como los óxidos de hierro diseminados en la roca. Fósiles de amonitas. Contacto nítido y concordante con la F. Cupido. Cambia a facies arenosas de la F. Carbonera hacia el poniente de Torreón y Gómez Palacio. Aflora en la porción meridional.	Ambiente marino de plataforma asociado con una extensa rampa sensiblemente inclinada, alejada de la costa, en donde prevalecieron condiciones hidrológicas de baja energía. Berriasiano-Hauteriviano inferior
Formación Cupido (Imay 1937)	Dolomías de textura sacaroide, especialmente en la base y calizas de textura packstone, wackstone y grainstone de microfósiles, especialmente de miliólidos y peletoides y rudistas. Con intercalaciones de calizas mudstone, calizas dolomitizadas y dolomías calcáreas. Presentan abundantes fracturas selladas con calcita. Contactos concordantes con las F. Peña y Taraises. Aflora al poniente de la Sierra El Rosario	Ambiente marino de plataforma con margen de barrera arrecifal, y facies lagunar. Las dolomías están asociadas a evaporación en un ambiente de supramareas. Hauteriviano Superior-Aptiano Inferior
Formación La Peña (Imay, 1936 y Humphrey, 1946)	Secuencia de intercalaciones de mudstone arcillosos y lutitas calcáreas. Se observan vetillas selladas por calcita, así como diseminaciones de óxidos y nódulos de hematita. Contacto nítido y concordante con la F. Cupido. Aflora en los flancos de las estructuras	Ambiente marino de plataforma abierta Aptiano y Aptiano Superior
Formación Tamaulipas Superior (Muir, 1936)	Secuencia de rocas carbonatadas de textura mudstone, que varía a wackstone y packstone. Con lentes y nódulos de pedernal y en menor proporción nódulos de hierro. Vetas y vetillas de calcita. Fósiles de bivalvos y amonitas. Contactos concordantes con las F. Peña e Indidura. Aflora en los flancos de las estructuras al sur y al poniente	Ambiente de mar abierto. Sin aporte de terrígenos por ausencia de zonas emergidas. Albiano inferior a albiano superior

FORMACIÓN	DESCRIPCIÓN	AMBIENTE Y EDAD
Formación Viesca (Garza 1973)	Calizas arrecifales de textura boundstone con abundantes rudistas, corales, radiolíticos. Cambia lateralmente a facies de mar abierto de la F. Tamaulipas y hacia el post-arrecife de la F. Treviño. Aflora al sureste	Ambiente marino arrecifal Albiano Medio-Superior
Formación Treviño (Garza 1973)	Calizas con textura wackestones de pelletoides, bioclastos, pelecípodos, miliólidos y escasos rudistas, con intercalaciones de dolomías de textura sacaroide. Lentes y bandas de pedernal. Abundantes estructuras de disolución, estilolitas y vetillas de calcita. Presencia de horizontes de yeso. Contactos concordantes con las F. Acatita e Indidura. Aflora en la parte central y oriente, en las Sierras Mayrán, Cuchillas, Las Carretas, Las Delicias, Tlahualilo, Zavaleta, al sur de Viesca y al sur de Torreón y Ciudad Lerdo.	Ambiente marino facies lagunares Albiano Medio y Superior
Formación Acatita (Humphrey 1956)	Calizas, calizas dolomíticas, yesos y anhidritas. Lentes y nódulos de pedernal. Contacto concordante con la F. Treviño. Aflora en la porción centro y sur de Coahuila y noreste de Durango.	Facies lagunar Albiano inferior y medio
Formación Indidura (Kelly 1936)	Alternancia de calizas arcillosas, margas, lutitas calcáreas y esporádicas areniscas. Se observan bien estratificadas, fracturadas, con vetas y vetillas de calcita, y comunes diseminaciones de óxidos de hierro. Contacto concordante con las F. Tamaulipas Superior y Treviño. Aflora al occidente de la Sierra El Rosario, norte de la Sierra El Samoso y occidente de la Sierra de Parras	Ambiente de mar abierto Cenomaniano Inferior al Santoniano terminal
Formación Ahuichila (Rogers 1957)	Miembro inferior de material tobáceo y arenisca poco consolidada, interestratificada con capas delgadas de yeso. Miembro superior de conglomerado bien cementado. Los clastos de caliza, pedernal y rocas volcánicas, areniscas, tobas y conglomerados. Contacto inferior en discordancia angular con las rocas cretácicas. Aflora en el Sureste y en la base de los elementos orográficos de mayor elevación	Oligoceno medio
Terciario ígneo intrusivo	Rocas de composición granítica de textura holocristalina de grano medio. Minerales esenciales microclina, andesina, oligoclasa, como accesorios ferromagnesianos y secundarios calcita, hematita, limolita, sericita, minerales arcillosos y siderita. Intrusionan a las rocas sedimentarias cretácicas. Aflora en la Sierra del Samoso	Intrusión durante la orogenia Laramídico Eoceno-Oligoceno
Ígneo extrusivo indiferenciado	Riolitas, andesitas y basaltos. Las riolitas corresponden a derrames, brechs y tobas Andesitas de textura porfídica con cristales de plagioclasa, homblenda, biotita y augita. Basaltos de textura porfídica, afanítica y fluidal con plagioclasas, piroxenos y anfíboles. Aflora al norte de Mapimí y al suroeste	Terciario inferior a Terciario Superior
Depósitos aluviolacustres y fluviales	Material granular constituido de sedimentos desde arcillas, hasta gravas y bloques. Con un grado muy incipiente de compactación y en ocasiones cementados por caliche. Aflora en el valle	Ambiente continental, fluvial aluvial y lacustre Cuaternario
Basaltos	Derrames de basalto fracturados de textura afanítica y en ocasiones vesicular. Minerales plagioclasa, fenocristales de olivino, augita, magnetita y hematina	Cuaternario

1.6 HIDROGEOLOGÍA

El acuífero de la Comarca Lagunera está integrado por un medio granular y un medio fracturado. El medio granular está conformado por los sedimentos aluviales, fluviales y lacustres del Cuaternario. El medio fracturado corresponde a las rocas calcáreas del Cretácico Superior, así como a las rocas volcánicas fracturadas, en donde las fallas y fracturas controlan el movimiento del agua subterránea. Ambos medios conforman un acuífero libre heterogéneo y anisótropo.

La mayoría de los pozos en la Comarca Lagunera, extraen el agua subterránea del medio granular. Mientras que en el medio calcáreo existen pocos aprovechamientos debido a que el nivel piezométrico en este medio presenta una rápida variación estacional, resultado de su alta conductividad hidráulica y su baja capacidad de almacenamiento (IMTA, 1991).

La conductividad hidráulica del medio granular depende de las características texturales y de estructura, como el tamaño de los clastos, grado de selección, compactación, consolidación y composición. Debido a la presencia de materiales muy compactados y de horizontes de arcillas, pueden ocasionar en algunos sectores del acuífero áreas donde éste se comporte como semiconfinado e inclusive, confinado.

La conductividad hidráulica de las rocas carbonatadas depende de sus características texturales, del grado de disolución y del fracturamiento. La circulación del agua en las rocas calcáreas ocurre principalmente en la dirección de las estructuras geológicas y aflora en forma de manantiales en zonas de falla o áreas en donde la caliza permeable se encuentra en contacto con el relleno aluviolacustre (IMTA, 1991; CNA, 1999).

La conductividad hidráulica de las ignimbritas depende principalmente de la intersección de los planos de diaclasas y fracturas de la roca, por lo que es mayor en dirección vertical que en la horizontal. Las rocas de composición basáltica se encuentran emplazadas a manera de coladas, y presentan un sistema de fracturamiento de enfriamiento, así como estructura vesicular que le confieren a la roca alta conductividad hidráulica, especialmente en dirección vertical. Sin embargo las rocas volcánicas son de limitada importancia en el acuífero debido a su escasa distribución en la zona de estudio.

Las rocas del Jurásico y Cretácico Inferior no presentan interés para la explotación del agua subterránea, debido a la gran profundidad a la que se encuentran en la zona del Valle, y a la elevada arcillosidad o estructura compacta que la caracteriza.

Las rocas clásticas pelíticas del Cretácico afloran principalmente en los ejes de los sinclinales, ya que constituyen la cima de la secuencia cretácica. De acuerdo a la información existente esta unidad no tiene continuidad en toda la zona de estudio, sin embargo en las zonas donde se encuentran sobreyaciendo a las rocas carbonatadas, se comportan como un acuitardo que separa a los materiales granulares cenozoicos y favorece el desarrollo de un acuífero confinado en las rocas calcáreas (CNA, 1999).

El basamento hidrogeológico está conformado por las rocas del Jurásico y del Cretácico Inferior, así como por las rocas calcáreas del Cretácico Superior que presentan bajo grado de fracturamiento y disolución. El cuerpo intrusivo de composición granítica que aflora en la Sierra El Sarnoso también es de baja conductividad hidráulica, sin embargo, se carece de información en los cortes litológicos de los pozos acerca de la presencia de este elemento en la parte basal del componente granular del acuífero (CNA, 1999).

En condiciones naturales la dirección de flujo subterráneo predominante era de suroeste a noreste, mostrando cierto paralelismo con los cauces de los Ríos Nazas y Aguanaval, quienes representaban la principal fuente de recarga al medio granular (CNA, 1992; CNA, 1999). Las zonas de descarga ocurrían en forma natural en las lagunas de Viesca y Mayrán al este y noreste de la zona de estudio (Figura 1.7).

La extracción del agua subterránea para uso agrícola comenzó en la década de 1920. Como consecuencia de las aguas someras y los altos rendimientos, para 1940 ya existían aproximadamente 1000 pozos en la zona. La construcción de la Presa Lázaro Cárdenas en 1946 al impedir el curso natural del Río Nazas, disminuyó considerablemente la fuente de recarga al acuífero, adicionalmente para 1950 existían cerca de 3000 pozos perforados en la región (CNA, 1999).

La sobreexplotación del acuífero y la regularización de los ríos Nazas y Aguanaval ha ocasionado la presencia de fuertes conos de abatimiento, la desaparición de los lagos que daban a la zona el nombre de Comarca Lagunera y el deterioro de la calidad del agua subterránea. En las exlagunas de Viesca y Mayrán, actualmente se observa la presencia de suelos salinos, como única evidencia de la zona de descarga que representaban en condiciones naturales (Figura 1.8).

En 1975 la dirección de flujo subterráneo ya había sido fuertemente alterada, manifestándose ya la presencia de conos de abatimiento en la Región (figura 1.9). Actualmente existen conos de abatimiento distribuidos en toda la región; tal como se muestra en la figura 1.10. En muchos casos el nivel piezométrico en 1999 rebasa los 100 m de profundidad (figura 1.11), por lo que los costos de extracción son muy elevados y la calidad del recurso es cada vez menor. El abatimiento promedio ha sido de 1.6 m/año y el

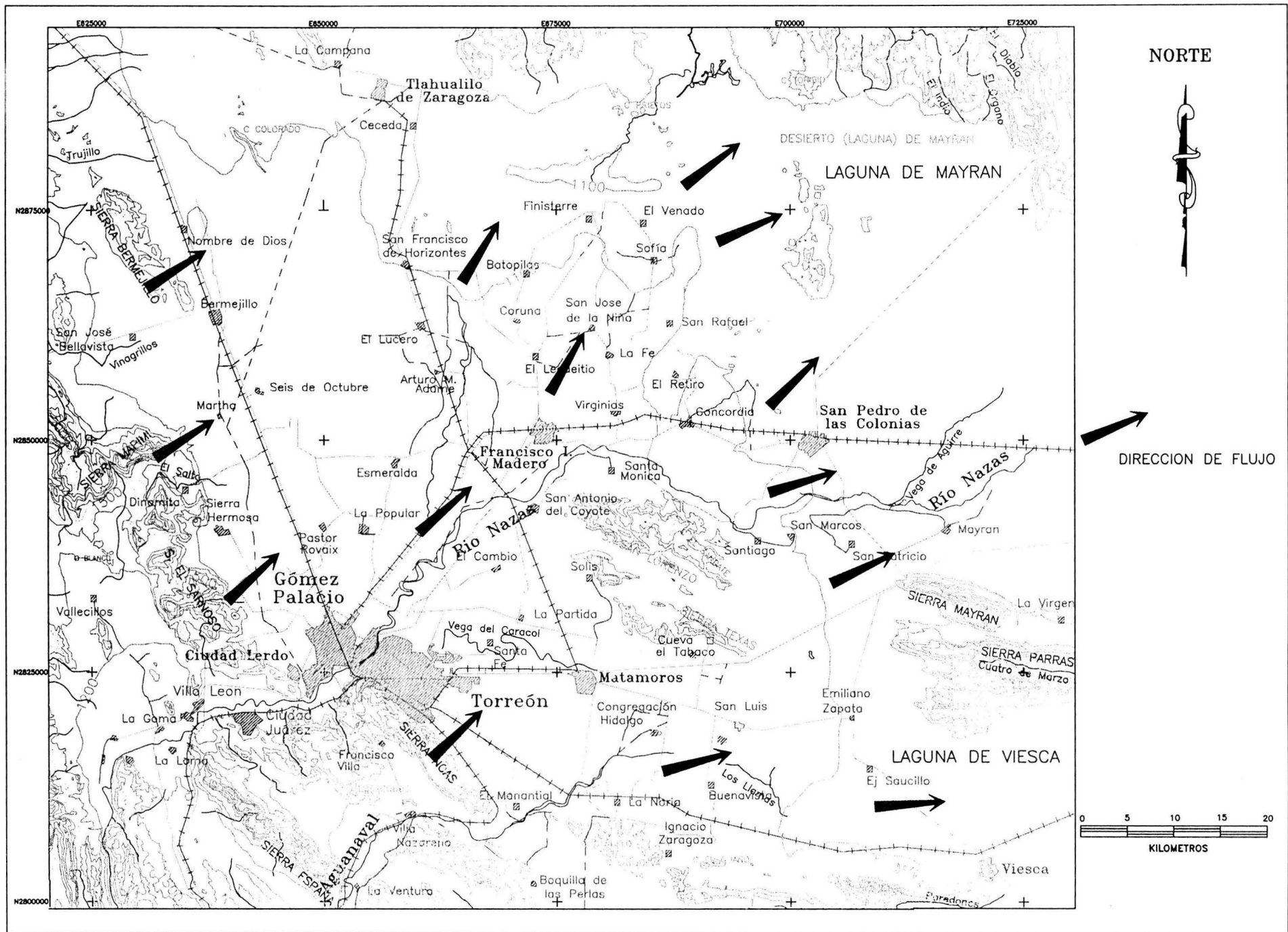
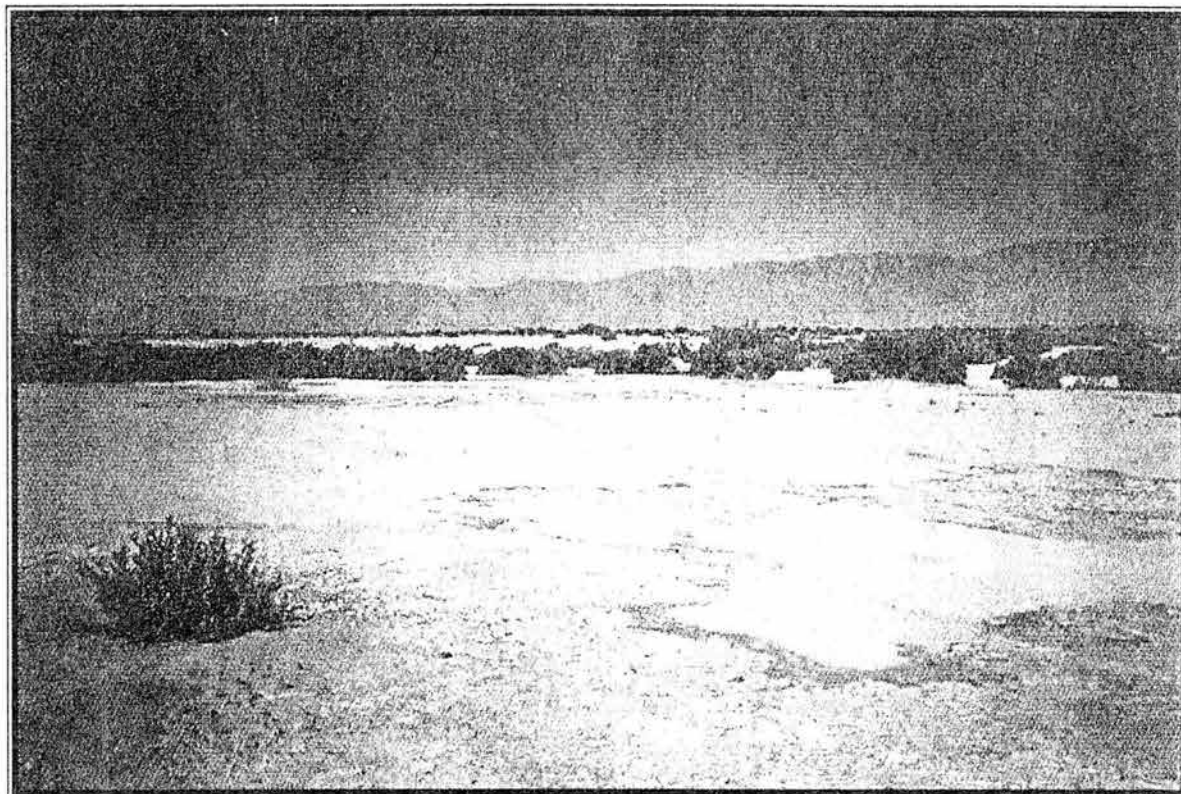


Figura 1.7 Dirección de flujo en condiciones originales (antes de 1940)

creciente desarrollo que ha ocurrido recientemente en la zona, amenaza aún más la situación del agua subterránea, ya de por sí crítica en la Comarca Lagunera (CNA, 1999).

Figura 1.8 Presencia de suelos salinos en la exlaguna de Viesca en el año 2000



1.7 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El arsénico ha sido el principal foco de atención en torno a la calidad del agua subterránea en la Comarca Lagunera; debido a que desde la década de los sesenta del siglo XX se identificó la presencia de elevadas concentraciones de arsénico en el agua subterránea de la Región, así como efectos adversos en la salud de la población por consumir agua con altas concentraciones de arsénico (Albores *et al*, 1979; Catellano *et al*, 1964; Cebrián *et al*, 1983; Cebrián, 1987; Chávez *et al*, 1964; Espinosa, 1963; García *et al*, 1991, Ortiz *et al*, 1963; Sánchez de la Fuente, 1976).

El arsénico es tóxico y cancerígeno. La exposición crónica al arsénico provoca mal funcionamiento cardiovascular, carcinomas dérmicos y efectos neurológicos. Los órganos más afectados son la piel, las membranas mucosas y el sistema nervioso periférico. Los

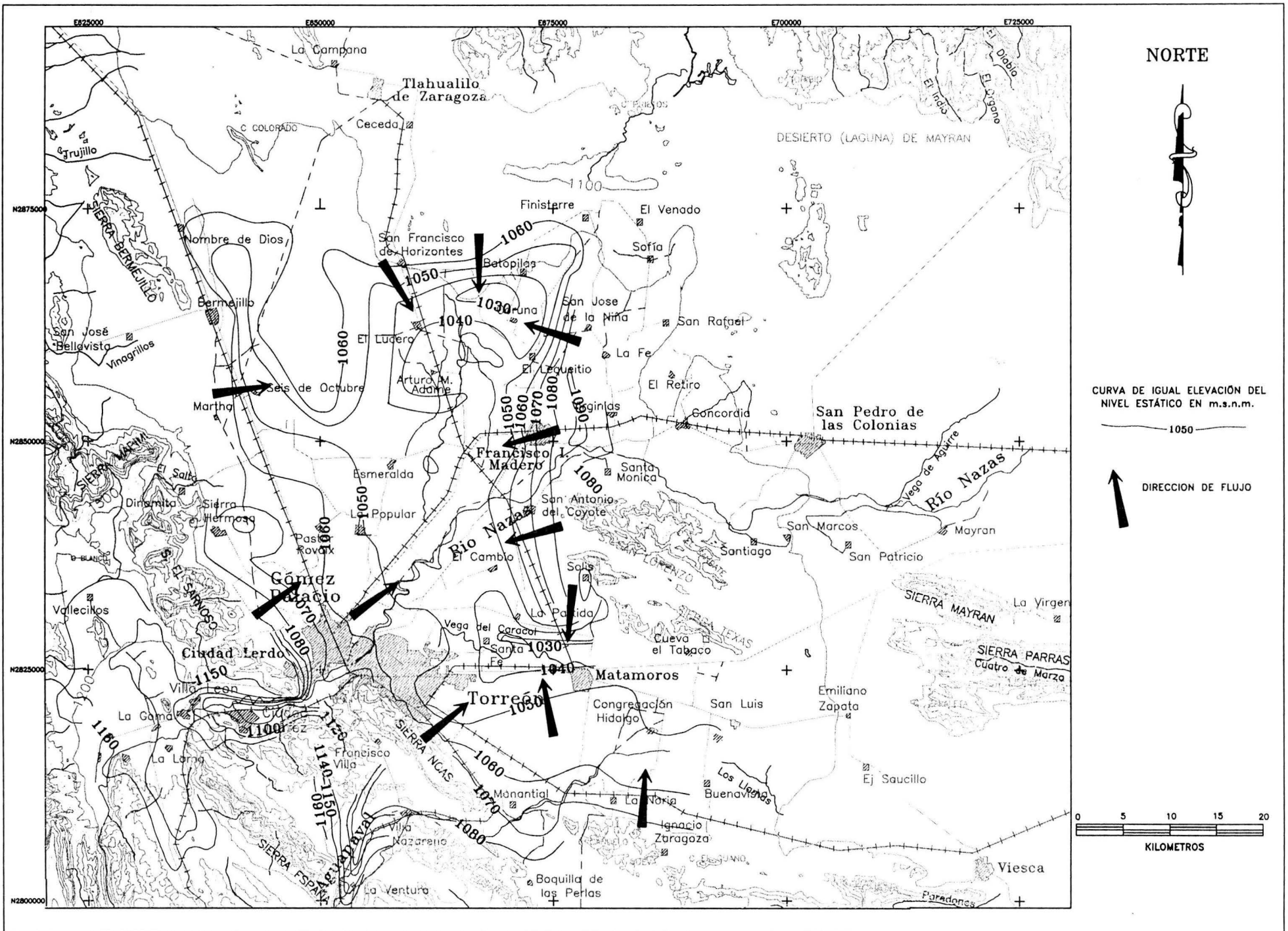


Figura 1.9 Dirección de flujo en 1975 (Adaptado de CNA, 1999)

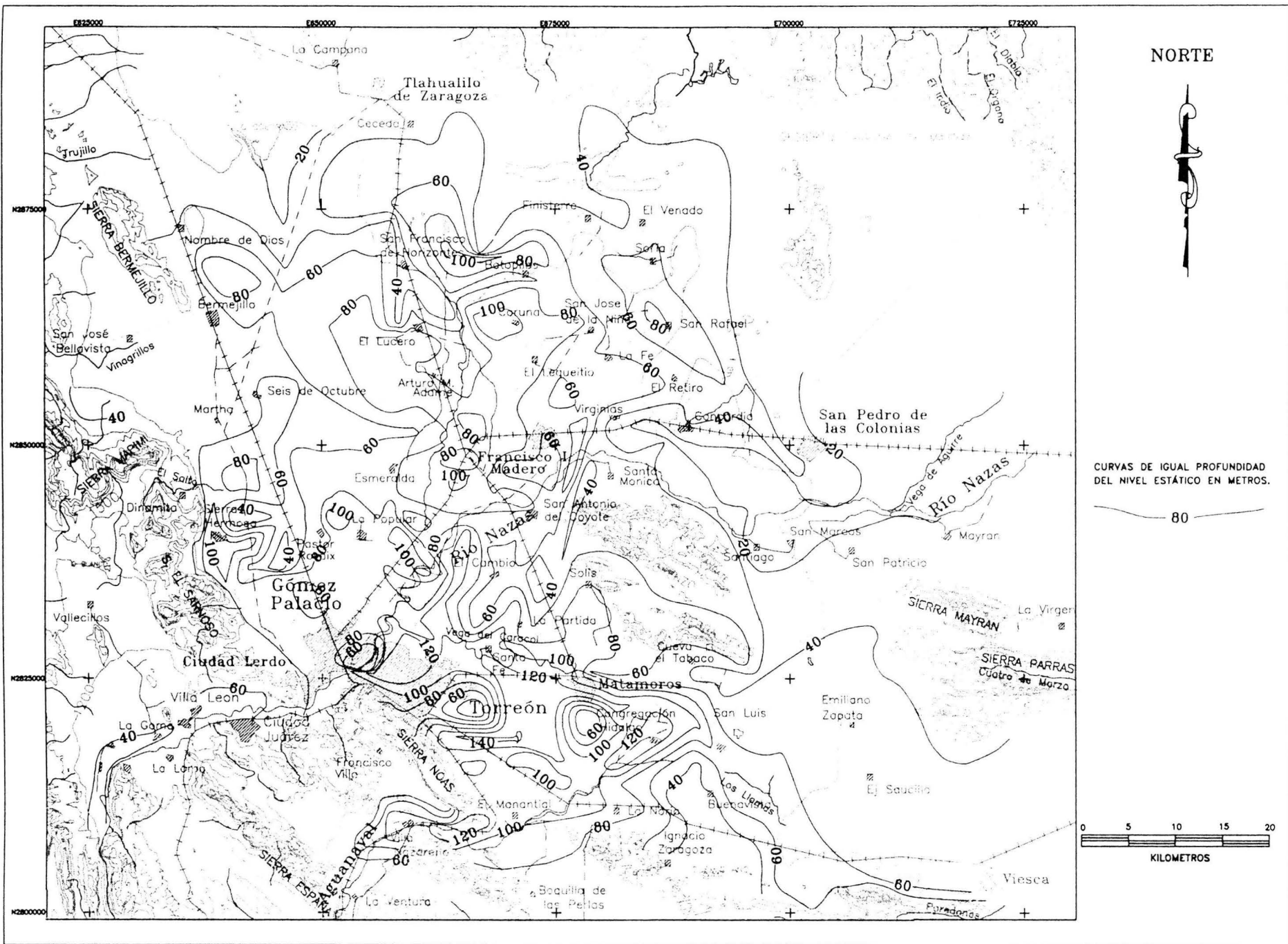


Figura 1.11 Profundidad al nivel estático en 1999 (Adaptado de CNA, 1999)

daños en la piel se manifiestan con dermatitis, erupciones vesiculares, hiperpigmentación, depigmentación, queratosis, hiperqueratosis, hiperhidrosis y cáncer de piel. Las membranas mucosas presentan irritación, en los ojos se manifiesta con conjuntivitis y en la nariz con rinitis y hasta perforación del tabique nasal. En el sistema nervioso se producen alteraciones de las extremidades con dolor, punzadas y picazón, debilidad muscular cercana a la parálisis, encefalopatía y cefaleas crónicas (Gorby, 1994; Edmunds, 1996).

La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación y de si se trata de las formas orgánicas o inorgánicas. Del mayor al menor grado de toxicidad son como siguen arsina (-III), compuestos orgánicos de arsina, arsenitos (III), óxidos (III), arsenatos (V), metales de arsonium (I) y arsénico nativo (0) (Welch *et al*, 1988).

El arsénico disuelto en el agua subterránea generalmente se encuentra como oxianión, cuyas especies más importantes son los arsenatos con estado de oxidación V ($H_nAsO_4^{3-n}$) y los arsenitos, con estado de oxidación III ($H_nAsO_3^{2-n}$). Estas especies son solubles en un amplio intervalo de pH, pero en condiciones oxidantes la especie que predomina es la de los arsenatos; mientras que en ambientes reductores predominan los arsenitos (Welch, *et al*, 1988; Edmunds, 1996).

Hasta hace unos años, internacionalmente la concentración máxima permisible de arsénico en el agua para consumo humano era de 0.05 mg/l. Sin embargo, debido a que se ha identificado un incremento en el riesgo de contraer cáncer asociado a la exposición de bajas concentraciones de arsénico, incluso menores a 0.05 mg/l, recientemente la National Academy of Sciences (1999) ha recomendado que el estándar internacional de arsénico en el agua para consumo humano debe disminuir (National Institute of Health, 1998). La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2001) ha establecido que la concentración del arsénico en el agua para consumo humano debe ser menor a 0.01 mg/l, de acuerdo con criterios de salud. En Estados Unidos de América, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2000) analizando la exposición de humanos al arsénico a partir de su presencia en el agua de consumo o debido a las actividades que desarrollan en su trabajo, ha identificado al arsénico como un agente cancerígeno, por lo que han propuesto disminuir el límite máximo permisible gradualmente. En México el límite máximo permisible de arsénico en agua para consumo humano está regulado por la NOM-127-SSA1-1994; hasta el año 2000 este límite era de 0.05 mg/l; pero dicha norma fue modificada en ese año, indicando que el límite máximo permisible para arsénico en agua potable se ajustará anualmente de forma gradual en 0.005mg/l por año, desde 0.045 mg/l para el año 2001, 0.040 mg/l para el 2002 y así sucesivamente hasta llegar a 0.025 mg/l para el año 2005 (SSA,2002). Esta situación sin duda agravará la problemática del arsénico en la Comarca Lagunera.

Welch *et al.*, (1999) señalan que en los Estados Unidos de América las concentraciones elevadas de As en el agua subterránea, generalmente se relacionan con flujo vertical ascendente de agua termal, disolución o desorción a partir de óxidos de hierro, disolución de sulfuros metálicos y concentración por evaporación. Y señalan que en Estados Unidos de América la liberación de arsénico a partir de óxidos de hierro parece ser la causa más común de las concentraciones mayores a 0.01 mg/l en el agua subterránea.

La movilidad de las diversas especies de arsénico en la mayoría de las aguas naturales está controlada por procesos de desorción-adsorción en fases sólidas (Langmuir, 1997), como hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso; la adsorción disminuye cuando el pH se eleva (Davies y Kent, 1990). En general, el Arsénico (V) se considera que se adsorbe más fuertemente que el As (III) y por lo tanto presenta menor movilidad.

La presencia de arsénico en el agua subterránea de la Región Lagunera, identificado desde 1962 (Quiñones *et al.*, 1979) ha causado adversos efectos en la salud de la población. Estudios epidemiológicos y clínicos realizados en 1962, revelaron que 297 y 496 habitantes de las colonias Miguel Alemán y Eduardo Guerra de la ciudad de Torreón presentaron síntomas de exposición al arsénico (Escobar *et al.*, 1964; Ortiz *et al.*, 1963). Ambas colonias están localizadas al noreste de la ciudad a menos de 2 km de la Metalurgia Mexicana Peñoles S.A. que produce plomo, plata, trióxido de arsénico y óxidos de cadmio (Catellano *et al.*, 1964), por lo cual se creyó que la compañía minera era la responsable (Escobar *et al.*, 1964; Ortiz *et al.*, 1963). El agua potable proveniente de un pozo profundo localizado dentro de la colonia Alemán fue identificada como la principal fuente de arsénico, ya que presentaba concentraciones mayores a 0.05 mg/l, mientras que muestras provenientes de pozos de los alrededores eran menores a dicha concentración (Espinosa, 1963). Los análisis de pozos de Peñoles revelaron que dos pozos profundos estaban también contaminados con arsénico (Escobar *et al.*, 1964). Posteriormente, fue reportado que dos pozos de los 17 pozos urbanos analizados también tenían concentraciones de arsénico arriba del límite máximo permisible para consumo humano (Viniestra *et al.*, 1964). Entonces el estudio se extendió a toda el área; en 1962 se realizaron análisis de 193 pozos de la región Lagunera, que revelaron que la contaminación del arsénico era extensiva y que sólo el 37.4 % de las muestras tenían concentraciones menores a 0.05 mg/l (Viniestra *et al.*, 1964).

Las concentraciones de arsénico en el agua subterránea en el área de Finisterre, localizada 67 km al noreste de Torreón variaban de 0.628 a 0.949 mg/l, con un promedio de 0.782 mg/l, mismas que había provocado la muerte de seis personas (Chávez *et al.*, 1964). Otro estudio reportó que las concentraciones de arsénico en 47 pozos

muestreados en 17 comunidades en la misma área variaba de 0.6 a 0.9 mg/l (Sánchez de la Fuente *et al*, 1976). El estudio reveló que 19.3 % de los habitantes de Finisterre habían presentado algunas manifestaciones clínicas relacionadas con el arsénico. Las determinaciones de arsénico en cabello, orina y uñas de los pacientes revelaron altas concentraciones.

En el período 1975-1986 los análisis de 258 pozos revelaron que más del 50 % (132 pozos) estaban por arriba del límite máximo permisible para consumo humano (Cebrián, 1987). Albores *et al* (1979) indican que antes de 1977 la concentración de arsénico en el agua potable de El Salvador de Arriba era de 0.5 mg/l, dicho pueblo está localizado en la porción noreste de la zona de estudio, mientras que en San José del Viñedo, Durango, localizado en la porción central la concentración de arsénico era de 0.001 mg/l. En 1986 el CINVESTAV reportó que la concentración de arsénico total en 128 pozos muestreados en toda el área varió de 0.008 a 0.624 mg/l. La mitad de los pozos mostraron concentraciones arriba de 0.05 mg/l.

El primer estudio de especiación del arsénico se efectuó en 1980 en el poblado El Salvador de Arriba, encontrando que el arsénico estaba presente como inorgánico, en un 70 % como arsenato y el resto como arsenito (Cebrián, 1983).

El CINVESTAV(1986) encontró que la mayoría del arsénico está en forma inorgánica como As(V) y As(III), el primero fue la especie predominante en el 93 % de las muestras, mientras que el último estuvo presente en porcentajes variables en el 36 % de las muestras. Los orgánicos arsenicales MMA y DMA fueron encontrados en pequeñas cantidades en todas las muestras, MMA menor a 0.003 mg/l mientras que DMA varía de trazas en 92 % de las muestras a 0.02 mg/l.

García *et al* (1991) reportaron concentraciones de arsénico de 0.39 mg/l en el agua potable del pueblo de Santa Nana localizado en el noreste de la Región Lagunera. El agua provenía de un pozo profundo en el que la especiación mostró que el 98 % estaba en forma pentavalente y el resto como trivalente (Ostrosky *et al*, 1991).

El CINVESTAV también reportó que el fluoruro varió de 0.5 a 3.7 mg/l, sin embargo una baja proporción del agua tiene concentraciones mayores a 1.5 mg/l, y éstas se localizan también al norte de la Región Lagunera.

En 1986 los pozos contaminados se encontraban en las áreas rurales del norte de la Región Lagunera. En 19 comunidades del municipio de Francisco I. Madero estaban relacionadas con problemas de salud y altas concentraciones de fluoruro provocaron varios casos de fluorosis dental que ha sido reportada en esta área, y se sugirió una correlación directa entre el arsénico y el fluoruro (SSA, 1986).

No hay evidencia de contaminación con fluoruro y arsénico en las fuentes de suministro de agua potable de las ciudades de Torreón, Gómez Palacio y Lerdo, sin embargo se estima que aproximadamente cuatrocientos mil habitantes del área rural del noreste de la Región Lagunera están expuestas a altas concentraciones de arsénico y fluoruro en el agua (Del Razo *et al*, 1993).

En 1991, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua desarrolló un proyecto llamado Estudio hidrogeoquímico e isotópico del acuífero granular de La Laguna; en este estudio se analizaron muestras de agua de las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco así como de 95 pozos distribuidos en todo el acuífero.

El estudio del IMTA (1991) mostró que grandes áreas de la Región Lagunera tienen concentraciones de arsénico arriba de 0.05 mg/l. Las concentraciones en este estudio variaron de 0.003 a 0.443 mg/l. Las mayores concentraciones de arsénico fueron encontradas en los depósitos de laguna localizados en la porción noreste de la cuenca así como en las porciones noroeste y sureste; estas dos últimas asociadas con formaciones calcáreas.

El estudio del IMTA (1991) plantea las siguientes hipótesis del origen del arsénico:

- 1) El material de desecho de la industria Metalurgia Mexicana Peñoles, S.A., ubicada la sur de la ciudad de Torreón, que procesa 430 toneladas diarias de minerales concentrados de plomo, generalmente asociadas a ciertas especies del arsénico como el rejalgar (AsS) y la arsenopirita (FeAsS).
- 2) Lixiviación de pesticidas arsenicales utilizados en el Distrito de Riego 017 (arsenitos como herbicidas y arsenatos como insecticidas).
- 3) Los ríos Sixtín y Santiago, que originan al Río Nazas, discurren por diversas zonas mineralizadas de la Sierra Madre Occidental, por lo que los procesos de erosión-transporte-depósito de estas corrientes de agua, podrían haber aportado sedimentos arsenicales en el medio.
- 4) Procesos magmáticos que generaron las rocas ígneas intrusivas y extrusivas en la región pudieron originar un sistema hidrotermal que aportó una notable concentración de oligoelementos como litio, molibdeno, boro, arsénico y fluoruro.

El IMTA (1991) concluye que el más probable origen del arsénico está asociado a agua proveniente de extinta actividad hidrotermal, con base en los siguientes fundamentos: 1)

se observan altas concentraciones de arsénico cerca de rocas ígneas extrusivas; 2) altas concentraciones de arsénico son observadas en áreas con altas concentraciones de boro, molibdeno, litio, cloruro y fluoruro; 3) los pozos 3089 y 1573 localizados al sureste y noroeste del área respectivamente registran alta temperatura (42°C y 39 °C), presentan fuerte olor a ácido sulfhídrico y elevadas concentraciones de arsénico. 4) Pozos con altas concentraciones de arsénico corresponden a las aguas más antiguas del acuífero de acuerdo con los resultados isotópicos.

El IMTA (1991) descartó la posible presencia del arsénico en los sedimentos debido a las bajas concentraciones del arsénico encontradas en las aguas superficiales (de 0.007 a 0.0198 mg/l). También concluye que la Metalurgia Mexicana Peñoles, S.A., localizada en la ciudad de Torreón no es responsable de las altas concentraciones de arsénico, ya que un pozo localizado en el interior de la industria Peñoles y pozos aledaños a ella tienen concentraciones de arsénico menores a 0.01 mg/l y debido a que los resultados isotópicos señalan que el agua con arsénico es la más antigua. Los pesticidas usados en las actividades agrícolas no pueden ser la principal fuente de altas concentraciones de arsénico, pues éstas están asociadas en general a aguas subterráneas relativamente antiguas, ya que los valores de carbono 14 y tritio indican que el tiempo de residencia de las aguas portadoras del arsénico en general es muy grande. Los análisis isotópicos revelaron que la principal fuente de recarga ocurre en el río Nazas, ya que el tiempo de residencia del agua subterránea es corto en áreas cercanas al río, pero se incrementa hacia las márgenes de la cuenca.

Gutiérrez (1995) concluye que la fuente de arsénico más probable en la Región Lagunera está en los sedimentos finos que fueron transportados por flujo superficial de áreas con actividad volcánica provenientes de regiones aguas arriba de la Región Lagunera y cuyo depósito ocurrió en las márgenes de la cuenca en las zonas lacustres; el arsénico fue transportado principalmente como arsenatos adsorbidos en los hidróxidos de hierro. Así mismo afirma que las concentraciones de arsénico se ven incrementadas por el proceso de evaporación del agua superficial antes de la infiltración. Y plantea que los procesos de adsorción-desorción de arsenatos podría ser el más probable control del arsénico, y que el origen hidrotermal puede ser válido sólo en áreas aisladas. Aunque Gutiérrez sugiere que los procesos de adsorción-desorción pueden controlar el arsénico en la zona de estudio, no presenta ninguna discusión o análisis que lo lleven a esta conclusión.

Rosas *et al* (1997) realizaron análisis de arsénico en agua subterránea para riego, suelo agrícola en el que se siembra alfalfa, en forrajes, y en la leche de 17 establos en la Región Lagunera, y encontraron que el arsénico está presente en el agua subterránea en un 90 % como As (V). Se encontró la presencia de arsénico en el suelo, así como concentraciones mayores a 2.6 microgramos/gramo (considerado como límite máximo

permisible) en el 37 % de las hojas y raíces de alfalfa muestreadas, los valores fueron especialmente altos en la alfalfa sembrada en suelos con mayor contenido arenoso, en el que la capacidad de adsorción de arsénico es limitada y por tanto existe una mayor disponibilidad para la alfalfa, que constituye el principal alimento de las vacas lecheras en la región. Adicionalmente el 10 % de las muestras de leche presentan concentraciones de arsénico mayores a 10 ng/l, sugerido como el nivel máximo permisible por la Federación Lechera Internacional.

A pesar de los numerosos estudios efectuados en torno a la calidad del agua subterránea en la Región Lagunera, no se cuenta con datos completos y con un control de calidad adecuado para el entendimiento confiable y claro de los procesos hidrogeoquímicos que tienen lugar en la zona de estudio. Ello se debe a que en muchos casos sólo se determinó la concentración de arsénico por ser el elemento de interés y no se analizaron iones principales ni traza; en otros estudios las técnicas de muestreo, preservación y almacenamiento de las muestras fueron inadecuadas, y por tanto la composición del agua subterránea no está representada por los resultados obtenidos. Por ejemplo, el estudio desarrollado por el IMTA (1991) menciona que las muestras no fueron filtradas, ni adicionadas con algún preservador y que se mantuvieron durante cuatro meses a temperatura ambiente del orden de 24°C, antes de realizar las determinaciones analíticas. Los errores en el balance iónico obtenidos para dicho estudio fueron prácticamente todos mayores a 5 %, del orden de 25 %, por lo que las interpretaciones realizadas con esos datos no son del todo confiables. A las muestras tomadas por CINVESTAV (1986) no se les agregó ningún conservador, permanecieron a 4°C y se analizaron 2 meses después de la colecta (Del Razo *et al*, 1993), por lo que tampoco existe confiabilidad en los resultados de los análisis químicos obtenidos.

De lo anterior se desprende que es de gran importancia contar con datos confiables, así como con una interpretación que no sólo se centre en el arsénico, sino que desde un enfoque sistémico, analice de manera integral los principales procesos hidrogeoquímicos que controlan en general la composición química del agua subterránea. Con ello se logrará contar con una base sólida que permita enfocar estudios posteriores a la búsqueda de factores clave que ayuden a esclarecer el origen del arsénico, los mecanismos y procesos que lo liberan al agua subterránea y a establecer las medidas que deberán llevarse a cabo para su control en el agua destinada para consumo humano.

CAPÍTULO 2.- METODOLOGÍA

2.1 INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Se recabó la información geológica, geofísica, hidrogeológica, e hidrogeoquímica existente en estudios previos con la finalidad de conocer la zona de estudio y entender el funcionamiento hidrodinámico del acuífero, que sirve de fundamento al análisis hidrogeoquímico que en este estudio se efectúa. La integración y resumen de esta información se presentó en el capítulo anterior.

Así mismo en gabinete, se efectuó una selección preliminar de pozos a muestrear, de acuerdo con los siguientes criterios: características geológicas de la zona, condiciones hidrogeológicas, su posición en relación con la red de flujo, diseño constructivo del pozo, corte litológico, antecedentes de calidad del agua, cercanía a fuentes de contaminación como industrias, actividad agropecuaria, descargas de agua residual, tiraderos de basura, cementerios. De tal manera que los sitios seleccionados tuvieran una distribución más o menos homogénea en la zona de estudio.

2.2 MUESTREO Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO

Durante el período del 13 al 23 de noviembre del 2000 se tomaron muestras de agua subterránea a la descarga de 58 pozos agrícolas, de abrevadero o industriales y en dos sitios en los que el agua subterránea descarga a la superficie de forma natural aprovechando excavaciones realizadas por el ser humano, en el Cementerio El Carmen y El Relleno Sanitario de Torreón que se muestran en las figuras 2.1 y 2.2 respectivamente.

En los 60 sitios se tomaron muestras para la determinación en laboratorio de calcio, magnesio, sodio, potasio, sulfato, cloruro, nitratos, nitritos, fosfatos, fluoruro, sílice, arsénico, hierro, manganeso, cobre, mercurio, plomo, litio, berilio, aluminio, escandio, titanio, vanadio, cromo, manganeso, fierro, cobalto, níquel, cobre, zinc, galio, germanio, selenio, bromuro, rubidio, estroncio, itrio, zirconio, niobio, molibdeno, rutenio, paladio, plata, cadmio, indio, estaño, antimonio, telurio, yodo, cesio, bario, lantano, cerio, praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio, lutecio, hafnio, tantalio, tungsteno, renio, osmio, platino, oro, mercurio, talio, plomo, bismuto, torio, uranio, cianuro y sólidos totales disueltos. De los 60 sitios muestreados se determinaron coliformes totales y coliformes fecales solamente en 15, fenoles en 45, trihalometanos en 15, e isótopos de hidrógeno y de oxígeno en 37 aprovechamientos.

Simultáneamente al muestreo se midieron en campo la temperatura del agua subterránea a la descarga, pH, potencial de óxido-reducción, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y alcalinidad.

Aunque en gabinete se definió una selección preliminar de los sitios de muestreo de acuerdo con el análisis de la información previa, la selección definitiva de los sitios muestreados se llevó a cabo en el campo, durante el recorrido para verificar el funcionamiento e instalaciones de los pozos previamente seleccionados; de tal forma que se pudiera adaptar correctamente el equipo para la medición de los parámetros de campo y la adecuada toma de muestras.

Cada uno de los aprovechamientos muestreados fue localizado en campo por medio del Sistema de Posicionamiento Global, empleando para ello un equipo de GPS configurado para el datum NAD-27 con la finalidad de poder cartografiar directamente en los mapas de INEGI las coordenadas UTM obtenidas para cada sitio.

Figura 2.1 Descarga del agua subterránea en el Cementerio El Carmen, en Torreón

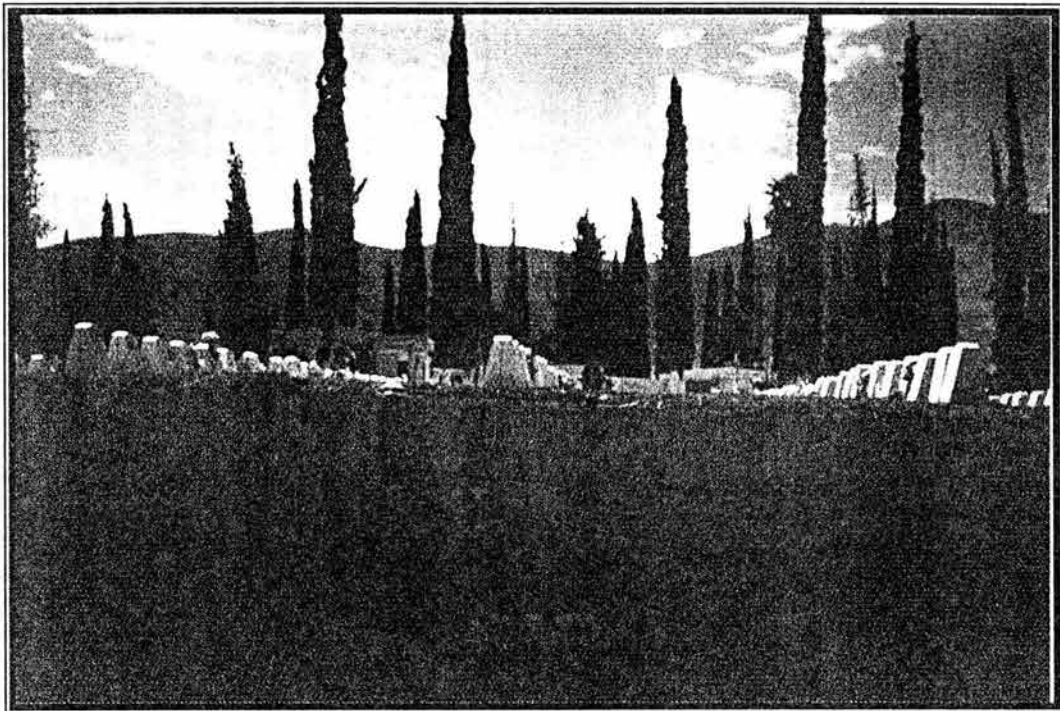
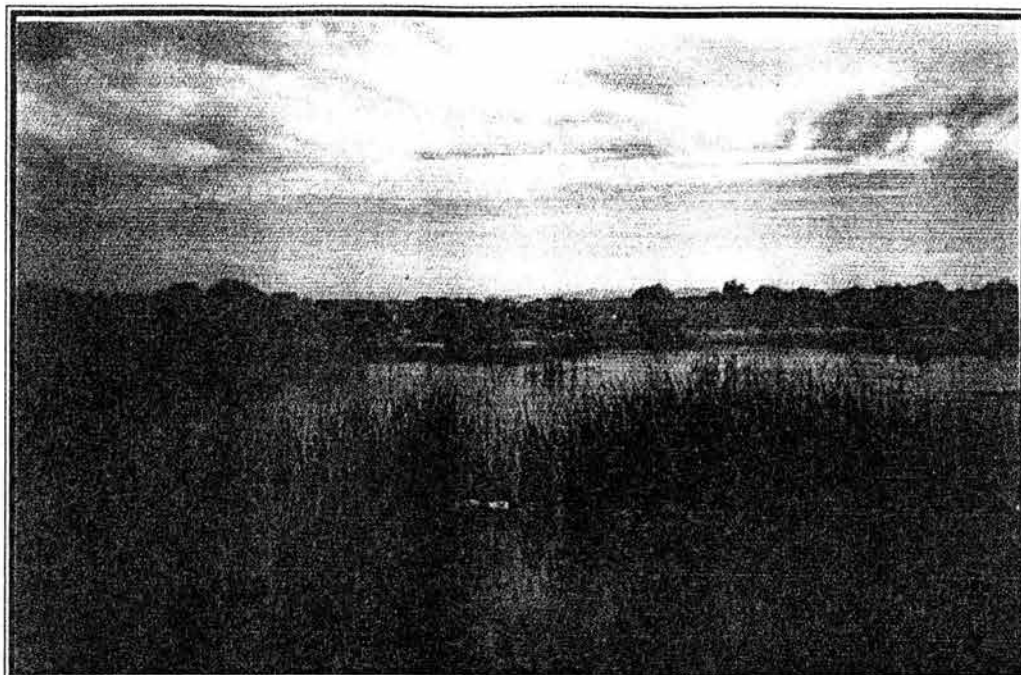


Figura 2.2 Descarga del agua subterránea en el Relleno Sanitario de la Ciudad de Torreón



Durante el período que abarca entre la toma de la muestra y el análisis químico respectivo, es posible que se presenten cambios en la composición química original del agua subterránea, por lo que es necesario utilizar ciertas técnicas de conservación y/o estabilización de la muestra, para limitar dichos cambios.

En cada pozo se adaptó una manguera a la válvula o llave soldada a la tubería de descarga y en caso de que se tratara de descarga libre, como ocurrió en muchos pozos agrícolas y de abrevadero, se introdujo la manguera por lo menos un metro en el tubo de descarga antes de que el agua subterránea saliera a la superficie, para captarla antes de que interaccionara con la atmósfera. A dicha manguera se le adaptaron dos derivaciones, una manguera se utilizó para efectuar la calibración de los aparatos y realizar las mediciones de los parámetros de campo y la otra manguera sirvió para tomar las muestras de agua subterránea. Se evitó que el flujo en las mangueras fuera turbulento para evitar la disolución o escape de gases. Se dejó fluir el agua del pozo por la manguera durante 10 minutos antes de la toma de la muestra.

Las muestras se agruparon en nueve tipos, que correspondieron a envases de diferente capacidad, material y cuya muestra fue preservada de acuerdo a los requerimientos de los distintos parámetros a determinar: i) cationes y metales traza, ii) aniones, iii) nitratos, iv)

nitritos, v) cianuros, vi) bacteriológicos, vii) fenoles, viii) trihalometanos, ix) isótopos de oxígeno e hidrógeno.

Los envases de polietileno y sus tapas y contratapas fueron previamente lavados en el laboratorio con una solución de ácido clorhídrico y agua destilada. Todos los envases fueron enjuagados tres veces con el agua del pozo (Figura 2.3) y llenados cuidadosamente evitando al máximo la aireación y la agitación del agua. Todas las burbujas de aire fueron eliminadas, llenándolo completamente con agua subterránea.

La muestra para la determinación de cationes, sílice y elementos traza (incluyendo el arsénico) fue filtrada a través de una membrana de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal de $0.45\ \mu\text{m}$, con la finalidad de analizar iones y especies disueltas. Estas muestras se tomaron en envases de polietileno con tapa y contratapa de 60 ml de capacidad. Se adicionó ácido nítrico ultrapuro para disminuir el pH a menos de 2 unidades y mantener en solución los cationes y metales de interés (Figura 2.4).

Figura 2.3 Enjuague de envases para el muestreo de agua subterránea en la descarga del pozo

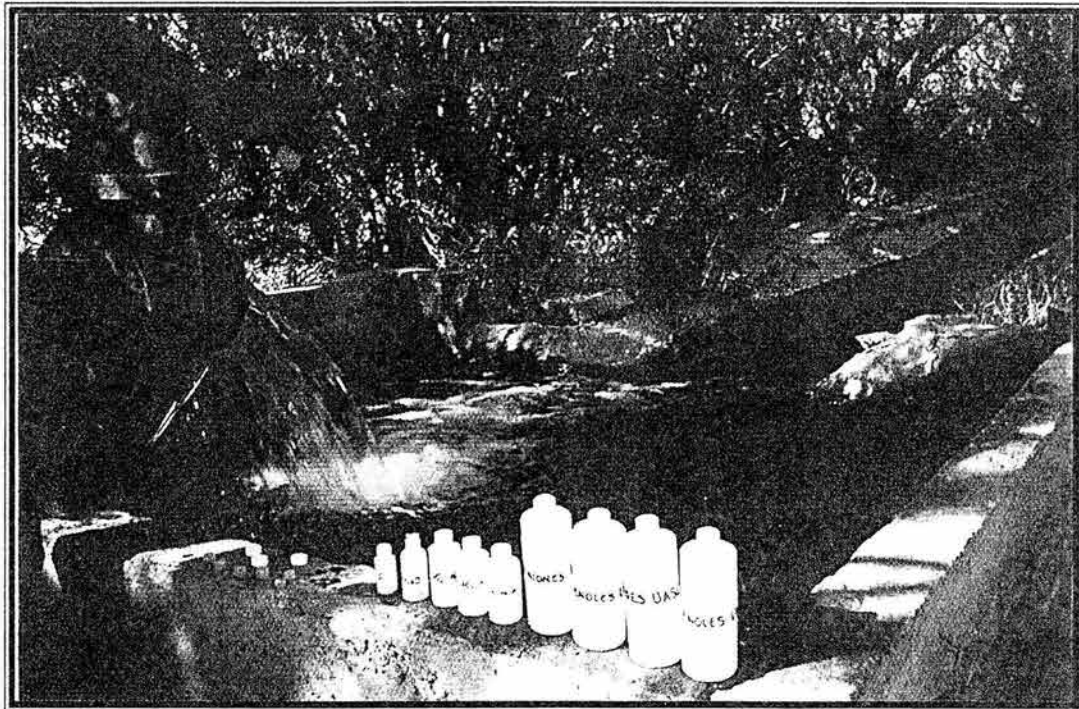


Figura 2.4 Filtrado y acidificación de las muestras para metales



Las muestras para el análisis de cloruro, sulfato y fluoruro se tomaron en envases de polietileno con tapa y contratapa, con capacidad de 500 ml. Estas muestras no fueron filtradas, ni se les agregó ningún preservador.

Tanto las muestras para la determinación de nitratos como de nitritos fueron tomadas en envases de polietileno de 125 ml de capacidad con tapa y contratapa; a las muestras para el análisis de nitratos se les añadió ácido sulfúrico como agente inhibidor de la actividad bacteriana. Mientras que las muestras para el análisis de nitritos se les agregó cloruro mercuríco.

La muestra para cianuros se tomó en un envase de polietileno de 125 ml con tapa y contratapa; se le adicionó hidróxido de sodio hasta aumentar el pH a 12 unidades.

La muestra para análisis de coliformes totales y fecales se colectó en una bolsa de polietileno estéril especialmente fabricada para ello, utilizando guantes estériles para limitar la contaminación de la muestra.

La muestra para fenoles se tomó en un envase de polietileno con tapa y contratapa de 500 ml de capacidad, y se añadió 0.5 gramos de sulfato de calcio pentahidratado y adicionalmente se le agregó ácido fosfórico hasta alcanzar un pH de cuatro (Figura 2.5).

Figura 2.5 Preservación con sulfato de calcio pentahidratado y ácido fosfórico para la muestra de fenoles



Las muestras para la determinación de trihalometanos se tomaron en viales de vidrio de 40 ml de capacidad con tapa de teflón. No se añadió ningún conservador.

Por último en una botella de 30 ml se colectó una muestra para determinaciones de isótopos de oxígeno e hidrógeno. No se agregó ningún conservador a estas muestras.

En todos los envases se evitó la permanencia de burbujas de aire en el seno del líquido, eliminando las burbujas de aire del recipiente y llenando en su totalidad el envase. Inmediatamente después de la colecta, las muestras se colocaron en hieleras con hielo. Los análisis bacteriológicos se realizaron en menos de 24 horas, los análisis de nitratos, nitritos, cianuros y aniones se determinaron en menos de 7 días después de ser tomada la muestra.

Los trihalometanos y fenoles se analizaron 15 días después de terminado el muestreo y los cationes principales y metales traza se determinaron 15 días después de terminado el muestreo.

El agua subterránea que es extraída a la superficie por los equipos de bombeo instalados en los pozos, se expone a condiciones físicas y químicas diferentes a las que prevalecen en el subsuelo. Normalmente la presión parcial de oxígeno disuelto en el agua subterránea, es mucho menor que la presión parcial del oxígeno atmosférico, por lo que aunque el coeficiente de difusión de este gas en agua es relativamente bajo (10^{-5} cm²/s), una vez expuesta a la atmósfera existe la tendencia de oxigenación del agua subterránea. Esta situación ocasiona que algunas especies químicas se oxiden ocasionando cambios en el pH y potencial redox. Por otro lado, la presión parcial de CO₂ en el agua subterránea normalmente es mayor que la correspondiente a la atmósfera, de este modo cuando el agua subterránea es extraída del acuífero, el CO₂ disuelto tiende a escaparse hacia la atmósfera modificando diversos parámetros como el pH, carbono inorgánico disuelto, entre otros.

Al existir interacción del agua subterránea con la atmósfera, algunos parámetros como el pH, oxígeno disuelto, potencial de óxido-reducción, y conductividad eléctrica se modificarán y por lo tanto no serán representativas de las condiciones originales que se presentan a profundidad en el subsuelo (Lloyd y Heathcote, 1985. Por lo tanto, es necesario evitar y/o disminuir estos cambios por medio de la utilización de una celda de aislamiento (Figura 2.6).

Por lo anterior la medición del pH, temperatura, potencial de óxido-reducción, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica se efectuó dentro de una celda de aislamiento de flujo continuo, que impide la interacción del agua subterránea con la atmósfera, con la finalidad de que los parámetros medidos sean los más cercanos a aquellos existentes en las condiciones in situ dentro del acuífero, al evitar que el agua disuelva oxígeno adicional y libere CO₂ a la atmósfera.

La celda de aislamiento fue conectada a una de las mangueras de diámetro pequeño a válvulas instaladas en la descarga del pozo; el agua subterránea extraída fluye en forma continua dentro de la celda, mientras que los electrodos son introducidos en la celda; ello permite obtener lecturas representativas de los parámetros mencionados.

Figura 2.6.- Celda de aislamiento utilizada para la medición de parámetros de campo



La temperatura se midió con un termómetro digital incorporado en el potenciómetro y que permite medir con una precisión de 0.1 °C.

La conductividad eléctrica se midió por medio de un conductivímetro portátil en el que se ajusta manualmente la temperatura medida previamente.

La medición del potencial hidrógeno pH se realizó por medio de un potenciómetro que ajusta automáticamente la temperatura, por lo que el sensor de temperatura tiene que estar dentro de la celda de aislamiento donde se están tomando las lecturas.

Antes de realizar la medición de pH, el potenciómetro fue calibrado en cada sitio a la temperatura del agua subterránea a medir, utilizando la técnica de calibración en dos puntos, empleando soluciones buffer o amortiguadoras de pH 4, 7 y 10 colocadas en frascos inmersos en un recipiente en el que circulaba continuamente el agua subterránea (Figura 2.7). Este procedimiento permitió que la temperatura de las soluciones buffer fuera la misma que la del agua subterránea extraída por el pozo, ya que el valor del pH es dependiente de la temperatura. Una vez que las soluciones tienen la misma temperatura que el agua subterránea, aproximadamente después de 10 minutos de inmersión en el flujo continuo del

agua del pozo, la calibración consistió en colocar el electrodo sin calibrar en el agua subterránea para tener una idea aproximada del pH del agua; posteriormente el electrodo se sumergió en la solución de pH 7 y se ajustó el aparato para que la lectura fuera la correspondiente a la temperatura del agua; posteriormente, se introdujo el electrodo en la solución de pH 4 ó 10, de tal modo que el pH aproximado se encontrara entre los dos puntos de calibración. Se ajustó la pendiente del potenciómetro para obtener el valor correspondiente a la temperatura del agua.

Una vez que fue calibrado el equipo, se sumergió el electrodo en la celda de aislamiento, registrando lecturas de pH cada dos minutos aproximadamente, hasta que se estabilizara la lectura.

Figura 2.7. Calibración del equipo de pH



La obtención en campo de lecturas válidas y reales de potencial redox es complicada, sobre todo en medios oxidantes donde las concentraciones de hierro disuelto son bajas. Esto se debe, entre otras cosas a: 1) fallas del electrodo utilizado, 2) cinética lenta en algunas de las especies que se presentan en estado de oxidación y reducción, lo que provoca desequilibrio entre las diferentes parejas redox presentes en la solución y 3) presencia de potenciales naturales mezclados. El primer inconveniente se puede superar utilizando electrodos nuevos recién verificados en su funcionamiento y que se pulieron periódicamente. Los siguientes dos aspectos están relacionados con la naturaleza del sistema natural en investigación, por lo que no es posible realizar adecuaciones. Entonces las lecturas tomadas no son del todo

válidas o representativas de las condiciones en el acuífero, sin embargo este parámetro se midió únicamente para tener una idea aproximada de las condiciones redox. Se empleó para ello un electrodo de tipo combinado, que consiste de filamento de platino y un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata. El elemento sensible en donde se realiza la transferencia de electrones es el filamento de platino, por lo que éste se mantuvo limpio y pulido para evitar mediciones erróneas. Este electrodo no requiere de calibración. Las mediciones se llevaron a cabo introduciendo el electrodo en la celda de aislamiento de flujo continuo, iniciando las lecturas una vez que el electrodo tenía la misma temperatura del agua subterránea a la descarga y registrando lecturas cada dos minutos aproximadamente hasta que se estabilizara la medición.

La medición de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua subterránea se realizó sumergiendo un electrodo especial en la celda de aislamiento por donde circula un flujo controlado de agua subterránea. En este caso específico el sensor de oxígeno disuelto incorporado en el electrodo utilizado es polarográfico de tipo Clark con sensor y compensación de temperatura integrado. Una vez polarizado el electrodo, el procedimiento de calibración del aparato incluyó una inmersión en una solución libre de oxígeno (dos gramos de sulfito de sodio en 100 ml de agua destilada) y el ajuste de la lectura a cero mg/l de oxígeno disuelto. Posteriormente y una vez seco el electrodo, se calibró al aire manteniendo el sensor un centímetro arriba de una superficie de agua limpia (evitando el contacto de la membrana con el agua) ajustando la lectura al valor correspondiente de acuerdo con la elevación sobre el nivel del mar del sitio. Una vez calibrado el sensor se introduce en la celda de aislamiento realizando diversas lecturas hasta que los valores se estabilizan durante al menos 4 minutos.

La alcalinidad se midió en campo para impedir su modificación durante el transporte y almacenamiento de las muestras. Se utilizó la técnica estándar de titulación con ácido clorhídrico, con alícuotas de 20 ml, aplicando el método potenciométrico de Gran (Figura 2.8). Este método consistió en agregar a la alícuota, un volumen determinado de ácido, midiendo inmediatamente el pH de la muestra con el potenciómetro calibrado, repitiendo este proceso en varias ocasiones hasta lograr varias mediciones, se requirieron un mínimo de tres mediciones con un pH menor a 4.3.

El principio del método potenciométrico de Gran (Appelo y Postma, 1993) consiste en que una vez rebasado el punto donde la totalidad del HCO_3 ha sido convertido en H_2CO_3 por efecto de la adición del ácido (punto de equivalencia) la concentración de H^+ se incrementa en forma lineal con la cantidad de H^+ añadido, representado por el volumen de HCl adicionado a la alícuota. Posteriormente se calcula la Función de Gran:

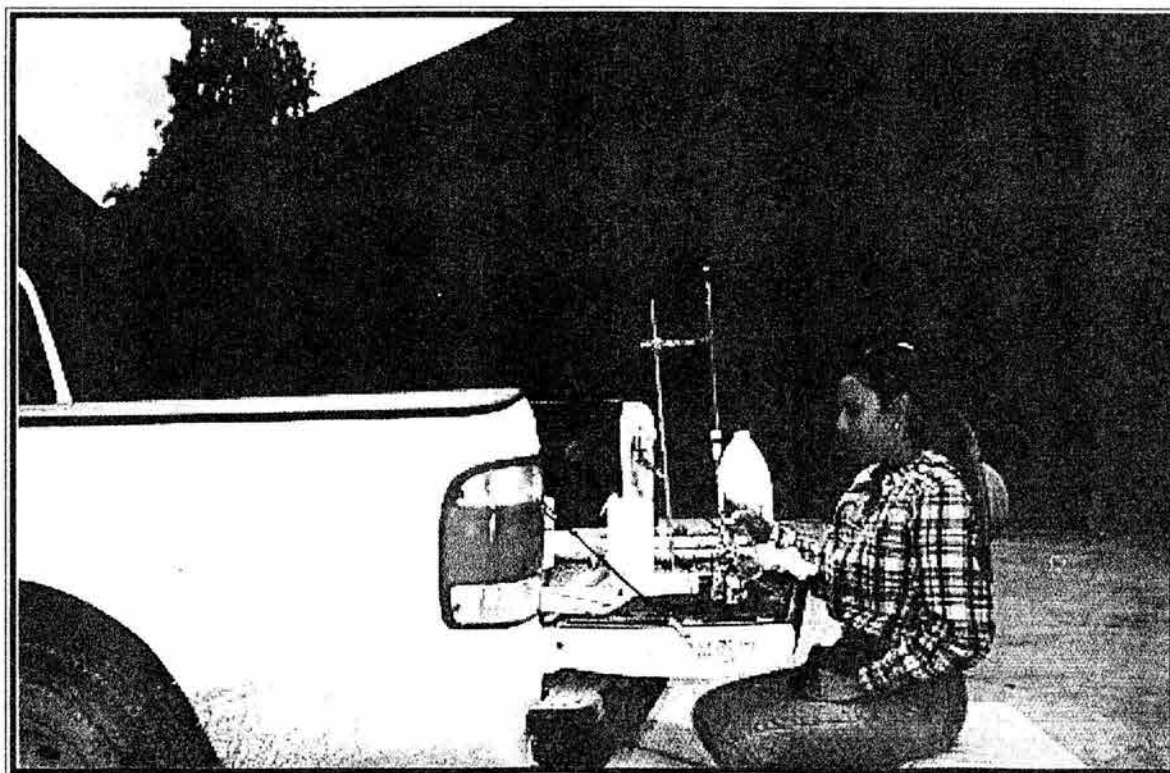
$$F = (V + V_0) \times 10^{-\text{pH}} \quad (2.1)$$

en donde V es el volumen de ácido añadido y
 V_0 es el volumen inicial de la alícuota

Se construye una gráfica de la función de Gran con respecto al volumen acumulado de ácido añadido. El volumen de ácido añadido para el punto de equivalencia se obtiene interpolando hacia atrás en la parte lineal de la curva. Una vez conocido el volumen de ácido correspondiente con el punto de equivalencia se calculó la alcalinidad total por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Alcalinidad (mg/lCaCO}_3\text{)} = \frac{\text{ml totales de ácido} \times N \text{ ácido} \times 50,000}{\text{volumen alícuota}} \quad (2.2)$$

Figura 2.8. Titulación por el Método de Gran



En cada aprovechamiento muestreado fue llenado un formato de campo en el que se incluyó la siguiente información: 1) Datos generales: Fecha, localidad, latitud y longitud en coordenadas UTM, clave del aprovechamiento, hora de inicio del muestreo, número de

muestra, tipo de aprovechamiento, uso del agua, tiempo de bombeo, gasto aproximado de extracción, tipo de bomba, diámetro de descarga; 2) Parámetros medidos en campo: las lecturas cada dos minutos de temperatura del agua subterránea, pH, Eh, Conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, hasta su estabilización. La normalidad del ácido clorhídrico empleado para la titulación volumétrica, el volumen de la alícuota utilizada y el registro del volumen de ácido añadido y el pH resultante durante la medición de la alcalinidad. 3) Información de la muestra que incluyó parámetro a analizar, tipo de envase, capacidad del envase, conservador agregado y si fue o no filtrada.

2.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO

En el Laboratorio de Geoquímica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se determinaron sodio, calcio, potasio, magnesio, hierro y estroncio, sólidos totales disueltos, sulfato, cloruro, fluoruro, nitritos, nitratos, fosfatos, cianuros y análisis bacteriológicos.

Los metales principales (sodio, calcio, potasio y magnesio) y algunos metales traza (hierro y estroncio) se analizaron por el método espectrofotométrico de absorción atómica (NOM-AA-51-1981). El equipo utilizado consistió de una fuente de luz que emite el espectro de línea de un elemento (lámparas de cátodo hueco para cada uno de los elementos a cuantificar) y una flama para atomizar la muestra, un monocromador para aislar la línea de resonancia a una longitud de onda determinada y un detector fotoeléctrico con equipo de amplificación y medición electrónica. Este método se basa en la medición de la cantidad de luz monocromática absorbida por el elemento atomizado a determinarse en una flama, por medio de un detector, siendo dicha energía absorbida proporcional a la concentración del elemento. De acuerdo con el metal a analizar se utiliza una lámpara específica, además de ligeras modificaciones y tratamiento específico.

Los Sólidos Totales Disueltos se determinaron por medio del método gravimétrico.

La determinación de la concentración de sulfato, se llevó a cabo con el método turbidimétrico, que se basa en la precipitación de los sulfatos con base en la adición de cloruro de bario a la muestra. La absorbancia de la suspensión de sulfato de bario se mide con un turbidímetro y la concentración de sulfato se determina por comparación con una curva estándar (Standard Methods, 1989).

El cloruro se analizó por medio del método argentométrico con titulación con nitrato de plata.

El fluoruro se determinó potenciométricamente por medio de un electrodo de ión específico de tipo combinado, que debido a que como únicamente responde al ión libre requiere del

tratamiento de la muestra con una solución que permita ajustar la fuerza iónica y destruir los complejos metal-fluoruro de la muestra.

Los análisis bacteriológicos fueron realizados con el método de dilución de tubos, con caldo lactosado para los coliformes totales, bilis verde brillante para confirmar los que resultan positivos de coliformes totales y con medio *Echerichia Coli* para coliformes fecales.

La determinación del nitrato se realizó con el método espectrofotométrico, utilizando ácido fenoldisulfónico; como la muestra se preservó con ácido sulfúrico, previo a la determinación se llevó su pH a neutralidad. La determinación de nitritos y de fosfatos se realizó por medio de colorimetría utilizando reactivos y equipo espectrofotométrico marca HACH.

Los cianuros se determinaron por el método colorimétrico tal y como lo señala la NOM-AA-58-1981. El método se basa en la destilación de los cianuros simples y complejos, como ácido cianhídrico, el cual se absorbe en una solución alcalina. Posteriormente, se hace reaccionar como una mezcla de piridina pirazolona, dando lugar a la formulación de un complejo colorido azul, cuya intensidad es proporcional a la cantidad de cianuros presente y cuatificable colorimétricamente.

Los fenoles (que pueden comprender halógenos o los grupos alquílicos, aldehído, acético, nitro, fenil, nitroso y del ácido sulfónico en las posiciones, orto, meta o para) se determinaron con el método espectrofotométrico descrito en la NOM-AA-50-1981, que se basa en que los fenoles purificados por medio de un proceso de destilación reaccionan con la 4 aminoantipirina a un pH de 10, más menos 0.2, en presencia de ferrocianuro de potasio para formar una anilina de antipirina; esta anilina es extraída de la solución acuosa con cloroformo, registrando su turbidez (proporcional a la concentración de fenoles) con un espectrofotómetro.

La concentración de trihalometanos totales fue determinada por un laboratorio certificado (Atlatec S. A. de C. V.). Esta determinación se llevó a cabo considerando la Norma EPA 8260.

Las determinaciones de sílice, metales principales y de muchos metales traza, incluyendo el arsénico, se efectuaron en ACTLABs, empresa especializada en la realización de este tipo análisis químicos con sede en Ontario, Canadá. Estas determinaciones se realizaron por medio de un Espectrómetro de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS). Este método de análisis se basa en dos principios fundamentales: *i*) ionización, en donde por la temperatura alcanzada por el plasma (argón parcialmente ionizado sobre una antorcha de cuarzo, llegando a 6000-10000°K) se logra la extracción de un electrón de la capa exterior del átomo, produciéndose un ion con carga positiva más un electrón, *ii*) detección: en el Espectrómetro de Masas los iones positivos son separados por un filtro de masas

(diferencias de la trayectoria de los iones en un campo eléctrico), produciéndose una señal eléctrica, que es proporcional a la cantidad de iones que salen del filtro de masas. Los límites de detección logrados para muchos elementos traza con este equipo son muy bajos (menores a 0.001 mg/l) por lo que es muy recomendado para determinaciones de especies disueltas en agua. Los límites de detección especificados para el método ICP-MS para cada uno de los elementos analizados por este método se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Límites de detección para el análisis por ICP-MS

Elemento	Límite de detección (ppb)	Elemento	Límite de detección (ppb)
Li	1.000	Sb	0.010
Al	2.000	I	1.000
Si	50.000	Cs	0.002
K	10.000	Ba	0.100
Ca	50.000	La	0.005
V	0.050	Ce	0.010
Cr	0.500	Pr	0.002
Fe	5.000	Nd	0.004
Mn	0.100	Sm	0.005
Co	0.005	Eu	0.001
Ni	0.300	Gd	0.002
Cu	0.200	Tb	0.001
Zn	0.500	Dy	0.002
Ga	0.010	Ho	0.001
Ge	0.010	Er	0.001
As	0.030	Tm	0.001
Se	0.200	Yb	0.001
Br	3.000	Lu	0.001
Rb	0.005	Hf	0.002
Sr	0.040	W	0.020
Y	0.003	Tl	0.005
Zr	0.030	Pb	0.100
Mo	0.100	Bi	0.010
Ag	0.200	Th	0.003
Cd	0.010	U	0.001

La determinación de isótopos estables en las muestras de agua subterránea se llevó a cabo en el laboratorio de isótopos estables de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Ottawa, bajo la supervisión del Dr. Ian Clark. El contenido isotópico de oxígeno-18 en la muestra de agua se determinó equilibrando primero la muestra con CO₂ y posteriormente analizando el CO₂. El procedimiento estándar para isótopos de oxígeno involucra el equilibrio de CO₂ con agua en un baño con temperatura controlada a 25°C. La preparación y extracción del CO₂ se realizó en sistemas totalmente automatizados adaptados al espectrómetro de masas. El procedimiento consiste en colocar 3 ml de muestra en una celda de reacción de 30 ml de capacidad a la que se le coloca una válvula y un tubo capilar. El CO₂ se inyecta a baja presión en la celda. Después de un tiempo razonable (al menos 3 horas), el CO₂ se separa de la celda por medio del tubo capilar, lo que evita fraccionamiento isotópico, introduciendo entonces el gas al espectrómetro de masas. Este método tiene una exactitud de $\pm 0.2\text{‰}$.

La medición de ²H (deuterio) se realizó reduciendo el agua a hidrógeno elemental (H₂) utilizando zinc. El método consiste en congelar la muestra de agua (3μl) junto con el zinc en un tubo al vacío, posteriormente se calienta a 430°C para hacer la conversión de ZnO y H₂. El ²H de la muestra se mide directamente del tubo al vacío con el espectrómetro de masas. La exactitud que se puede lograr con esta metodología es del orden de $\pm 2.0\text{‰}$.

Con la finalidad de verificar el error de los resultados de los análisis de laboratorio para los iones principales se determinó el balance iónico para cada una de las muestras. El error en el balance iónico se establece por la diferencia de los iones como un porcentaje de la suma, de acuerdo con la siguiente ecuación (Freeze y Cherry, 1979):

$$\%Error = \frac{(\sum_{cationes} - \sum_{aniones})}{(\sum_{cationes} + \sum_{aniones})} \times 100 \quad (2.3)$$

El control de calidad de las determinaciones de elementos traza por el método ICP-MS, relacionado con la exactitud se evaluó realizando mediciones repetidas en los estándares certificados, denominados SLRS-4 y NIST 1643D, y que son utilizados en forma rutinaria por Activation Laboratories. El análisis de precisión efectuado consistió en el análisis por duplicado, ya que Activation Laboratories al final de un lote de 15 muestras repitió el análisis de la última muestra del lote; como se analizaron en total 60 muestras de agua se tienen los resultados analíticos de 4 muestras con su correspondiente duplicado.

2.4 MODELACIÓN E INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Una vez obtenidos los resultados se procedió a realizar la modelación hidrogeoquímica para el cálculo de los índices de saturación de minerales que se consideraron importantes para la zona de estudio como calcita, aragonita, dolomita, fluorita, yeso, anhidrita, minerales de arsénico, etc. Se utilizó el Programa PHREEQCI para calcular las actividades de las especies disueltas y los índices de saturación de diversas fases minerales de interés. Se seleccionó este programa por considerarse muy versátil que permite emplear distintas bases de datos, de fácil manejo y por ser a nivel mundial uno de los paquetes hidrogeoquímicos más validados y documentados. Se empleó la base de datos de WATEQ4F por considerarse la más completa.

Se realizó el análisis, procesamiento e interpretación de la información generada durante el trabajo de campo y los resultados obtenidos de los análisis químicos, relacionándola de manera integral con la información geológica e hidrogeológica de la zona de estudio. Para ello se construyeron diagramas hidrogeoquímicos como de Stiff y Piper, relaciones entre diversos iones y parámetros a través de gráficas X-Y, y mapas con distribuciones espaciales de diferentes iones y parámetros físicos.

Se efectuó una clasificación hidrogeoquímica del agua subterránea de la zona de estudio de acuerdo a su composición química y su relación con la geología del subsuelo.

Mediante el análisis integral y el procesamiento de toda la información disponible se definieron los procesos hidrogeoquímicos que controlan la composición química del agua subterránea de la Comarca Lagunera. En el capítulo cuatro se presentan y discuten estos aspectos.

Finalmente se realizó modelación hidrogeoquímica inversa para verificar la presencia y cuantificar la importancia de las reacciones identificadas previamente, mediante el análisis hidrogeoquímico de la información. La modelación hidrogeoquímica inversa se efectuó con el programa MODELAGUA (Facundo, 2000). En los párrafos siguientes se presentan las características y modo de proceder de dicho programa.

El programa MODELAGUA (Fagundo, 2000) fue desarrollado en Borland Delphi 4 sobre Windows y tiene como objetivo determinar los procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas naturales, presentes en una región de estudio, mediante modelos de balance de masas y análisis de mezcla.

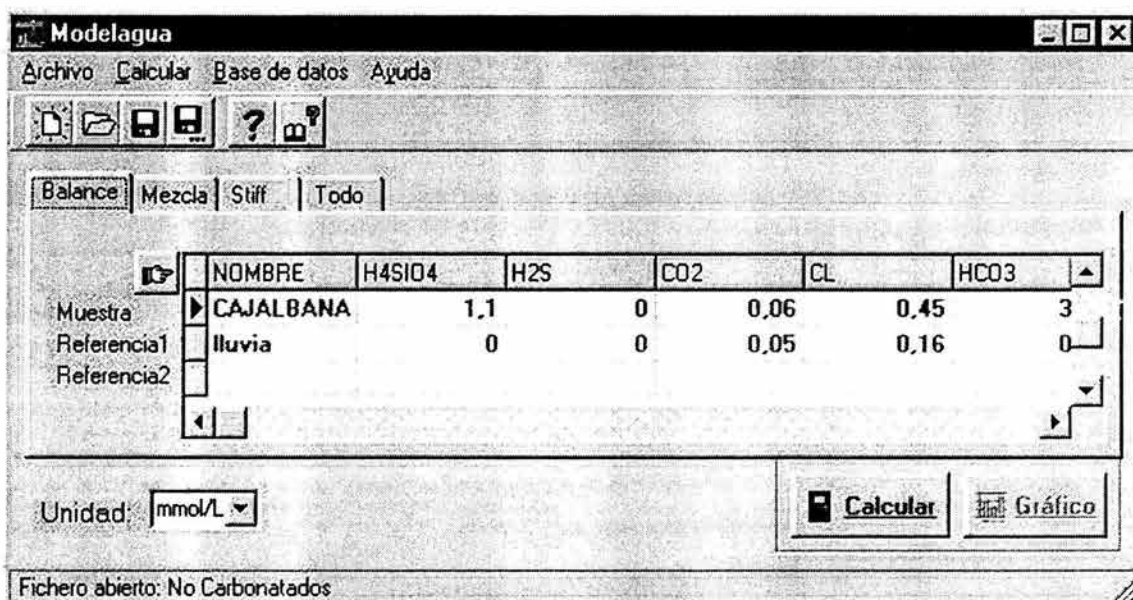
El cálculo del balance de masas es de gran utilidad para la identificación de reacciones que pueden explicar diferencias en la química de las aguas a lo largo de su trayectoria. No

obstante se deben tener en cuenta las siguientes limitaciones: a) Las soluciones de las ecuaciones de balance de masas no son necesariamente únicas. Diferentes selecciones de conjuntos de reacciones pueden corresponder satisfactoriamente a un mismo juego de datos. b) No existen restricciones químico-físicas ni cinéticas en las ecuaciones de balance de masas.

Debido a estas limitaciones para efectuar correctamente el balance de masas es necesario conocer el tipo de litología a la cual pertenece el acuífero de estudio, para así seleccionar sólo las reacciones que sean lógicas desde el punto de vista geoquímico. Es necesario además revisar la validez de los resultados con criterios químico-físicos y cinéticos, por ejemplo a través de diagramas de estabilidad, constantes de equilibrio, constantes de velocidad, etc. En otras palabras, la solución aportada por el balance de masas, no constituye una prueba de que las reacciones propuestas estén realmente ocurriendo, sólo la integración de su resultado con el resto de la información le da validez al mismo.

En comparación con los programas comerciales que se basan en modelos de balance de masas MODELAGUA presenta las siguientes ventajas: a) Está soportado sobre Windows lo que le proporciona mayor rapidez y facilidad de operación (figura 2.9). b) Permite importar datos que se encuentren en otros formatos (dbf, db y mdb) para ser utilizados sin necesidad de teclearlos nuevamente. c) Incorporación de un nuevo método de reconocimiento de patrones y optimización del algoritmo de cálculo del balance de masas.

Figura 2.9 Ventana principal del programa MODELAGUA



Para realizar los cálculos, el programa necesita que sean introducidos los datos analíticos correspondientes a la concentración de los iones principales o macroconstituyentes presentes en una muestra de agua de estudio y una o dos muestras de agua de referencias. El programa considera como muestra de estudio a la muestra de agua tomada en el punto donde se quieren determinar los procesos geoquímicos presentes y a la muestra de agua de referencia a la muestra tomada en un punto situado en la misma línea de flujo que la muestra de estudio. Se necesitan dos muestras de referencia sólo en el caso que se quiera modelar a la muestra de estudio como el resultado de la mezcla de dos tipos de aguas diferentes.

Todos los datos de entrada corresponden a valores de concentración y puede seleccionarse la unidad en que serán expresados, en mmol/L, mg/L y meq/L. Al cambiar la unidad seleccionada se convertirán automáticamente los datos ya introducidos, lo que permite que puedan entrarse datos en unidades diferentes. Los datos pueden introducirse directamente por el teclado o pueden traerse de datos almacenados previamente en la base de datos del programa o pueden ser importados de un archivo externo.

Si dos aguas se encuentran conectadas en una misma línea de flujo, se espera que ambas posean la misma composición química, de no ser así resulta claro que durante la trayectoria de la primera muestra hasta la segunda, han ocurrido procesos químicos que modificaron su composición. Esta diferencia de composición o delta iónico puede entonces ser utilizada para la determinación de los procesos químicos que tienen lugar en la región.

Como los datos corresponden a valores de concentración y no a valores de masa, es necesario tener en cuenta la variación que pueda deberse a fenómenos de concentración por ejemplo por la evapotranspiración. Por este motivo se introducen los conceptos de factor de concentración y ion conservativo. Se considera como ion conservativo al ion que no participa en ninguno de los procesos geoquímicos presentes en la región y que por tanto la diferencia de masa entre el valor que presenta el mismo en la muestra y el que presenta en la referencia se debe solamente a procesos de concentración. Generalmente se puede utilizar el ion cloruro como ion conservativo. El programa considera como factor de concentración al factor que cuantifica los procesos de concentración, puede determinarse fácilmente a partir de la selección de un ion conservativo. Si este es igual a uno, significa que no se producen fenómenos de concentración.

$$\Delta C_i = C_i(\text{final}) - F * C_i(\text{inicial}) \quad (2.4)$$

$C_i(\text{final})$:	Concentración del compuesto i en la solución final.
$C_i(\text{inicial})$:	Concentración del compuesto i en la solución inicial.
F	Factor de concentración por evapotranspiración.
ΔC_i :	Delta iónico.

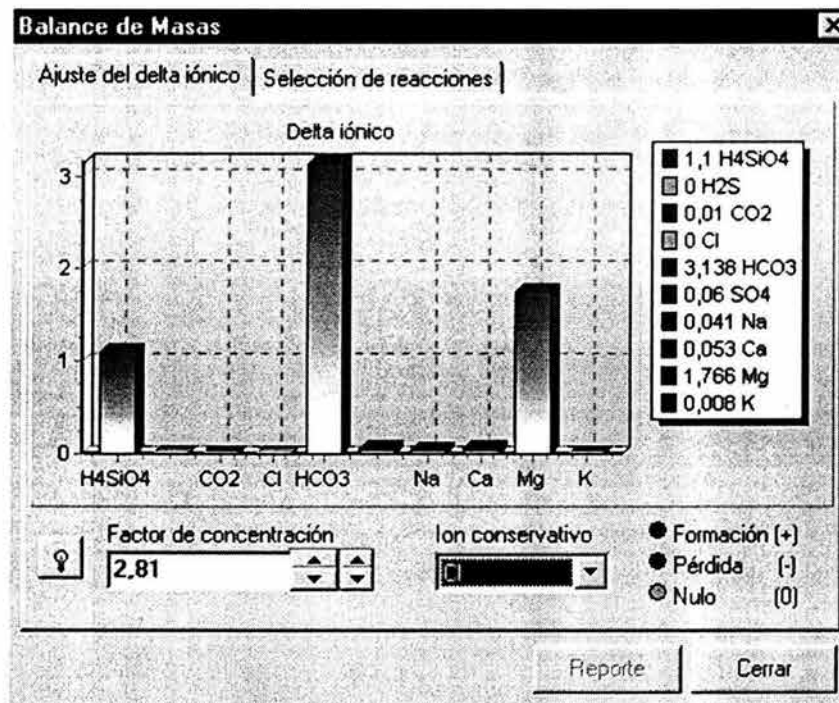
El primer paso en el cálculo de balance de masas es determinar la diferencia de masa entre las muestras (Delta iónico) a partir de la incorporación de un factor de concentración

conocido o mediante la selección de un ion conservativo (q) que no participe en ningún proceso, por lo que para ese ion debe cumplirse $\Delta C_q=0$, sustituyendo y despejando en (I) se tiene:

$$F = C_q(\text{final}) / C_q(\text{inicial}) \quad (2.5)$$

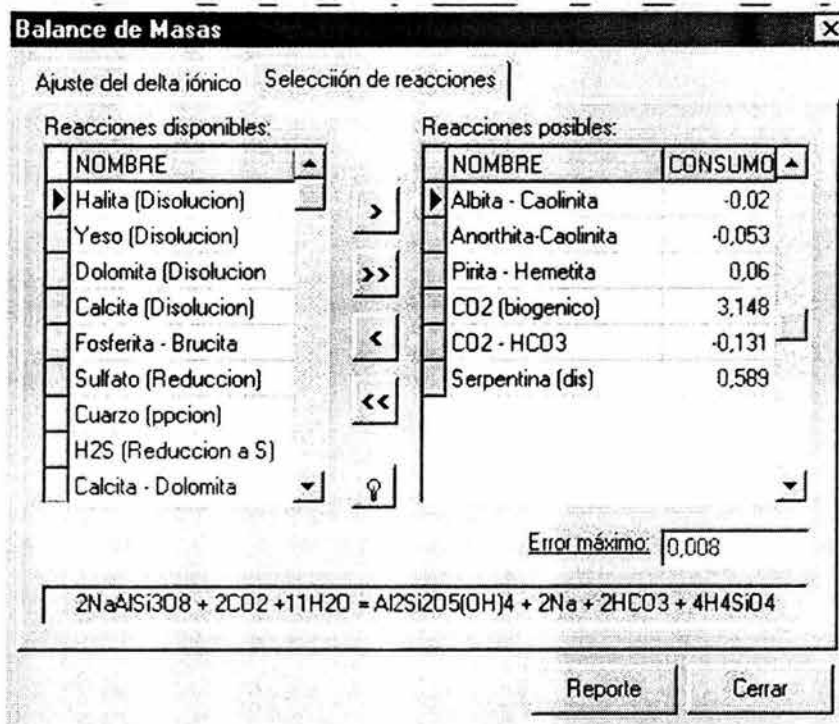
De acuerdo con la ecuación 2.5 el programa calcula el Factor de concentración según el ion conservativo que se seleccione y sustituyendo en (2.4) calcula el delta iónico para el resto de los iones.

Figura 2.10 Ventana de ajuste del delta iónico del programa MODELAGUA.



Una vez conocido el valor del delta iónico se puede efectuar la segunda parte del cálculo de balance de masas, que consiste en la selección de entre todos los procesos geoquímicos disponibles en la base de datos del programa aquellos que son posibles según las características litológicas de la región de estudio (Figura 2.11). Este paso es de suma importancia en el cálculo, ya que si se seleccionan procesos que no estén en correspondencia con la litología de la región, se podrá obtener un resultado incorrecto, aunque matemáticamente el modelo se ajuste bien a los datos. Por esto es necesario el conocimiento de las características litológicas de la región antes de utilizar el programa.

Figura 2.11 Ventana de selección de las reacciones químicas a modelar y cálculo de la masa transferida en cada una.



El cálculo del balance de masas se realiza mediante la solución de un sistema de ecuaciones lineales de la forma (Appelo y Postma, 1993):

$$\Delta C_i = \sum_k a_k \cdot b_{ik} \quad (2.6)$$

a_k : Masa transferida en cada proceso k (valor a calcular).

b_{ik} : Coeficiente estequiométrico de cada componente i en cada reacción k .

Finalmente se obtiene un reporte general donde se presentan los datos correspondientes a cada muestra, el factor de concentración utilizado, el delta iónico resultante para cada compuesto, la lista de procesos seleccionados y la cantidad de masa transformada para cada compuesto en cada proceso, el total de masa transformada, y el error para cada compuesto, que no es mas que la diferencia entre el delta iónico y el total calculado. Todos los valores se expresan en unidades de mmol/L.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los 60 sitios en los que se obtuvieron muestras de agua subterránea. Se incluyen tanto las determinaciones obtenidas en campo, como las determinaciones de laboratorio. No todas las especies químicas determinadas se analizan en la discusión de resultados, sin embargo se considera conveniente incluirlas como un antecedente a algún otro estudio que pueda tomar estos datos.

En el mapa 3.1 se muestra la distribución de los aprovechamientos muestreados y en la tabla 3.1 se enlistan las coordenadas, nombre del aprovechamiento, fecha de muestreo y los datos de campo. Las concentraciones de los distintos iones y los resultados isotópicos se presentan en la tabla 3.2.

En la tabla 3.3 se presentan los errores en el balance iónico en porcentaje calculados para cada muestra. Donde se observa que de las 60 muestras analizadas, el 80% (48 muestras) presenta un porcentaje de error menor al 5%. El 11.6 % (7 muestras) presenta errores de balance entre 5 y 8%, el 3.33 % (2 muestras) presenta errores entre 8 y 10 % y únicamente el 5% (las muestras 2510, 2002 y 1198) presenta valores de error entre -11.37 y -13.49 %.

En general los porcentajes de error mayores al 5% se presentaron en aguas subterráneas con elevadas concentraciones de sulfato, de acuerdo con lo reportado por el laboratorio, en este caso fue necesario realizar diluciones lo que introdujo un elemento de incertidumbre adicional para este parámetro y que al parecer repercutió en el balance de cargas obtenido. Debido a que los errores obtenidos no son muy altos, todas las muestras fueron empleados en la interpretación de resultados, aunque con ciertas reservas para aquellas muestras con errores mayores a 5% y que se presentan resaltadas con negritas en la tabla 3.3.

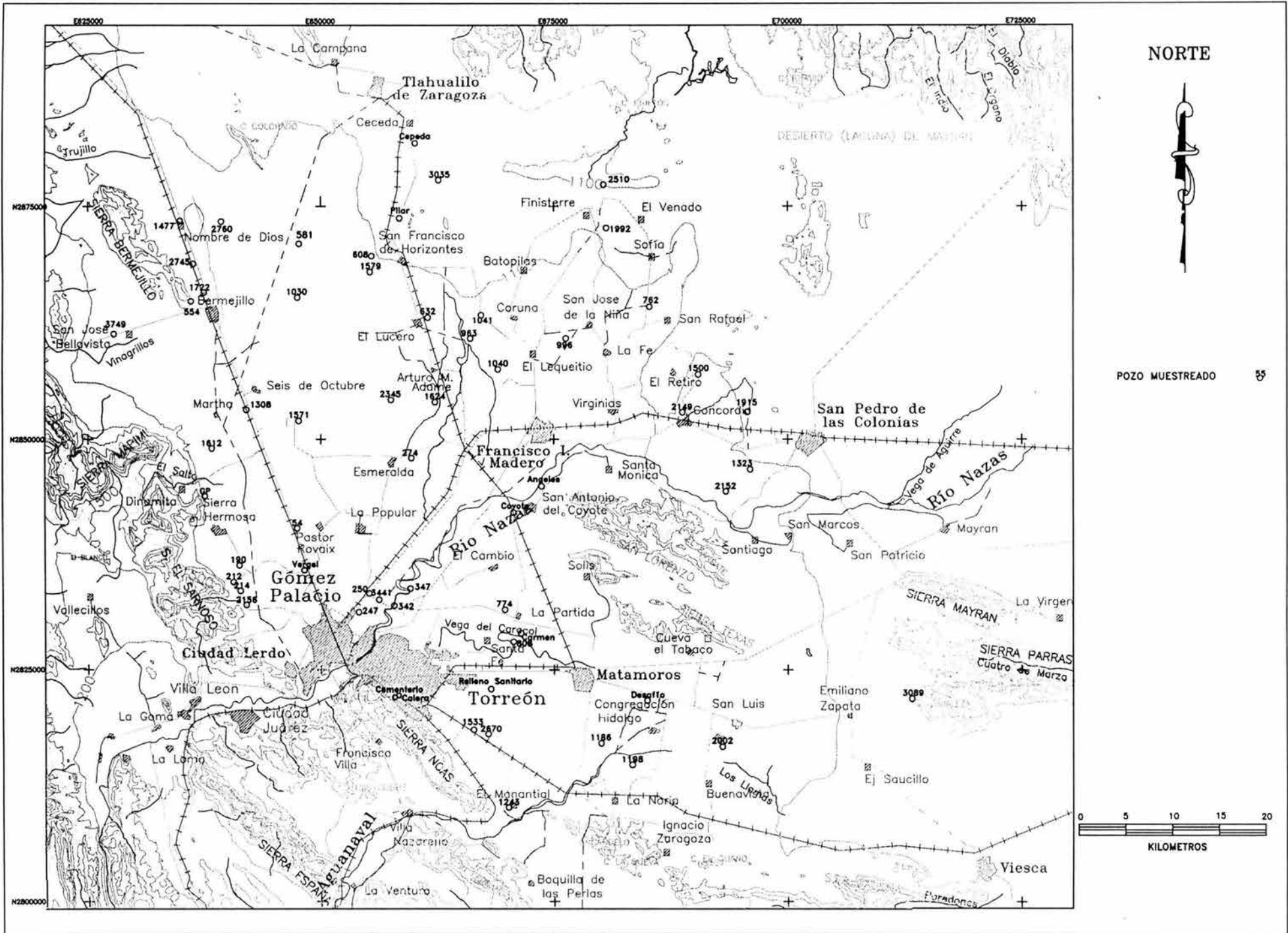


Figura 3.1 Localización de pozos muestreados

Tabla 3.1 Datos de campo de los aprovechamientos muestreados

POZO	LOCALIDAD	LONGITUD	LATITUD	T (°C)	pH	Eh (mV)	Oxígeno Disuelto		C.E. micromhos/cm	HCO ₃ (mg/l)	CO ₃ (mg/l)
							(%)	(mg/l)			
Cementerio	Cementerio Del Carmen	658297	2822212	15.7	8.14	416	53	4.2	5170	166.89	n.d.
Calera	Calera en Torreón	657949	2822035	25.8	7.16	428	95	7.6	2690	148.35	n.d.
Relleno	Relleno Sanitario Torreón	668253	2822873	20.3	8.26	406	77	6.1	7640	176.16	9.12
808	San Miguel	670713	2828032	29.36	7.53	398	25	2.0	470	157.38	n.d.
3089	Ejido Villa de Bilbao	713216	2821864	42.5	6.86	268	1	0.0	4250	111.26	n.d.
2002	Ejido Gabino Vázquez (San Luis)	692943	2816713	27.5	7.31	335	0	0.0	940	139.08	n.d.
1198	Pequeña Propiedad El Refugio	683367	2814705	24.3	7.57	383	0	0.0	731	157.62	n.d.
Desafío	Establo Desafío	684930	2821641	33.3	8.37	357	0	0.0	384	148.35	n.d.
774	Establo La Partida	669767	2831541	26.9	7.77	406	36	2.9	351	157.90	n.d.
El Carmen	Establo El Carmen	671458	2828908	32.2	7.57	407	7	0.5	326	170.04	n.d.
El Coyote	Establo El Coyote	670602	2842033	28	6.97	423	1	0.0	1753	109.19	n.d.
Angeles	Granja Avícola Los Angeles	673673	2844936	25.2	7.11	444	88	7.0	3550	400.82	n.d.
247	Establo Santa Teresa	654105	2831301	25	7.37	430	77	6.1	2160	279.36	n.d.
250	Predio Santa Rita	655217	2833305	23.5	6.86	450	104	8.3	1242	303.65	n.d.
3441	Industria Linamar	656237	2832626	23.4	6.89	443	71	5.7	654	279.36	n.d.
342	Establo El Tajito	657895	2831999	26.2	6.46	465	42	3.3	1131	461.56	n.d.
347	Establo cerca de La Unión	659623	2833859	25.2	6.90	460	66	5.3	561	305.24	n.d.
2156	Rancho Las Palmas	641965	2832020	29.8	7.06	444	79	6.3	1115	255.07	n.d.
214	Granja La Providencia	641352	2833597	31.6	7.24	435	55	3.6	1113	267.21	n.d.
212	Rancho San Martín	640635	2834516	30.8	6.98	437	62	4.7	692	230.78	n.d.
190	Rancho Bercial	641205	2836386	28.8	7.27	433	30	2.4	971	206.48	9.12
GP	Mpio. Gómez Palacio	637560	2843812	31.9	7.11	438	24	1.8	513	267.21	n.d.
1612	Las Cámenes	638295	2849009	28.7	7.12	438	60	4.6	1829	194.34	n.d.
54	Granja Ideal	647483	2840357	26.4	6.97	451	47	3.2	4124	206.48	n.d.
Vergel	Vergel	648163	2835901	24.1	6.82	458	33	2.6	2190	218.63	n.d.
1308	Santa María de Berlín	642083	2853129	26.6	7.10	453	60	4.9	3650	182.19	n.d.
1571	Rancho La Rosita	647582	2852010	26.6	7.10	453	11	0.9	5000	194.34	n.d.
554	Peñoles Bermejillo	636076	2864813	29.7	7.10	430	68	5.2	4710	170.04	n.d.
3749	Ejido Roma - Texas	627735	2861303	26.5	7.28	443	41	3.4	859	267.21	n.d.
2745	San Isidro, GP	636312	2868848	27.0	7.00	453	16	1.3	4600	170.04	n.d.
1722 ?	Bermejillo	637397	2865782	39.0	6.78	330	2	0.1	4680	194.34	n.d.
Cepeda	Cepeda, Tlah.	660180	2881911	26.5	7.71	382	23	1.9	1151	157.90	n.d.
3035	El Capulin, Talh.	662692	2877861	25.2	7.52	408	68	5.7	3000	182.19	n.d.
El Pilar	Establo El Pilar	658479	2873752	29.4	7.79	389	61	4.8	1968	145.75	n.d.
608	Las Teresitas	655468	2869685	27.9	7.61	388	4	0.2	1765	72.87	n.d.
1579		655330	2868011	28.4	7.70	389	4	0.3	882	133.60	n.d.
632	Establo El Lucero	661449	2863043	32.6	8.38	376	0	0.0	563	133.60	n.d.
963	Establo Huitron	666086	2860783	28.0	7.56	412	3	0.1	860	157.90	n.d.
1624	12 de diciembre	662313	2853944	28.9	7.36	399	1	0.0	1200	133.60	n.d.
2345	Ejido Arcinas	657479	2854224	31.2	7.97	390	4	0.2	460	145.75	n.d.
274	Ejido California	659693	2848034	27.6	7.45	413	66	5.4	620	157.90	n.d.
1030	Las Arcadias	647400	2865220	32.7	7.40	446	3	0.2	4860	133.60	n.d.
581	Tierras Bajas	647627	2871014	28.0	7.22	392	58	4.6	4100	145.75	n.d.
2760	La Espada	639327	2873391	29.0	7.23	432	0	0.0	3530	182.19	n.d.
1477	Nombre de Dios	634851	2873470	26.5	6.96	441	24	1.9	5160	170.04	n.d.
2510	Establo Providencia del Norte	680263	2877403	24.8	8.31	398	4	0.3	797	185.44	9.12
1992	Cantabro Progreso	680624	2872662	24.8	7.99	409	0	0.0	853	148.35	9.12
1041	Ejido Yucatán	667229	2863299	33.8	8.50	381	0	0.0	1385	129.80	n.d.
996	El Rosano	676279	2860837	30.6	8.56	385	0	0.0	360	92.72	9.12
1040	Establo Buena Vista	669017	2857495	29.9	8.04	406	0	0.0	426	111.26	n.d.
762	Rancho Maravillas	685193	2864177	26.9	7.38	442	3	0.2	3880	120.53	n.d.
1500	La Palma	690425	2856966	29.2	7.62	426	17	1.3	2560	55.63	n.d.
2149	San Judas	688759	2852899	29.9	7.48	429	0	0.0	1803	64.90	n.d.
1915	Noria la 4	695667	2852881	28.8	7.38	431	2	0.1	9400	74.17	n.d.
2152	Tacubaya (Santo Domingo)	693408	2844286	24.4	7.02	420	2	0.1	2690	120.53	n.d.
1323	Rancho Nuevo Texas	695964	2846789	23.8	7.02	428	3	0.2	2030	139.08	n.d.
1186	Rancho Ciprés Matamoros	680045	2817044	26.6	7.05	423	56	4.5	3470	166.89	n.d.
1533	San Esteban	666410	2818495	28.8	7.76	352	4	0.3	555	92.72	n.d.
1243	Rancho Noacan	670143	2810118	26.5	7.02	429	24	2.0	1018	166.89	n.d.
2670	Campo Sagrado	667941	2818103	26.1	7.38	405	54	5.6	2180	111.26	n.d.

Tabla 3.2 Resultados fisicoquímicos e isotópicos del agua subterránea en La Comarca Lagunera

POZO	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	N-NO ₃ (mg/l)	N-NO ₂ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	F (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Fenoles (mg/l)	CN (mg/l)	Coliformes totales NPM/100 ml	Coliformes fecales NPM/100 ml	Si ppm
Cementerio	133.30	3600.0	5.6	0.030	0.69	0.77	1400.46	38.40	430.00	32.09	n.m.	0.062	>= 2400	>= 2400	24.28
Calera	121.63	1650.0	12.0	0.006	0.30	0.43	519.81	8.80	250.46	42.18	n.m.	0.013	1100	1100	16.60
Relleno	628.19	4250.0	3.0	0.010	0.27	3.94	1750.57	30.20	534.11	48.62	n.m.	0.001	>= 2400	>= 2400	6.95
808	14.99	62.4	2.8	0.005	0.12	0.25	54.61	2.40	33.20	5.59	0.000	0.087	>= 2400	>= 2400	21.40
3089	441.56	2700.0	1.0	0.005	0.50	2.06	751.56	12.40	568.81	44.00	0.080	0.050	>= 2400	1100	12.12
2002	18.32	462.5	1.6	0.008	0.58	0.86	130.77	4.90	49.79	18.35	n.d.	0.003	>= 2400	>= 2400	24.80
1198	31.65	265.0	2.1	0.025	0.31	0.94	114.55	4.50	31.68	12.88	0.036	0.002	>= 2400	>= 2400	22.30
Desafío	11.66	74.0	1.1	0.004	0.52	1.53	93.69	1.60	9.05	4.58	0.108	0.002	n.m.	n.m.	23.50
774	13.33	30.0	2.1	0.004	0.50	0.48	30.78	2.60	49.79	3.76	0.211	0.001	1100	4	18.70
El Carmen	5.00	62.0	1.3	0.004	0.14	0.43	49.29	2.80	34.70	3.64	0.203	0.001	>= 2400	7	20.40
El Coyote	43.34	699.8	1.1	0.002	0.13	0.27	41.51	6.50	350.00	5.47	0.219	0.043	>= 2400	11	21.80
Los Angeles	86.69	1093.4	26.6	0.007	0.30	0.52	327.75	7.90	324.20	30.26	0.050	0.002	n.m.	n.m.	36.50
247	106.70	1300.0	14.9	0.009	0.15	0.29	99.36	12.20	423.97	42.18	0.058	0.050	>= 2400	23	19.40
250	79.69	412.5	6.0	0.004	0.10	0.30	67.38	7.20	217.26	23.82	0.098	0.001	>= 2400	23	19.60
3441	30.01	130.0	5.5	0.005	0.09	0.30	45.04	4.70	89.60	11.66	0.001	n.d.	>= 2400	23	19.50
342	176.72	25.0	1.5	0.003	0.17	0.27	61.00	6.50	177.60	21.39	0.097	0.039	>= 2400	15	21.50
347	10.00	70.0	4.1	0.006	0.15	0.29	57.80	4.70	51.20	11.66	0.006	0.001	240	9	20.50
2156	36.67	487.5	6.1	0.005	0.12	0.95	72.70	4.00	132.80	51.54	n.d.	n.d.	n.m.	n.m.	11.00
214	15.00	246.2	5.2	n.d.	0.18	0.90	70.38	3.50	96.00	40.84	n.d.	0.001	n.m.	n.m.	13.50
212	21.67	250.0	4.4	0.011	0.07	1.00	36.53	3.80	120.00	51.54	n.d.	0.001	n.m.	n.m.	11.70
190	55.01	437.5	1.4	n.d.	0.19	1.86	79.08	4.10	126.40	37.92	0.007	0.002	n.m.	n.m.	18.40
GP	6.66	73.0	4.4	0.012	0.15	0.90	18.44	2.40	72.00	26.25	0.006	0.001	n.m.	n.m.	10.10
1612	163.39	800.0	23.3	0.006	0.28	0.73	184.46	6.50	232.00	54.45	n.d.	0.005	n.m.	n.m.	16.10
54	198.4	1693.4	11.2	0.004	0.29	0.77	312.80	8.60	406.40	104.05	0.017	0.002	n.m.	n.m.	28.42
Vergel	80.02	693.6	19.4	0.005	0.12	0.50	69.46	6.50	286.40	63.21	0.017	0.001	n.m.	n.m.	18.70
1308	190.06	993.6	19.0	0.008	0.18	1.71	176.87	7.50	348.20	82.05	n.d.	0.021	n.m.	n.m.	15.13
1571	126.71	1793.8	12.0	0.014	0.11	1.49	457.47	6.50	405.00	93.11	0.006	0.009	n.m.	n.m.	28.96
554	103.36	2393.8	1.0	0.005	0.61	2.48	269.56	16.20	600.00	145.87	0.009	0.036	n.m.	n.m.	10.47
3749	20	249.6	9.3	0.004	0.27	0.64	82.11	4.2	85	45.58	0.032	0.001	n.m.	n.m.	12.60
2745	115.04	1996.8	9.5	0.006	0.36	0.77	258.75	15.3	533.2	116.57	0.011	0.032	n.m.	n.m.	11.45
1722 ?	105.03	1896.5	1.8	0.004	0.57	2.75	237.59	17.00	556.80	73.00	0.015	0.002	n.m.	n.m.	11.18
Cepeda	11.67	437.3	0.6	0.006	0.65	3.16	173.65	2.00	75.20	14.58	0.018	0.001	n.m.	n.m.	29.60
3035	130.08	896.6	1.1	0.019	0.72	2.71	386.40	2.70	155.20	24.31	0.043	0.004	n.m.	n.m.	26.56
El Pilar	75.02	896.6	0.4	0.007	0.36	2.57	397.21	2.80	134.40	12.64	0.018	0.001	n.m.	n.m.	23.80
608	133.37	796.8	1.3	0.007	0.26	1.48	165.83	3.00	270.40	13.61	0.040	0.004	n.m.	n.m.	18.80
1579	20.00	274.6	0.5	0.003	0.36	2.01	63.94	1.70	75.20	20.42	0.020	0.002	n.m.	n.m.	24.20
632	10.00	97.4	1.4	0.004	0.20	1.70	69.46	1.10	20.80	10.63	0.018	n.d.	n.m.	n.m.	21.60
963	18.33	219.8	4.3	0.004	0.16	0.74	74.75	2.20	64.00	15.55	0.001	n.d.	n.m.	n.m.	24.20
1624	71.69	337.4	14.7	0.018	0.03	0.40	70.38	4.60	147.20	24.31	0.003	n.d.	n.m.	n.m.	21.80
2345	10.00	54.7	5.0	0.004	0.20	0.66	52.44	2.10	28.80	8.75	n.d.	0.012	n.m.	n.m.	20.70
274	35.01	184.8	2.8	0.003	0.14	0.47	46.00	3.80	96.00	19.44	n.d.	0.002	n.m.	n.m.	21.80
1030	206.73	1849.9	3.1	0.035	0.13	0.72	588.57	8.10	321.60	49.59	0.018	0.007	n.m.	n.m.	15.55
581	46.68	1996.8	1.3	0.008	0.17	0.77	567.41	5.50	288.00	88.49	0.006	0.013	n.m.	n.m.	19.14
2760	76.69	1836.5	2.2	0.000	0.08	0.66	492.89	10.60	379.20	72.93	0.005	0.012	n.m.	n.m.	11.70
1477	141.71	2249.8	15.8	0.000	0.18	1.47	280.14	18.60	563.20	182.82	0.020	0.016	n.m.	n.m.	11.44
2510	11.67	248.6	2.0	0.007	0.45	0.29	142.14	2.20	8.00	2.91	n.d.	0.002	n.m.	n.m.	25.90
1992	10.00	329.8	6.5	0.006	0.24	0.34	165.60	1.30	27.20	3.88	0.001	n.d.	n.m.	n.m.	23.40
1041	3.33	112.2	1.3	0.002	0.13	0.46	80.50	1.80	8.00	0.97	0.003	0.001	n.m.	n.m.	24.00
996	6.66	89.8	1.5	0.013	0.10	0.57	74.75	1.90	11.20	6.80	n.m.	0.001	n.m.	n.m.	23.50
1040	6.66	129.6	2.3	0.025	0.15	0.95	71.30	1.60	30.40	3.88	n.m.	0.001	n.m.	n.m.	22.90
762	135.04	1800.0	3.5	0.036	0.08	1.15	606.97	6.30	379.20	23.33	n.m.	0.018	n.m.	n.m.	20.36
1500	48.35	1104.0	2.5	0.021	0.11	0.86	177.10	4.30	313.60	11.66	n.m.	0.019	n.m.	n.m.	20.70
2149	30.01	793.9	16.2	0.021	0.15	1.10	143.29	4.90	252.80	15.55	n.m.	0.031	n.m.	n.m.	20.70
1915	385.13	2400.0	18.2	0.007	0.12	1.35	702.42	9.40	576.00	1.94	n.m.	0.052	n.m.	n.m.	20.00
2152	55.01	2736.0	4.1	0.011	0.10	0.96	589.72	9.10	513.60	85.57	n.m.	0.021	n.m.	n.m.	28.32
1323	53.35	1899.8	4.9	0.028	0.20	0.77	265.65	2.50	540.80	91.41	n.m.	0.030	n.m.	n.m.	58.80
1186	383.46	1699.7	3.0	0.007	0.11	0.98	529.92	20.40	336.00	112.80	n.m.	0.014	n.m.	n.m.	19.84
1533	20.00	179.5	1.2	0.006	0.06	1.43	69.00	3.70	57.60	11.66	n.m.	0.001	n.m.	n.m.	18.20
1243	56.68	349.9	15.6	0.004	0.07	1.45	57.50	6.30	112.00	53.48	n.m.	0.003	n.m.	n.m.	13.60
2670	276.76	900.0	10.6	0.002	0.09	1.13	311.65	12.00	136.00	52.51	n.m.	0.001	n.m.	n.m.	23.00

Tabla 3.2 Resultados fisicoquímicos e isotópicos del agua subterránea en La Comarca Lagunera

POZO	Li ppm	Be ppm	Al ppm	Sc ppm	Ti ppm	V ppm	Cr ppm	Mn ppm	Fe ppm	Co ppm	Ni ppm	Cu ppm	Zn ppm	Ga ppm	Ge ppm	As ppm	Se ppm	Br ppm	Rb ppm
Cementerio	0.43785	n.d.	0.284	0.002616	0.00432	0.0502	n.d.	0.05412	0.04186	0.00071	0.10954	0.01781	0.03937	0.00007	0.000105	0.13129	0.03169	1.31308	0.01544
Calera	0.07548	n.d.	0.015	0.001787	0.00240	0.0072	n.d.	0.00172	0.05588	0.00012	0.04526	0.00524	0.02227	n.d.	0.000186	0.09158	0.02913	1.07000	0.00743
Relleno	1.06792	n.d.	0.105	n.d.	0.00848	0.0146	n.d.	0.05972	0.27137	0.00304	0.27640	0.02865	0.11211	n.d.	0.000127	0.15312	0.00302	6.80000	0.00654
808	0.05400	n.d.	0.007	0.002257	0.00319	0.0073	0.00154	0.00125	n.d.	0.00004	0.01352	0.00331	0.01601	n.d.	0.000404	0.01593	0.00441	0.16938	0.00276
3089	0.12024	n.d.	0.018	0.002031	0.00429	n.d.	0.00643	0.00936	0.13612	0.00029	0.05060	0.00525	0.01396	0.00011	0.000571	0.24046	0.00112	1.21521	0.02678
2002	0.17335	n.d.	0.011	0.002741	0.00396	0.0540	n.d.	0.03558	0.01779	0.00006	0.01929	0.00201	0.00412	n.d.	0.000272	0.07261	0.00138	0.30197	0.00338
1198	0.11871	n.d.	0.012	0.002621	0.00272	0.0444	n.d.	0.00911	0.01809	0.00003	0.01153	0.00139	0.00674	n.d.	0.000317	0.13617	0.00159	0.31772	0.00296
Desafio	0.06476	n.d.	0.060	0.002612	0.00328	0.0261	n.d.	0.00748	0.08061	0.00004	0.00603	0.00201	0.00412	0.00009	0.000859	0.28855	0.00034	1.19668	0.00193
774	0.03305	n.d.	0.008	0.002179	0.00260	0.0048	n.d.	0.00075	0.00603	0.00003	0.00404	0.00451	0.00266	n.d.	0.000269	0.01308	0.00313	0.20478	0.00378
El Carmen	0.04086	n.d.	0.008	0.002494	0.00272	0.0080	n.d.	0.00072	0.02357	0.00002	0.00548	0.00122	0.00532	0.00002	0.000454	0.02282	0.00133	0.08548	0.00420
El Coyote	0.11831	n.d.	0.005	0.002681	0.00336	0.0036	n.d.	0.00062	n.d.	0.00016	0.00845	0.00136	0.00293	0.00001	0.000464	0.00811	0.00248	0.66783	0.00814
Los Angeles	0.12909	n.d.	0.007	0.004082	0.00511	0.0175	n.d.	0.00139	n.d.	0.00017	0.01614	0.00464	0.00525	n.d.	0.000226	0.04538	0.01951	1.17396	0.00666
247	0.11567	n.d.	0.008	0.002191	0.00389	0.0021	0.00122	0.00192	0.05231	0.00021	0.00795	0.00327	0.01517	0.00001	0.000171	0.00511	0.01215	0.72102	0.01425
250	0.07486	n.d.	0.005	0.002099	0.00277	0.0026	0.00090	0.00073	n.d.	0.00012	0.00540	0.00155	0.01833	n.d.	0.000194	0.00580	0.00827	0.55382	0.00795
3441	0.05232	n.d.	0.012	0.002403	0.00281	0.0037	n.d.	0.00325	0.02851	0.00007	0.00310	0.00250	0.01843	n.d.	0.000182	0.00806	0.00685	0.23802	0.00436
342	0.08789	n.d.	0.004	0.002786	0.00298	0.0014	n.d.	0.43352	0.02211	0.00060	0.00725	0.00521	0.00475	n.d.	0.000201	0.00477	0.00040	0.37394	0.00571
347	0.05884	n.d.	0.004	0.002564	0.00261	0.0058	n.d.	0.00087	0.01167	0.00003	0.00188	0.00160	0.01609	n.d.	0.000344	0.03396	0.00761	0.12930	0.00444
2156	0.04591	n.d.	0.016	0.001572	0.00205	0.0041	n.d.	0.00119	0.02023	0.00007	0.00310	0.00138	0.00457	0.00002	0.000266	0.04787	0.00704	0.34230	0.00778
214	0.03788	n.d.	0.007	0.001604	0.00258	0.0038	n.d.	0.00179	0.01769	0.00005	0.00201	0.00338	0.01645	0.00001	0.000226	0.04291	0.00168	0.15822	0.00632
212	0.04420	n.d.	0.006	0.001655	0.00199	0.0046	n.d.	0.00133	0.03836	0.00005	0.00380	0.00153	0.00692	0.00001	0.000254	0.04654	0.00191	0.20909	0.00713
190	0.11957	n.d.	0.021	0.002203	0.00269	0.0140	n.d.	0.00424	0.04925	0.00007	0.00387	0.04444	0.00357	0.00002	0.000394	0.09109	0.00556	0.51382	0.00388
GP	0.02362	n.d.	0.006	0.001629	0.00188	0.0038	n.d.	0.00112	0.02342	0.00004	0.00167	0.00308	0.00985	0.00001	0.000178	0.04094	0.00119	0.09291	0.00535
1612	0.05582	n.d.	0.005	0.002174	0.00201	0.0107	n.d.	0.00072	0.02590	0.00010	0.00659	0.00234	0.00382	0.00002	0.000553	0.04628	0.01342	2.08000	0.00691
54	0.14528	n.d.	0.007	0.003408	0.00357	0.0099	n.d.	0.00284	0.02975	0.00025	0.01894	0.00927	0.00925	n.d.	0.000331	0.04120	0.01698	2.21340	0.00679
Vergel	0.07703	n.d.	0.010	0.002113	0.00282	0.0041	n.d.	0.00872	0.06531	0.00018	0.00316	0.00260	0.03381	n.d.	0.000295	0.01505	0.00985	0.64545	0.00727
1308	0.12693	n.d.	0.005	0.002130	0.00292	0.0135	n.d.	0.00240	0.01016	0.00016	0.00955	0.00342	0.00395	n.d.	0.000265	0.02327	0.01482	2.37500	0.00327
1571	0.23213	n.d.	0.009	0.003095	0.00400	0.0312	n.d.	0.01438	0.07064	0.00022	0.03679	0.00632	0.00577	n.d.	0.000375	0.15815	0.04155	1.28657	0.00706
554	0.46613	n.d.	0.010	0.001700	0.00315	0.0051	n.d.	0.00797	0.32350	0.00025	0.02992	0.00372	0.01873	0.00003	0.001666	0.47123	0.00749	0.74855	0.04998
3749	0.04692	n.d.	0.005	0.001746	0.00212	0.0079	n.d.	0.00068	0.02968	0.00004	0.00576	0.00161	0.01224	n.d.	0.000159	0.01136	0.00852	0.33347	0.00185
2745	0.33904	n.d.	0.009	0.001724	0.00261	0.0085	n.d.	0.00351	0.09258	0.00023	0.01452	0.00276	0.02269	n.d.	0.001561	0.54772	0.00328	0.91130	0.03743
1722 ?	0.47093	n.d.	0.010	0.002039	0.00355	0.0003	n.d.	0.02279	0.39530	0.00026	0.01888	0.00276	0.01342	0.00006	0.002272	0.42460	0.00129	0.72659	0.06056
Cepeda	0.10583	n.d.	0.008	0.003372	0.00360	0.0435	n.d.	0.13653	0.33386	0.00006	0.01904	0.00278	0.00776	n.d.	0.000360	0.40046	0.00167	0.12305	0.00286
3035	0.12178	n.d.	0.010	0.002856	0.00331	0.0711	0.00207	0.18927	0.03189	0.00010	0.02349	0.00328	0.00878	n.d.	0.000281	0.47046	0.01814	1.33135	0.00388
El Pilar	0.13649	n.d.	0.006	0.002403	0.00284	0.0252	0.00070	0.14893	0.03853	0.00007	0.00921	0.00205	0.00202	0.00002	0.000663	0.29405	0.00794	0.47867	0.00412
608	0.12491	n.d.	0.012	0.002103	0.00242	0.0226	0.00077	0.05524	0.03943	0.00010	0.00932	0.00542	0.00946	n.d.	0.000558	0.12710	0.01597	0.74507	0.00456
1579	0.08101	n.d.	0.011	0.002432	0.00240	0.0402	0.00106	0.00151	0.01463	0.00003	0.00954	0.00199	0.00334	0.00002	0.000642	0.26899	0.00500	0.15876	0.00220
632	0.07829	n.d.	0.015	0.002187	0.00269	0.0351	n.d.	0.00968	0.01815	0.00001	0.00508	0.00146	0.00269	0.00008	0.001091	0.19297	0.00442	0.11924	0.00167
963	0.06569	n.d.	0.005	0.002342	0.00276	0.0193	0.00081	0.00543	0.00542	0.00003	0.00385	0.00313	0.00273	n.d.	0.000501	0.04955	0.01110	0.40309	0.00314
1624	0.06441	n.d.	0.009	0.002141	0.00300	0.0066	0.00210	0.00151	0.01245	0.00006	0.00225	0.00347	0.00888	n.d.	0.000433	0.01189	0.01449	0.94200	0.00562
2345	0.05135	n.d.	0.010	0.002106	0.00238	0.0189	0.00111	0.00089	0.02142	0.00001	0.00176	0.00125	0.00154	0.00002	0.000593	0.04835	0.00292	0.13551	0.00231
274	0.04373	n.d.	0.008	0.002174	0.00230	0.0057	0.00262	0.00101	0.01853	0.00005	0.00218	0.00201	0.00726	n.d.	0.000284	0.01415	0.00615	0.56704	0.00444
1030	0.19139	n.d.	0.012	0.001983	0.00278	0.0224	0.00193	0.01121	0.02011	0.00013	0.04074	0.00648	0.01111	0.00003	0.000434	0.03220	0.01123	1.17856	0.00584
581	0.19899	n.d.	0.010	0.002234	0.00309	0.0352	0.00455	0.22142	n.d.	0.00024	0.01759	0.00380	0.02054	0.00002	0.000482	0.08436	0.00814	0.48084	0.00706
2760	0.25151	n.d.	0.018	0.001551	0.00255	0.0195	0.00058	0.07591	n.d.	0.00022	0.01399	0.00245	0.01087	0.00002	0.000255	0.12508	0.00258	0.73286	0.00643
1477	0.51157	n.d.	0.009	0.001626	0.00262	0.0144	0.00353	0.00253	0.06032	0.00024	0.01952	0.00382	0.00617	n.d.	0.000375	0.34014	0.00611	1.26177	0.02207
2510	0.05972	n.d.	0.012	0.002651	0.00275	0.1092	0.00154	0.00276	0.01707	0.00001	0.00716	0.00369	0.00282	0.00001	0.000447	0.71883	0.00410	0.12768	0.00125
1992	0.07898	n.d.	0.009	0.002187	0.00252	0.0619	n.d.	0.00142	0.01801	0.00002	0.01078	0.00170	0.00189	n.d.	0.000581	0.33392	0.01371	0.24747	0.00154
1041	0.07990	n.d.	0.022	0.002410	0.00329	0.0271	n.d.	0.00791	0.01238	0.00001	0.00586	0.00151	0.00762	0.00010	0.001325	0.25296	0.00080	0.09236	0.00177
996	0.07954	n.d.	0.011	0.002346	0.00256	0.0407	n.d.	0.00720	0.00632	0.00001	0.00478	0.00114	0.00304	0.00005	0.000972	0.13346	0.00242	0.15521	0.00137
1040	0.07932	n.d.	0.011	0.002274	0.00268	0.0275	n.d.	0.01912	0.00630	0.00002	0.00374	0.00066	0.00137	0.00003	0.000755	0.06568	0.00315	0.16242	0.00192
762	0.24861	n.d.	0.036	0.003152	0.00392	0.0254	n.d.	0.59410	0.05874	0.00023	0.06401	0.00564	0.01024	0.00002	0.000877	0.10836	0.06257	1.92708	0.00699
1500	0.12791	n.d.	0.012	0.002158	0.00304	0.0196	n.d.	0.14416	0.02197	0.00014	0.01211	0.00271	0.01118	0.00002	0.000769	0.14821	0.00621	0.35812	0.00618
2149	0.09977	n.d.	0.005	0.002281	0.00293	0.0239	n.d.	0.14841	0.02658	0.00012	0.01072	0.00156	0.00299	0.00002	0.000800	0.11124	0.00207	0.31737	0.00652
1915	0.38576	n.d.	0.008	0.002805	0.00395	0.0													

Tabla 3.2 Resultados fisicoquímicos e isotópicos del agua subterránea en La Comarca Lagunera

POZO	Sr ppm	Y ppm	Zr ppm	Nb ppm	Mo ppm	Ru ppm	Pd ppm	Ag ppm	Cd ppm	In ppm	Sn ppm	Sb ppm	Te ppm	I ppm	Cs ppm	Ba ppm	La ppm	Ce ppm	Pr ppm
Cementerio	5.11224	0.00007	0.00012	0.000017	0.32858	n.d.	0.00018	0.00115	0.00131	0.000003	0.00025	0.00595	0.00035	1.15918	0.000108	0.02485	0.000043	0.000103	0.000014
Calera	>	0.00002	0.00002	0.000005	0.15424	n.d.	0.00010	n.d.	0.00029	n.d.	n.d.	0.00052	0.00001	0.19018	0.001021	0.04535	0.000008	0.000016	0.000002
Reileno	10.05000	0.00013	0.00108	0.000026	0.15005	n.d.	0.00022	n.d.	0.00067	0.000013	0.00284	0.00561	0.00008	1.15322	0.000164	0.03469	0.000081	0.000196	0.000020
808	0.33558	0.00003	0.00002	n.d.	0.00207	n.d.	n.d.	n.d.	0.00007	n.d.	n.d.	0.00049	n.d.	0.02751	0.000091	0.01607	0.000022	0.000041	0.000006
3089	>	0.00005	0.00003	0.000010	0.000136	n.d.	0.00017	n.d.	0.00005	0.000004	0.00021	0.00002	0.00007	0.09580	0.028729	0.01167	0.000030	0.000072	0.000009
2002	1.11000	0.00003	0.00003	n.d.	0.01673	n.d.	0.00002	n.d.	0.00005	n.d.	n.d.	0.00065	n.d.	0.09167	0.000122	0.01588	0.000070	0.000065	0.000007
1198	0.72878	0.00001	0.00037	n.d.	0.01397	n.d.	0.00005	n.d.	0.00011	n.d.	n.d.	0.00062	n.d.	0.07825	0.000076	0.03602	0.000054	0.000020	0.000003
Desafio	0.15550	0.00014	0.00015	0.000006	0.00850	n.d.	0.00002	n.d.	0.00007	n.d.	0.00061	0.00136	0.00001	0.06597	0.000133	0.00829	0.000198	0.000285	0.000039
774	0.36681	0.00002	0.00001	n.d.	0.00198	n.d.	n.d.	n.d.	0.00003	n.d.	n.d.	0.00039	n.d.	0.02213	0.000127	0.01747	0.000063	0.000048	0.000006
El Carmen	0.33365	0.00002	0.00002	n.d.	0.00513	n.d.	0.00001	n.d.	0.00004	n.d.	0.00011	0.00051	n.d.	0.02234	0.000280	0.01177	0.000060	0.000028	0.000003
El Coyote	2.24000	0.00004	n.d.	n.d.	0.00086	n.d.	n.d.	n.d.	0.00005	n.d.	n.d.	0.00032	n.d.	0.05959	0.000424	0.04106	0.000026	0.000030	0.000005
Los Angeles	2.01250	0.00005	0.00002	n.d.	0.01596	n.d.	0.00003	n.d.	0.00021	n.d.	0.00089	0.00095	0.00002	0.03998	0.000480	0.02587	0.000077	0.000027	0.000004
247	3.18000	0.00006	0.00002	0.000006	0.00065	n.d.	n.d.	0.00052	0.00011	n.d.	0.00023	0.00040	0.00001	0.03473	0.000582	0.04957	0.000123	0.000210	0.000026
250	1.74000	0.00003	0.00001	n.d.	0.00049	n.d.	n.d.	n.d.	0.00005	n.d.	n.d.	0.00031	n.d.	0.02360	0.000230	0.04469	0.000012	0.000020	0.000003
3441	0.70186	0.00006	0.00002	n.d.	0.00045	n.d.	n.d.	n.d.	0.00003	n.d.	n.d.	0.00043	n.d.	0.01853	0.000137	0.03756	0.000051	0.000103	0.000013
342	1.22000	0.00006	0.00016	n.d.	0.00034	n.d.	n.d.	n.d.	0.00004	n.d.	0.00023	0.00032	n.d.	0.07706	0.000093	0.09195	0.000013	0.000034	0.000004
347	1.03000	0.00001	n.d.	n.d.	0.00052	n.d.	n.d.	n.d.	0.00003	n.d.	n.d.	0.00029	n.d.	0.01412	0.000272	0.18018	0.000009	0.000020	0.000002
2156	>	0.00004	0.00003	n.d.	0.02313	n.d.	0.00002	n.d.	0.00008	n.d.	n.d.	0.00084	0.00003	0.03352	0.004822	0.03104	0.000033	0.000070	0.000011
214	3.23000	0.00002	0.00002	n.d.	0.01479	n.d.	n.d.	n.d.	0.00008	n.d.	0.00079	0.00084	n.d.	0.02293	0.003885	0.03577	0.000013	0.000026	0.000003
212	>	0.00002	0.00005	n.d.	0.01760	n.d.	0.00001	n.d.	0.00010	n.d.	0.00010	0.00084	0.00001	0.02864	0.004645	0.03511	0.000008	0.000020	0.000002
190	>	0.00007	0.00005	n.d.	0.01969	n.d.	0.00002	n.d.	0.00007	n.d.	n.d.	0.00038	n.d.	0.04989	0.000385	0.03259	0.000039	0.000084	0.000010
GP	3.47000	0.00002	0.00020	n.d.	0.01233	n.d.	0.00001	n.d.	0.00005	n.d.	n.d.	0.00088	n.d.	0.02274	0.002654	0.09303	0.000015	0.000034	0.000004
1612	>	0.00009	0.00001	n.d.	0.01049	n.d.	0.00003	n.d.	0.00004	n.d.	n.d.	0.00024	n.d.	0.08846	0.005315	0.03424	0.000036	0.000027	0.000007
54	>	0.00008	0.00002	n.d.	0.08543	n.d.	0.00005	n.d.	0.00025	n.d.	n.d.	0.00053	0.00006	0.20511	0.000749	0.02539	0.000038	0.000050	0.000006
Vergel	>	0.00007	0.00002	n.d.	0.00793	n.d.	0.00001	n.d.	0.00014	n.d.	0.00029	0.00040	n.d.	0.15220	0.000322	0.04871	0.000053	0.000084	0.000010
1308	>	0.00007	0.00002	n.d.	0.06923	n.d.	0.00004	n.d.	0.00021	n.d.	0.00013	0.00020	0.00003	0.24502	0.000155	0.00738	0.000021	0.000030	0.000005
1571	>	0.00006	0.00004	n.d.	0.28702	n.d.	0.00017	n.d.	0.00072	n.d.	n.d.	0.00080	n.d.	0.35815	0.000431	0.02569	0.000036	0.000078	0.000007
554	>	0.00003	0.00003	0.000008	0.02917	n.d.	0.00002	n.d.	0.00014	n.d.	n.d.	0.00435	0.00005	0.07453	0.058954	0.00828	0.000021	0.000051	0.000006
3749	2.67000	0.00002	0.00001	n.d.	0.01553	n.d.	0.00001	n.d.	0.00006	n.d.	n.d.	0.00013	0.00003	0.04607	0.000526	0.02113	0.000024	0.000049	0.000004
2745	>	0.00005	n.d.	n.d.	0.01886	n.d.	0.00002	n.d.	0.00020	n.d.	0.00015	0.00018	n.d.	0.18365	0.027847	0.01034	0.000027	0.000055	0.000006
1722 ?	>	0.00006	0.00003	0.000008	0.00090	n.d.	0.00013	n.d.	0.00014	0.000002	0.00075	0.00015	0.00002	0.10740	0.071242	0.01367	0.000025	0.000056	0.000007
Cepeda	0.35689	0.00002	0.00004	n.d.	0.05711	n.d.	0.00004	n.d.	0.00015	n.d.	0.00017	0.00023	n.d.	0.14011	0.000291	0.01397	0.000025	0.000054	0.000007
3035	0.84639	0.00002	0.00003	n.d.	0.08239	n.d.	0.00008	n.d.	0.00024	n.d.	0.00138	0.00172	0.00002	0.24528	0.000346	0.02526	0.000020	0.000041	0.000006
El Pilar	0.59446	0.00002	0.00002	n.d.	0.07269	n.d.	0.00004	n.d.	0.00015	n.d.	n.d.	0.00190	n.d.	0.21651	0.000276	0.02229	0.000012	0.000025	0.000003
608	0.98415	0.00004	0.00003	n.d.	0.11620	n.d.	0.00006	n.d.	0.00027	n.d.	n.d.	0.00109	0.00005	0.15959	0.000305	0.03513	0.000056	0.000073	0.000009
1579	0.29371	0.00003	0.00005	n.d.	0.05205	n.d.	0.00004	n.d.	0.00042	n.d.	n.d.	0.00188	n.d.	0.10368	0.000176	0.00703	0.000024	0.000050	0.000005
632	0.05849	0.00002	0.00009	n.d.	0.01473	n.d.	0.00002	n.d.	0.00007	n.d.	0.00034	0.00271	n.d.	0.08103	0.000162	0.00548	0.000027	0.000056	0.000007
963	0.36661	0.00002	n.d.	n.d.	0.01190	n.d.	0.00002	n.d.	0.00004	n.d.	n.d.	0.00097	n.d.	0.06088	0.000187	0.02349	0.000013	0.000022	0.000004
1624	0.97440	0.00003	0.00001	n.d.	0.00305	n.d.	n.d.	n.d.	0.00004	n.d.	n.d.	0.00047	0.00001	0.05686	0.000280	0.05462	0.000029	0.000055	0.000008
2345	0.15813	0.00002	0.00002	n.d.	0.00518	n.d.	n.d.	n.d.	0.00002	n.d.	n.d.	0.00110	n.d.	0.04599	0.000077	0.00930	0.000018	0.000040	0.000005
274	0.98374	0.00003	0.00003	n.d.	0.00166	n.d.	n.d.	n.d.	0.00004	n.d.	n.d.	0.00048	0.00003	0.02443	0.000128	0.04207	0.000028	0.000049	0.000008
1030	>	0.00004	0.00004	n.d.	0.23588	n.d.	0.00011	n.d.	0.00044	n.d.	0.00048	0.00037	0.00004	0.37481	0.000308	0.01624	0.000095	0.000168	0.000017
581	3.51288	0.00005	0.00003	n.d.	0.13552	n.d.	0.00006	n.d.	0.00028	n.d.	n.d.	0.00061	0.00007	0.32104	0.000429	0.01222	0.000033	0.000043	0.000007
2760	>	0.00006	0.00005	n.d.	0.05654	n.d.	0.00003	n.d.	0.00026	n.d.	0.00171	0.00017	0.00006	0.34787	0.000356	0.01361	0.000039	0.000088	0.000011
1477	>	0.00005	0.00005	n.d.	0.02547	n.d.	0.00002	n.d.	0.00014	n.d.	n.d.	0.00014	0.00006	0.23755	0.004108	0.00840	0.000034	0.000065	0.000007
2510	0.05531	0.00002	0.00005	n.d.	0.02376	n.d.	0.00002	n.d.	0.00008	n.d.	0.00024	0.00269	n.d.	0.13868	0.000080	0.00485	0.000022	0.000045	0.000006
1992	0.17219	0.00002	0.00002	n.d.	0.02802	n.d.	0.00002	n.d.	0.00006	n.d.	n.d.	0.00212	n.d.	0.15317	0.000097	0.01156	0.000015	0.000030	0.000004
1041	0.03505	0.00004	0.00020	n.d.	0.01216	n.d.	0.00002	n.d.	0.00004	n.d.	0.00032	0.00242	0.00001	0.09794	0.000163	0.00358	0.000044	0.000098	0.000012
996	0.03215	0.00002	0.00003	n.d.	0.00800	n.d.	n.d.	n.d.	0.00007	n.d.	n.d.	0.00295	n.d.	0.08682	0.000118	0.00338	0.000021	0.000044	0.000006
1040	0.12554	0.00002	n.d.	n.d.	0.01246	n.d.	n.d.	n.d.	0.00005	n.d.	0.00013	0.00140	n.d.	0.06297	0.000125	0.00800	0.000023	0.000053	0.000006
762	2.32704	0.00020	0.00005	n.d.	0.10755	n.d.	0.00007	n.d.	0.00028	0.000002	0.00031	0.00118	n.d.	0.32655	0.000625	0.02133	0.000213	0.000421	0.000059
1500	1.27000	0.00003	0.00003	0.000005	0.02838	n.d.	0.00002	n.d.	0.00007	n.d.	0.00032	0.00112	n.d.	0.14390	0.000461	0.01517	0.000030	0.000063	0.000006
2149	2.25000	0.00003	0.00001	n.d.	0.01972	n.d.	0.00002	n.d.	0.00004	n.d.	n.d.	0.00092	0.00002	0.10468	0.000435	0.01619	0.000021	0.000040	0.000004
1915	4.50864	0.00005	n.d.	n.d.	0.08336	n.d.	0.00009	n.d.	0.00025	n.d.	0.00056	0.00091	0.00008	0.33164	0.001053	0.01077	0.000040	0.000079	0.000008
2152	9.68000	0.00007	0.00003	n.d.	0.07210	0.000021	0.00004	n.d.	0.00019	n.d.	0.00062	0.00110	0.00016	0.20130	0.000731	0.01474	0.000050	0.000063	0.000011
1323	7.69000	0.00006	0.00002	0.000008	0.02827	0.000021	0.00002	n.d.	0.00010	n.d.	0.00032	0.00240	0.00024	0.09549	0.000325	0.01040	0.000050	0.000049	0.000006
1186	6.73600	0.00005	n.d.	n.d.	0.06003	n.d.													

Tabla 3.2 Resultados fisicoquímicos e isotópicos del agua subterránea en La Comarca Lagunera

POZO	Nd ppm	Sm ppm	Eu ppm	Gd ppm	Tb ppm	Dy ppm	Ho ppm	Er ppm	Tm ppm	Yb ppm	Lu ppm	Hf ppm	Ta ppm	W ppm	Re ppm	Os ppm	Pt ppm	Au ppm	Hg ppm
Cementerio	0.000051	0.000013	0.000003	0.000011	0.000007	0.000012	0.000012	0.000006	0.000002	0.000010	0.000003	0.000005	n.d.	0.00082	0.000294	n.d.	n.d.	0.000004	n.d.
Calera	0.000006	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000001	0.000001	0.000001	n.d.	0.000001	n.d.	n.d.	n.d.	0.00007	0.000118	n.d.	n.d.	n.d.	0.000487
Reileno	0.000087	0.000018	n.d.	n.d.	0.000009	0.000009	0.000012	0.000014	n.d.	0.000023	0.000010	0.000015	n.d.	n.d.	0.000631	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
808	0.000030	0.000003	n.d.	0.000005	n.d.	0.000004	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000021	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
3089	0.000043	n.d.	n.d.	0.000005	0.000003	0.000003	n.d.	0.000004	n.d.	0.000004	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2002	0.000033	0.000007	n.d.	0.000004	n.d.	0.000006	0.000002	0.000002	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	0.00063	0.000027	n.d.	n.d.	n.d.	0.000515
1198	0.000011	n.d.	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000009	n.d.	0.00193	0.000033	n.d.	n.d.	n.d.	0.000254
Desafío	0.000150	0.000042	0.000006	0.000032	0.000004	0.000023	0.000005	0.000013	0.000002	0.000012	0.000002	0.000005	n.d.	0.00662	0.000007	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
774	0.000028	0.000004	n.d.	0.000004	n.d.	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	0.00008	0.000023	n.d.	n.d.	n.d.	0.000325
El Carmen	0.000018	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	0.00025	0.000015	n.d.	n.d.	n.d.	0.000486
El Coyote	0.000016	0.000003	0.000001	0.000005	0.000001	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000067	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Los Angeles	0.000024	0.000004	n.d.	0.000004	n.d.	0.000002	0.000002	0.000003	n.d.	0.000005	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000155	n.d.	n.d.	n.d.	0.001283
247	0.000076	0.000007	n.d.	0.000010	n.d.	0.000005	0.000001	0.000003	n.d.	0.000004	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000205	n.d.	n.d.	n.d.	0.000205
250	0.000013	n.d.	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000100	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
3441	0.000047	0.000008	0.000002	0.000014	0.000001	0.000008	0.000002	0.000006	n.d.	0.000006	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000037	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
342	0.000019	n.d.	n.d.	0.000004	n.d.	0.000005	0.000002	0.000012	0.000003	0.000031	0.000008	0.000002	n.d.	n.d.	0.000057	n.d.	n.d.	n.d.	0.000275
347	0.000009	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000001	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000026	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2156	0.000046	0.000009	n.d.	0.000009	0.000001	0.000005	0.000001	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	0.00038	0.000092	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
214	0.000014	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	0.000001	n.d.	0.000001	n.d.	n.d.	n.d.	0.00031	0.000059	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
212	0.000009	n.d.	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	0.000001	n.d.	0.000001	n.d.	n.d.	n.d.	0.00033	0.000075	n.d.	n.d.	0.000013	n.d.
190	0.000043	0.000011	0.000001	0.000009	n.d.	0.000005	0.000001	0.000004	n.d.	0.000006	n.d.	n.d.	n.d.	0.00055	0.000149	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
GP	0.000019	0.000002	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	0.000001	n.d.	0.000002	n.d.	0.000004	n.d.	n.d.	0.000040	n.d.	n.d.	n.d.	0.000517
1612	0.000027	0.000006	0.000002	0.000002	n.d.	0.000005	0.000002	0.000004	n.d.	0.000006	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000520	n.d.	n.d.	n.d.	0.000875
54	0.000033	0.000004	n.d.	0.000008	n.d.	0.000004	0.000002	0.000006	n.d.	0.000005	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000696	n.d.	n.d.	n.d.	0.000707
Vergel	0.000040	0.000010	n.d.	0.000010	0.000001	0.000005	0.000002	0.000006	n.d.	0.000006	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000189	n.d.	n.d.	n.d.	0.000501
1308	0.000019	0.000004	n.d.	0.000007	n.d.	0.000004	0.000002	0.000004	n.d.	0.000004	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000710	n.d.	n.d.	n.d.	0.000693
1571	0.000024	0.000006	0.000002	0.000008	0.000002	0.000002	0.000002	0.000002	n.d.	0.000005	n.d.	0.000005	n.d.	0.00033	0.000503	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
554	0.000020	0.000005	n.d.	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	0.000004	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000140	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
3749	0.000027	0.000005	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	0.000001	n.d.	0.000001	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000074	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2745	0.000029	n.d.	n.d.	0.000007	n.d.	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000049	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
1722 ?	0.000023	0.000007	n.d.	0.000008	n.d.	0.000005	0.000002	0.000002	n.d.	0.000004	n.d.	n.d.	n.d.	0.00055	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000322
Cepeda	0.000037	0.000004	n.d.	0.000009	0.000001	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	0.00724	0.000028	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
3035	0.000016	0.000004	n.d.	n.d.	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	0.000005	n.d.	0.000005	n.d.	0.00723	0.000156	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
El Pilar	0.000008	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	0.000001	0.01278	0.000075	n.d.	n.d.	n.d.	0.000388
608	0.000035	0.000010	0.000002	0.000012	0.000001	0.000005	n.d.	0.000004	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	0.000001	0.00479	0.000101	n.d.	n.d.	n.d.	0.000551
1579	0.000030	0.000007	0.000002	0.000006	n.d.	0.000006	0.000001	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	0.000001	0.01464	0.000026	n.d.	n.d.	n.d.	0.000682
632	0.000030	0.000006	0.000002	0.000006	n.d.	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	0.000004	n.d.	n.d.	n.d.	0.01006	0.000018	n.d.	n.d.	n.d.	0.001498
963	0.000022	n.d.	n.d.	0.000002	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	0.00125	0.000056	n.d.	n.d.	n.d.	0.000625
1624	0.000035	0.000004	0.000001	0.000006	0.000001	0.000005	n.d.	0.000003	n.d.	0.000004	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	0.000133	n.d.	n.d.	n.d.	0.000671
2345	0.000017	0.000003	n.d.	0.000006	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	0.00128	0.000018	n.d.	n.d.	n.d.	0.000228
274	0.000031	0.000006	0.000001	0.000005	n.d.	0.000004	n.d.	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000057	n.d.	n.d.	n.d.	0.000476
1030	0.000058	0.000009	0.000002	0.000016	n.d.	0.000006	0.000002	0.000003	n.d.	0.000003	n.d.	0.000004	n.d.	0.00039	0.000255	n.d.	n.d.	0.000014	0.000721
581	0.000023	0.000007	n.d.	0.000007	n.d.	0.000006	n.d.	0.000003	n.d.	0.000006	n.d.	0.000005	n.d.	0.00057	0.000093	n.d.	n.d.	0.000003	0.000998
2760	0.000049	0.000012	0.000001	0.000010	0.000002	0.000010	0.000001	0.000005	n.d.	0.000005	0.000001	0.000004	n.d.	n.d.	0.000080	0.000001	n.d.	0.000005	0.000705
1477	0.000029	0.000011	0.000002	0.000007	n.d.	0.000008	n.d.	0.000005	n.d.	0.000005	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000081	n.d.	n.d.	n.d.	0.001503
2510	0.000022	0.000004	0.000001	0.000006	0.000001	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	0.000004	n.d.	0.000003	n.d.	0.02753	0.000015	n.d.	n.d.	0.000009	0.000582
1992	0.000020	0.000004	n.d.	0.000004	n.d.	0.000003	n.d.	0.000002	n.d.	0.000004	n.d.	n.d.	n.d.	0.01363	0.000029	n.d.	n.d.	n.d.	0.000293
1041	0.000044	0.000012	0.000002	0.000009	n.d.	0.000008	n.d.	0.000003	0.000001	0.000003	n.d.	0.000005	n.d.	0.01063	0.000009	n.d.	n.d.	n.d.	0.000251
996	0.000020	0.000005	n.d.	0.000004	n.d.	0.000004	n.d.	0.000001	n.d.	0.000002	n.d.	n.d.	n.d.	0.00777	0.000015	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
1040	0.000025	0.000004	n.d.	0.000006	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.00352	0.000014	n.d.	n.d.	0.000249
762	0.000243	0.000059	0.000009	0.000045	0.000008	0.000033	0.000008	0.000018	n.d.	0.000012	0.000002	0.000005	n.d.	0.00219	0.000216	n.d.	n.d.	n.d.	0.002509
1500	0.000029	0.000006	0.000001	0.000007	n.d.	0.000005	0.000001	0.000004	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	0.00564	0.000039	n.d.	n.d.	n.d.	0.000857
2149	0.000016	0.000005	n.d.	0.000005	n.d.	0.000003	n.d.	0.000001	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.00248	0.000036	n.d.	n.d.	n.d.	0.000682
1915	0.000035	0.000012	0.000002	0.000012	n.d.	0.000003	0.000002	0.000004	n.d.	0.000006	n.d.	0.000006	n.d.	0.00096	0.000100	n.d.	n.d.	0.000004	0.000903
2152	0.000047	0.000015	0.000002	0.000013	0.000003	0.000005	0.000002	0.000006	n.d.	0.000012	0.000003	0.000008	0.000002	0.00054	0.000096	n.d.	n.d.	0.000005	0.000644
1323	0.000057	0.000015	0.000003	0.000012	0.000002	0.000010	0.000002	0.000007	0.000002	0.000014	0.000002	0.000014	0.000003	0.00282	0.000062	n.d.	n.d.	0.000014	0.000488
1186	0.000024	0.000006	0.000003	0.000006	n.d.	0.000002	0.000002	0.000005	n.d.	0.000008	n.d.	0.000007	n.d.	n.d.	0.000251	n.d.	n.d.	n.d.	0.000425
1533	0.000008	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000001	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.00021	0.000033	n.d.	n.d.	n.d.	0.000342
1243	0.000024	0.000003	n.d.	0.000007	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	0.000003	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000083	n.d.	n.d.	n.d.	0.001795
2670	0.000015	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	0.000002	n.d.	0.000003	n.d.	0.00026	0.000351	n.d.	n.d.	n.d.	0.000324

Tabla 3.2 Resultados fisicoquímicos e isotópicos del agua subterránea en La Comarca Lagunera

POZO	Tl ppm	Pb ppm	Bi ppm	Th ppm	U ppm	$d^{18}O_{SMOW}$	dD_{SMOW}
Cementerio	0.000173	0.001387	0.000356	0.000029	0.037957	-6.49	-53.6
Calera	0.000243	0.000968	0.000039	0.000005	0.015041	-7.59	-58.3
Relleño	0.000039	0.003167	0.000216	0.000028	0.049746	-0.73	-28.3
808	0.000011	0.000472	0.000042	0.000003	0.004875	-7.28	-58.6
3089	n.d.	0.000473	n.d.	0.000012	0.000185	-9.04	-64.7
2002	0.000026	0.000291	0.000010	0.000007	0.006916	n.m.	n.m.
1198	0.000026	0.000156	n.d.	0.000003	0.003669	n.m.	n.m.
Desafío	0.000017	0.000312	0.000011	0.000032	0.001645	-8.42	-61.6
774	0.000008	0.000321	n.d.	0.000003	0.001849	n.m.	n.m.
El Carmen	0.000008	0.000225	n.d.	0.000001	0.003058	-7.42	-59.6
El Coyote	0.000029	0.000214	n.d.	0.000004	0.004607	n.m.	n.m.
Los Angeles	0.000040	0.000308	0.000027	0.000004	0.049543	-7.14	-57.2
247	0.000013	0.000698	0.000066	0.000006	0.015211	-5.15	-45.6
250	0.000011	0.000193	n.d.	0.000002	0.013465	-7.17	-55.7
3441	0.000016	0.000532	n.d.	0.000008	0.005918	-7.12	-58.8
342	0.000029	0.000406	n.d.	0.000002	0.009476	n.m.	n.m.
347	n.d.	0.000264	n.d.	0.000001	0.007383	-7.49	-58.9
2156	0.000682	0.000782	n.d.	0.000005	0.009029	-8.97	-64.9
214	0.000604	0.000369	n.d.	0.000002	0.006346	-9.16	-67.8
212	0.000736	0.000296	n.d.	0.000003	0.007963	-9.28	-66.3
190	0.000025	0.000270	n.d.	0.000009	0.012265	-8.76	-63.0
GP	0.000647	0.000328	n.d.	0.000002	0.003313	-9.55	-64.8
1612	0.000051	0.000170	0.000012	0.000003	0.011876	-9.38	-64.6
54	0.000027	0.006682	0.000018	0.000004	0.039735	n.m.	n.m.
Vergel	0.000020	0.002751	0.000019	0.000004	0.020402	-7.48	-54.8
1308	0.000011	0.000789	n.d.	0.000003	0.062885	-8.27	-59.4
1571	0.000076	0.000879	n.d.	0.000008	0.179240	n.m.	n.m.
554	0.001426	0.001527	n.d.	0.000006	0.004505	-7.40	-53.6
3749	n.d.	0.000443	n.d.	0.000001	0.003493	n.m.	n.m.
2745	0.000023	0.001135	n.d.	0.000004	0.003687	n.m.	n.m.
1722 ?	n.d.	0.001669	n.d.	0.000005	0.000202	-7.44	-56.1
Cepeda	0.000019	0.000567	n.d.	0.000007	0.006032	-9.07	-66.2
3035	0.000043	0.000548	n.d.	0.000004	0.012672	-9.32	-66.0
El Pilar	0.000039	0.000202	n.d.	0.000003	0.005714	n.m.	n.m.
608	0.000040	0.000711	0.000020	0.000004	0.004085	n.m.	n.m.
1579	0.000019	0.000444	n.d.	0.000004	0.005763	n.m.	n.m.
632	0.000016	0.000435	0.000010	0.000009	0.002451	-7.92	-59.1
963	0.000024	0.000679	n.d.	0.000003	0.006079	n.m.	n.m.
1624	0.000024	0.000449	n.d.	0.000004	0.004858	n.m.	n.m.
2345	0.000013	0.000163	n.d.	0.000005	0.002623	-7.59	-58.5
274	0.000010	0.000365	n.d.	0.000003	0.003792	n.m.	n.m.
1030	0.000035	0.000743	0.000024	0.000006	0.007248	-7.62	-60.4
581	0.000077	0.000247	n.d.	0.000006	0.019107	n.m.	n.m.
2760	0.000033	0.001344	0.000018	0.000009	0.006833	n.m.	n.m.
1477	0.000033	0.000406	n.d.	0.000007	0.005961	n.m.	n.m.
2510	0.000009	0.000404	n.d.	0.000007	0.011059	-9.14	-69.0
1992	0.000013	0.000177	n.d.	0.000003	0.010552	-8.67	-62.7
1041	0.000014	0.000284	n.d.	0.000007	0.002039	-7.99	-57.7
996	0.000010	0.000304	n.d.	0.000004	0.002203	-7.67	-57.1
1040	0.000014	0.000287	n.d.	0.000002	0.005337	-7.55	-57.4
762	0.000075	0.000670	n.d.	0.000033	0.029762	n.m.	n.m.
1500	0.000054	0.000311	n.d.	0.000007	0.004753	n.m.	n.m.
2149	0.000056	0.000165	n.d.	0.000003	0.005014	n.m.	n.m.
1915	0.000135	0.000399	n.d.	0.000004	0.006516	-8.52	-64.2
2152	0.000078	0.000452	n.d.	0.000007	0.021522	-7.58	-60.5
1323	0.000042	0.000261	0.000015	0.000004	0.022003	-7.35	-58.2
1186	0.000093	0.000258	n.d.	0.000003	0.018845	n.m.	n.m.
1533	0.000007	0.000129	n.d.	0.000001	0.001736	-5.74	-58.1
1243	0.000226	0.000294	n.d.	0.000003	0.004779	-6.7	-65.1
2670	0.000035	0.000390	n.d.	0.000002	0.003796	n.m.	n.m.

Tabla 3.3 Balance iónico

POZO	HCO3 (meq/l)	CO3 (meq/l)	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	NO3 (meq/l)	NO2 (meq/l)	PO4 (meq/l)	F (meq/l)	Na (meq/l)	K (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Cationes meq/l	Aniones meq/l	ERROR %
Cementerio	2.787	0.000	3.760	74.955	0.400	0.002	0.022	0.041	60.917	0.982	21.457	2.641	85.996	81.966	2.40
Calera	2.944	0.000	3.431	34.354	0.857	0.000	0.009	0.023	22.610	0.225	12.498	3.471	38.804	41.619	-3.50
Relleno	3.786	0.304	17.719	88.489	0.214	0.001	0.009	0.207	76.146	0.772	26.652	4.001	107.571	110.728	-1.45
808	2.366	0.000	0.423	1.299	0.200	0.000	0.004	0.013	2.375	0.061	1.657	0.460	4.553	4.305	2.80
3089	2.156	0.000	12.455	56.216	0.071	0.000	0.016	0.108	32.691	0.317	28.384	3.621	65.013	71.023	-4.42
2002	2.314	0.000	0.517	9.630	0.114	0.001	0.018	0.045	5.688	0.125	2.485	1.510	9.808	12.638	-12.61
1198	3.102	0.000	0.893	5.518	0.150	0.002	0.010	0.049	4.983	0.115	1.581	1.060	7.738	9.723	-11.37
Desafio	2.431	0.000	0.329	1.541	0.079	0.000	0.016	0.081	4.075	0.041	0.452	0.377	4.945	4.477	4.97
774	2.588	0.000	0.376	0.625	0.150	0.000	0.016	0.025	1.339	0.066	2.485	0.309	4.199	3.780	5.26
El Carmen	2.292	0.000	0.141	1.291	0.093	0.000	0.004	0.023	2.144	0.072	1.732	0.300	4.247	3.844	4.97
El Coyote	1.998	0.000	1.222	14.571	0.079	0.000	0.004	0.014	1.806	0.166	17.465	0.450	19.887	17.889	5.29
Angeles	5.573	0.000	2.445	22.766	1.899	0.000	0.009	0.027	14.256	0.202	16.178	2.490	33.126	32.721	0.62
247	4.578	0.000	3.010	27.067	1.064	0.001	0.005	0.015	4.322	0.312	21.156	3.471	29.261	35.739	-9.97
250	4.469	0.000	2.248	8.589	0.428	0.000	0.003	0.016	2.931	0.184	10.841	1.960	15.916	15.753	0.52
3441	4.049	0.000	0.846	2.707	0.393	0.000	0.003	0.016	1.959	0.120	4.471	0.959	7.510	8.013	-3.24
342	7.256	0.000	4.985	0.521	0.107	0.000	0.005	0.014	2.653	0.166	8.862	1.760	13.442	12.888	2.11
347	4.995	0.000	0.282	1.457	0.293	0.000	0.005	0.015	2.514	0.120	2.555	0.959	6.149	7.048	-6.81
2156	3.397	0.000	1.034	10.150	0.435	0.000	0.004	0.050	3.162	0.102	6.627	4.241	14.132	15.071	-3.21
214	4.379	0.000	0.423	5.127	0.371	0.000	0.006	0.047	3.061	0.090	4.790	3.361	11.302	10.354	4.38
212	3.782	0.000	0.611	5.205	0.314	0.001	0.002	0.053	1.589	0.097	5.988	4.241	11.915	9.968	8.90
190	2.944	0.304	1.552	9.109	0.100	0.000	0.006	0.098	3.440	0.105	6.307	3.120	12.972	14.113	-4.21
GP	3.943	0.000	0.188	1.520	0.314	0.001	0.005	0.047	0.802	0.061	3.593	2.160	6.616	6.018	4.74
1612	2.469	0.000	4.609	16.657	1.663	0.000	0.009	0.038	8.024	0.166	11.577	4.481	24.247	25.445	-2.41
54	2.892	0.000	5.596	35.259	0.799	0.000	0.009	0.041	13.606	0.220	20.279	8.562	42.667	44.596	-2.21
Vergel	3.207	0.000	2.257	14.441	1.385	0.000	0.004	0.026	3.021	0.166	14.291	5.201	22.680	21.321	3.09
1308	2.314	0.000	5.361	20.688	1.356	0.001	0.006	0.090	7.693	0.192	17.375	6.752	32.012	29.814	3.56
1571	2.681	0.000	3.574	37.348	0.857	0.001	0.003	0.078	19.899	0.166	20.210	7.662	47.936	44.542	3.67
554	2.419	0.000	2.915	49.840	0.071	0.000	0.019	0.131	11.725	0.414	29.940	12.003	54.083	55.396	-1.20
3749	4.379	0.000	0.564	5.197	0.664	0.000	0.009	0.034	3.572	0.107	4.242	3.751	11.671	10.847	3.66
2745	2.345	0.000	3.245	41.575	0.678	0.000	0.011	0.041	11.255	0.391	26.607	9.592	47.845	47.895	-0.05
1722 ?	2.524	0.000	2.963	39.486	0.128	0.000	0.018	0.145	10.335	0.435	27.784	6.007	44.561	45.264	-0.78
Cepeda	2.261	0.000	0.329	9.105	0.043	0.000	0.021	0.166	7.553	0.051	3.752	1.200	12.557	11.925	2.58
3035	2.314	0.000	3.669	18.669	0.079	0.001	0.023	0.143	16.807	0.069	7.745	2.001	26.622	24.897	3.35
El Pilar	1.756	0.000	2.116	18.669	0.029	0.000	0.011	0.135	17.278	0.072	6.707	1.040	25.096	22.717	4.98
608	0.841	0.000	3.762	16.590	0.093	0.000	0.008	0.078	7.213	0.077	13.493	1.120	21.903	21.373	1.23
1579	1.682	0.000	0.564	5.717	0.036	0.000	0.011	0.106	2.781	0.043	3.752	1.680	8.258	8.116	0.86
632	1.998	0.000	0.282	2.029	0.100	0.000	0.006	0.089	3.021	0.028	1.038	0.875	4.962	4.505	4.83
963	2.051	0.000	0.517	4.577	0.307	0.000	0.005	0.039	3.251	0.056	3.194	1.280	7.781	7.496	1.86
1624	2.051	0.000	2.022	7.026	1.049	0.001	0.001	0.021	3.061	0.118	7.345	2.001	12.525	12.171	1.43
2345	2.389	0.000	0.282	1.139	0.357	0.000	0.006	0.035	2.281	0.054	1.437	0.720	4.492	4.208	3.26
274	2.588	0.000	0.988	3.848	0.200	0.000	0.004	0.024	2.001	0.097	4.790	1.600	8.488	7.652	5.18
1030	1.577	0.000	5.831	38.517	0.221	0.002	0.004	0.038	25.601	0.207	16.048	4.081	45.937	46.191	-0.28
581	1.893	0.000	1.317	41.575	0.093	0.001	0.005	0.041	24.681	0.141	14.371	7.282	46.475	44.924	1.70
2760	2.051	0.000	2.163	38.237	0.157	0.000	0.003	0.035	21.440	0.271	18.922	6.001	46.634	42.645	4.47
1477	2.282	0.000	3.997	46.842	1.128	0.000	0.006	0.077	12.185	0.476	28.104	15.044	55.809	54.332	1.34
2510	3.039	0.304	0.329	5.177	0.143	0.000	0.014	0.015	6.183	0.056	0.399	0.239	6.878	9.022	-13.49
1992	2.431	0.304	0.282	6.866	0.464	0.000	0.008	0.018	7.203	0.033	1.357	0.319	8.913	10.373	-7.57
1041	2.127	0.000	0.094	2.335	0.093	0.000	0.004	0.024	3.502	0.046	0.399	0.080	4.027	4.678	-7.48
996	1.998	0.304	0.188	1.869	0.107	0.001	0.003	0.030	3.251	0.049	0.559	0.560	4.418	4.500	-0.91
1040	1.998	0.000	0.188	2.698	0.164	0.002	0.005	0.050	3.101	0.041	1.517	0.319	4.979	5.105	-1.26
762	2.314	0.000	3.809	37.478	0.250	0.003	0.003	0.061	26.402	0.161	18.922	1.920	47.405	43.915	3.82
1500	0.736	0.000	1.364	22.986	0.178	0.001	0.003	0.045	7.703	0.110	15.649	0.959	24.422	25.315	-1.80
2149	0.999	0.000	0.846	16.530	1.156	0.001	0.005	0.058	6.233	0.125	12.615	1.280	20.252	19.596	1.65
1915	1.314	0.000	10.863	49.970	1.299	0.000	0.004	0.071	30.554	0.240	28.743	0.160	59.696	63.522	-3.10
2152	2.261	0.000	1.552	56.966	0.293	0.001	0.003	0.051	25.651	0.233	25.629	7.041	58.554	61.125	-2.15
1323	2.734	0.000	1.505	39.556	0.350	0.002	0.006	0.041	11.555	0.064	26.986	7.522	46.127	44.194	2.14
1186	3.103	0.000	10.816	35.389	0.214	0.000	0.003	0.052	23.050	0.522	16.766	9.282	49.621	49.577	0.04
1533	1.840	0.000	0.564	3.738	0.086	0.000	0.002	0.075	3.001	0.095	2.874	0.959	6.930	6.305	4.72
1243	3.260	0.000	1.599	7.286	1.113	0.000	0.002	0.076	2.501	0.161	5.589	4.401	12.652	13.337	-2.63
2670	1.823	0.000	7.806	18.739	0.757	0.000	0.003	0.059	13.556	0.307	6.786	4.321	24.970	29.188	-7.79

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo primeramente se presentará la caracterización hidrogeoquímica, que tiene como finalidad describir la distribución espacial de: 1) la composición química del agua subterránea considerando tanto iones principales como la concentración de arsénico, por tratarse de un parámetro de especial relevancia en el acuífero en estudio, debido a las altas concentraciones que se han encontrado en el agua subterránea; 2) algunos parámetros que se consideran relevantes para entender el comportamiento hidrogeoquímico de la zona de estudio, como la concentración de sólidos totales disueltos, temperatura, pH y oxígeno disuelto.

Posteriormente se efectuará una clasificación hidrogeoquímica, con base en los resultados de la caracterización hidrogeoquímica y su relación con la geología del subsuelo y el contexto hidrogeológico. En esta clasificación se agrupan las muestras de agua subterránea, de acuerdo a características físicas y químicas similares, siguiendo criterios hidrogeoquímicos e hidrogeológicos. Para definir la clasificación se emplearán distintos diagramas que permiten visualizar el comportamiento de la composición química del agua subterránea, como diagramas de Stiff, de Piper y diversas relaciones X-Y. Criterios importantes para la clasificación, además del comportamiento de los iones principales, serán la concentración de sólidos totales disueltos, de litio, arsénico, pH, temperatura y contenido de oxígeno disuelto. El objetivo de dicha clasificación es estudiar grupos de agua, en vez de muestras aisladas, para la identificación de procesos hidrogeoquímicos.

Finalmente se describirán algunos de los procesos más relevantes que condicionan la composición química e isotópica del agua subterránea en la zona de estudio. Para lo cual se empleará adicionalmente al análisis de diferentes diagramas y gráficas, la modelación hidrogeoquímica, con la finalidad de calcular índices de saturación con respecto a distintos minerales que permitan evidenciar la existencia de diferentes procesos. Adicionalmente se efectuará modelación hidrogeoquímica inversa para verificar y cuantificar la magnitud en la que ocurren los procesos geoquímicos identificados.

Debido a que en la zona de estudio tienen lugar distintos procesos geoquímicas que condicionan la composición química del agua, el marco teórico que los respalda sería muy amplio, por lo que se consideró mejor remitir al lector a fuentes originales.

4.1 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

4.1.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS

La concentración de sólidos totales disueltos en el agua subterránea de la zona de estudio varía de 168 a 5370 mg/l, con un valor promedio de aproximadamente 1200 mg/l. La distribución horizontal de la concentración de sólidos totales disueltos en el agua subterránea se presenta en la Figura 4.1.

La concentración de sólidos totales disueltos es menor a 500 mg/l en la región central de la zona de estudio, al norte y occidente de Francisco I. Madero, y al noreste de Torreón, aproximadamente a lo largo de los cauces de los ríos Nazas y Aguanaval. Así mismo en las estribaciones de la Sierra El Sarnoso la salinidad del agua subterránea es de aproximadamente 500 mg/l. Esta distribución espacial del agua de baja salinidad permite corroborar que la recarga del agua subterránea ocurre a partir de los cauces de los ríos, y parcialmente de las sierras del occidente.

La concentración de sólidos totales disueltos se incrementa hacia el oriente, en dirección a las exlagunas de Mayrán y Viesca. En las inmediaciones de San Pedro de las Colonias la concentración de sólidos totales disueltos alcanza los 5370 mg/l.

En el extremo noroeste de la zona de estudio, al norte de Bermejillo y en el extremo sureste, al norte de Viesca, ambas zonas asociadas a afloramientos calcáreos, las concentraciones de sólidos totales disueltos son mayores a 2000 mg/l, por lo que representan sistemas de flujo con un largo recorrido en el subsuelo a través del medio calcáreo.

Al oriente de la ciudad de Torreón en las muestras que corresponden al Relleno Sanitario y al Cementerio las concentraciones de sólidos totales disueltos son mayores a 2000 mg/l, debido a la influencia de contaminación antropogénica y al efecto de evaporación ocurrido en la superficie.

Las direcciones de flujo que se infieren a partir de datos piezométricos actuales sugieren la presencia de flujo subterráneo desde las sierras del occidente en dirección a los conos de abatimiento en el centro de la cuenca endorreica cerca de Gómez Palacio, en la región de Finisterre al norte, y en la de Matamoros al sur. Sin embargo la distribución de la concentración de sólidos totales disueltos sugiere que la dirección de flujo subterráneo ocurre en términos generales del occidente hacia el oriente, hacia la región de las exlagunas de Mayrán y Viesca. De este modo, la configuración de las concentraciones de sólidos totales disueltos parece representar en forma general las condiciones de flujo previas a la extracción intensiva de agua subterránea, cuando los sistemas de flujo subterráneo más importantes descargaban en forma natural en la región de las

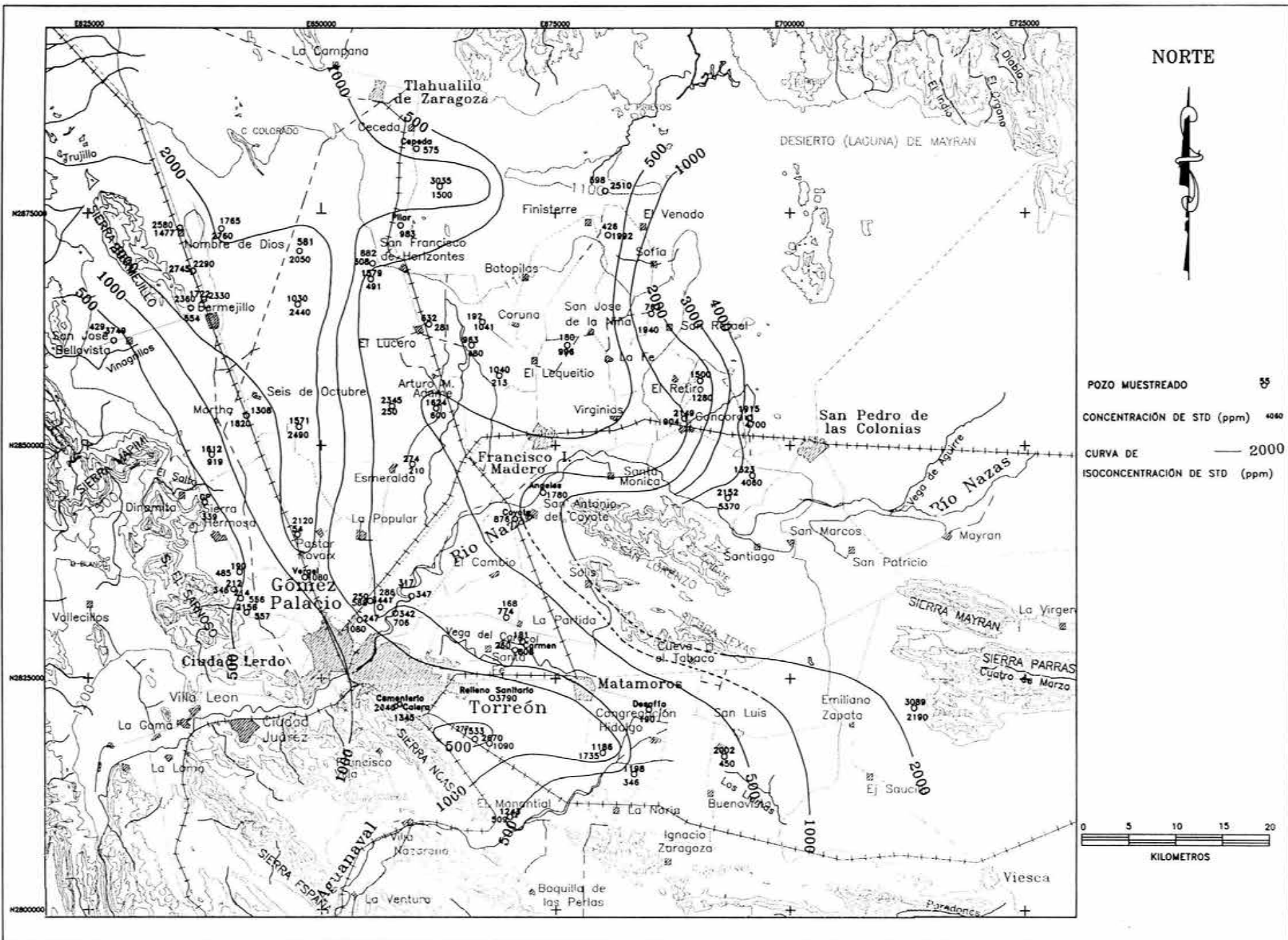


Figura 4.1 Concentración de Sólidos Totales Disueltos en el agua subterránea (mg/l)

lagunas de Mayrán y Viesca, ubicadas al oriente del área analizada y región que coincide con la zona donde se detectan algunas de las mayores concentraciones de sólidos totales disueltos.

4.1.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El valor promedio de la temperatura del agua subterránea medida a la descarga de los pozos es del orden de 28° C, sin embargo ésta varía de 23.4 a 42.5°C; las muestras tomadas en zonas de descarga en el Cementerio y El Relleno Sanitario tienen 15.7 y 20.3 °C, respectivamente, pero estos valores deben estar influenciados por la temperatura ambiental, que por la época del año en la que se realizó el muestreo eran bajas.

En la Figura 4.2 se presenta la distribución espacial de la temperatura del agua subterránea medida a la descarga en la zona de estudio. En dicha figura se observa que las menores temperaturas, de aproximadamente 25°C ocurren al norte de la zona conurbada Torreón-Lerdo y Gómez Palacio a lo largo del Río Nazas y en la zona sur adyacente al Río Aguanaval y en el área norte de la zona de estudio. En general el agua con temperaturas del orden de 25°C representa sistemas de flujo someros que se caracterizan por su reciente infiltración a partir de los cauces de los Ríos.

La mayor temperatura medida, 42.5° C se presenta en el pozo 3089, localizado en el extremo sureste, en el afloramiento de calizas al norte de Viesca. En la zona noroeste, al norte de Bermejillo, la temperatura es de 39°C; estas muestras representan sistemas de flujo profundos que circulan a través de rocas calcáreas.

En las inmediaciones del Intrusivo El Sarnoso la temperatura del agua subterránea alcanza valores cercanos a los 32°C, por representar un sistema de flujo que circula a mayor profundidad, en el que se muestra la influencia de las rocas intrusivas, en las que el decaimiento de elementos radiactivos puede producir un calor adicional al flujo térmico natural.

Al oriente de Matamoros, hacia la exlaguna de Viesca, la temperatura es mayor a 33°C, del mismo modo al norte de Francisco I. Madero, del poblado El Lucero a San José de la Niña la temperatura varía de 30.6 a 32.7 °C. Estas zonas en las que la temperatura es mayor a 30°C asociadas al agua subterránea que circula en el medio granular, corresponden a zonas en las que el nivel de saturación del agua subterránea se localiza más profundo, de 80 a 100 m de profundidad, debido a los conos de abatimiento generados por la extracción del agua subterránea. Ello permite inferir que se trata de sistemas de flujo con mayor profundidad de circulación que son inducidos por los pozos de bombeo.

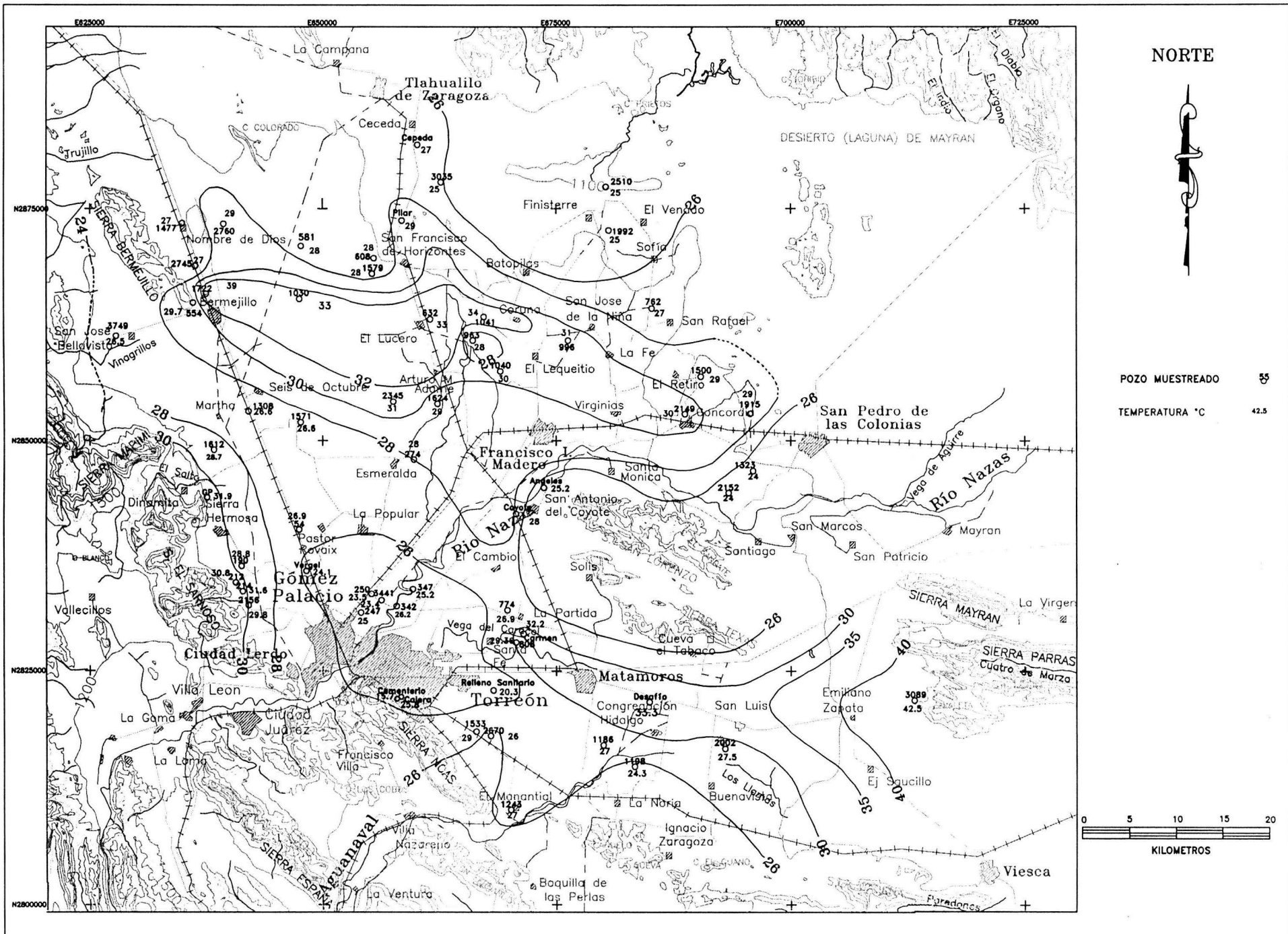


Figura 4.2 Distribución espacial de la temperatura del agua subterránea

4.1.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL pH

El pH varía de 6.46 a 8.56, con un valor promedio de 7.41. En la figura 4.3 se observa la distribución espacial del pH del agua subterránea.

Los valores de pH menores a 7 se presentan al norte de la zona conurbada Torreón-Lerdo Gómez Palacio cerca del río Nazas, correspondiente con agua de reciente infiltración; así mismo muestras asociadas a calizas en el extremo noroeste en la zona de Bermejillo y al norte de la exlaguna de Viesca presentan valores de pH menores a 7.

El agua subterránea con pH mayor a 8 se presenta en el área norte de la zona de estudio, entre los poblados Finisterre, El Lucero y San José de La Niña, así como al sur en la zona de Matamoros. Estas zonas geológicamente se caracterizan por ser altamente arcillosas debido al ambiente lacustre y de planicie de inundación que les dio origen a los sedimentos de esta porción del acuífero. Estas zonas corresponden a las mayores profundidades al nivel de saturación.

El agua subterránea que aflora en el Cementerio y el Relleno Sanitario de Torreón presenta pH mayor a 8, probablemente como consecuencia del efecto antropogénico.

4.1.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO

El oxígeno disuelto en el agua subterránea varía de 8.3 a 0 mg/l. En la figura 4.4 se observa la distribución espacial de su concentración en la zona de estudio.

El agua subterránea en amplias áreas de la zona de estudio se caracteriza por ser anóxica, ya que la concentración de oxígeno disuelto medida es cero mg/l. Ello ocurre al oriente de Matamoros hasta la exlaguna de Viesca, al norte de Francisco I. Madero, desde los poblados El Lucero, Finisterre, y hasta San Pedro de Las Colonias, así como al noreste de Bermejillo.

Las mayores concentraciones de oxígeno disuelto se presentan al norte de la zona conurbada Gómez Palacio Torreón, en las cercanías del Río Nazas y en un área desde El poblado Esmeralda hasta San Antonio del Coyote. Así como en las estribaciones de la Sierra El Sarnoso, indicando su cercanía con la zona de recarga.

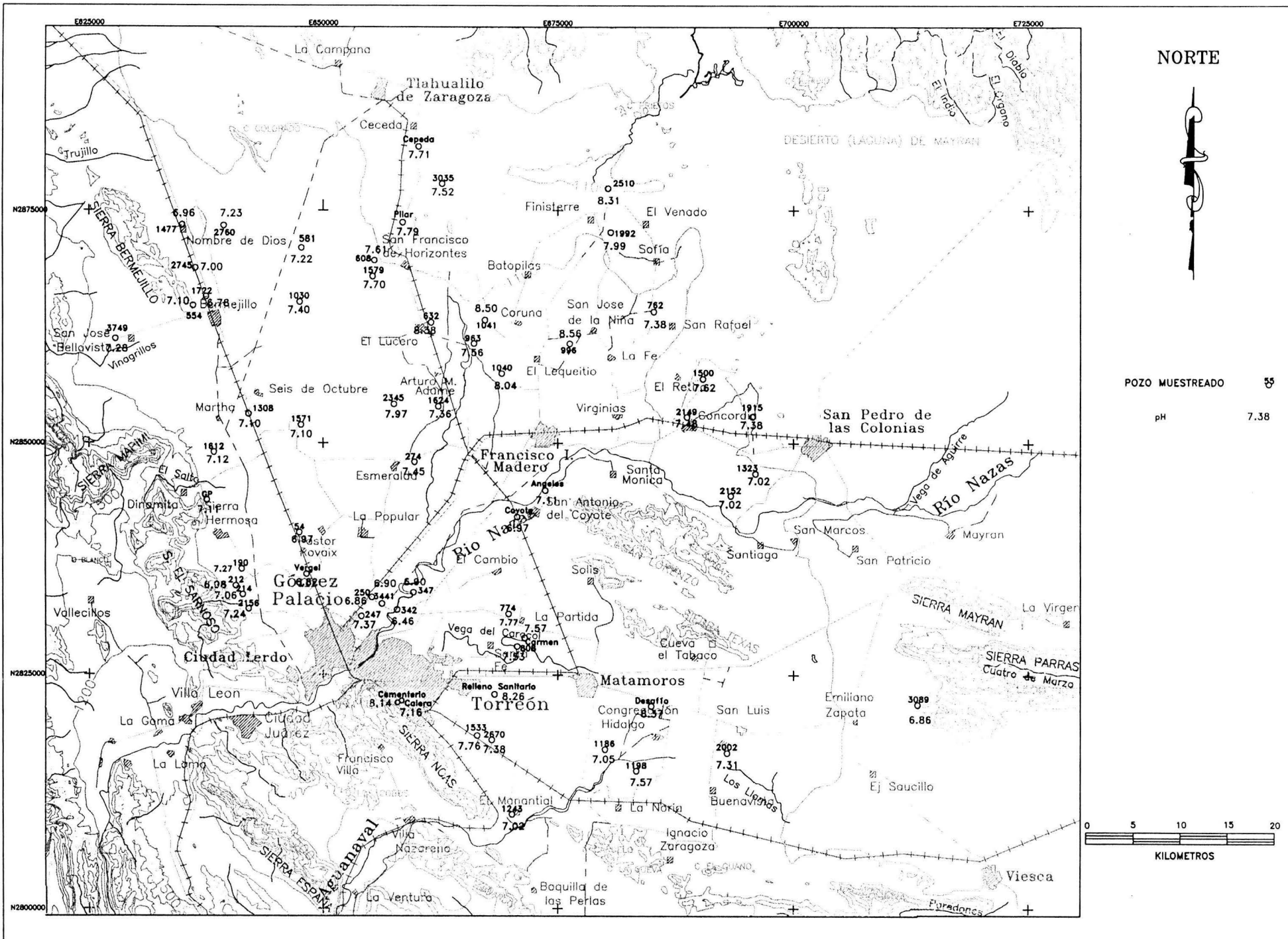


Figura 4.3 Distribución espacial del pH del agua subterránea

4.1.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

En la Figura 4.5 se presenta la distribución espacial de los diagramas de Stiff para las muestras de agua subterránea tomadas en la zona de estudio. Este tipo de diagramas, permite representar la composición de las muestras de agua subterránea, de acuerdo con las concentraciones de los iones principales, en el lado derecho se observan las concentraciones de aniones y a la izquierda la de cationes. Con base en la forma de los diagramas de Stiff es posible distinguir en forma relativamente simple las características principales del agua subterránea, así como establecer grupos de agua con características hidroquímicas similares. Una primera vista de los diagramas permite corroborar la diversidad en la salinidad de las muestras analizadas, así como observar que la composición química del agua subterránea varía considerablemente en la zona de estudio.

La elevada concentración de sulfato para un gran porcentaje de muestras en la zona de estudio, puede observarse en los diagramas de Stiff de las muestras al sur de Tlahualilo, en la porción noroeste en las inmediaciones de Bermejillo y a lo largo de la carretera federal que une esta población con la ciudad de Torreón; además se identifican en la porción oriental de la zona de estudio, entre Francisco I. Madero y San Pedro de las Colonias, al norte de Viesca y en la zona conurbada de Torreón.

Las muestras con mayor salinidad se observan adyacentes a las sierras calcáreas, al noroeste en la zona de Bermejillo, al este de San Pedro de las Colonias, al norte de Viesca y al norte de la Sierra Las Noas dentro de la ciudad de Torreón. Todas estas muestras se caracterizan por tener muy altas concentraciones de sulfato y bajas concentraciones de bicarbonato y cloruro. De estas muestras, las que se localizan al oriente de la zona de estudio y al este de Bermejillo presentan elevadas concentraciones tanto de sodio como de calcio, y bajas concentraciones de magnesio, mientras que al noroeste de Bermejillo, las muestras tienen elevadas concentraciones de calcio, y menores concentraciones de sodio y magnesio.

En forma contrastante, diagramas que muestran una baja salinidad y cuyo anión de mayor concentración es el bicarbonato predominan cerca del Río Nazas, al norte y noreste de la ciudad de Torreón. En los alrededores del Río Aguanaval, al suroeste de Matamoros así como al noroeste de Francisco I. Madero y en los alrededores de Finisterre el agua subterránea presenta baja salinidad pero el sulfato es el anión dominante. En las zonas de Finisterre, Matamoros y en algunas de las muestras al norte de Francisco I. Madero el sodio es el catión dominante.

Las muestras que se localizan en las estribaciones de la Sierra El Sarnoso presentan al calcio como catión dominante y al bicarbonato y sulfato como aniones principales. La muestra denominada GP, que representa al medio calcáreo es bicarbonatada y el calcio y magnesio son los cationes dominantes.

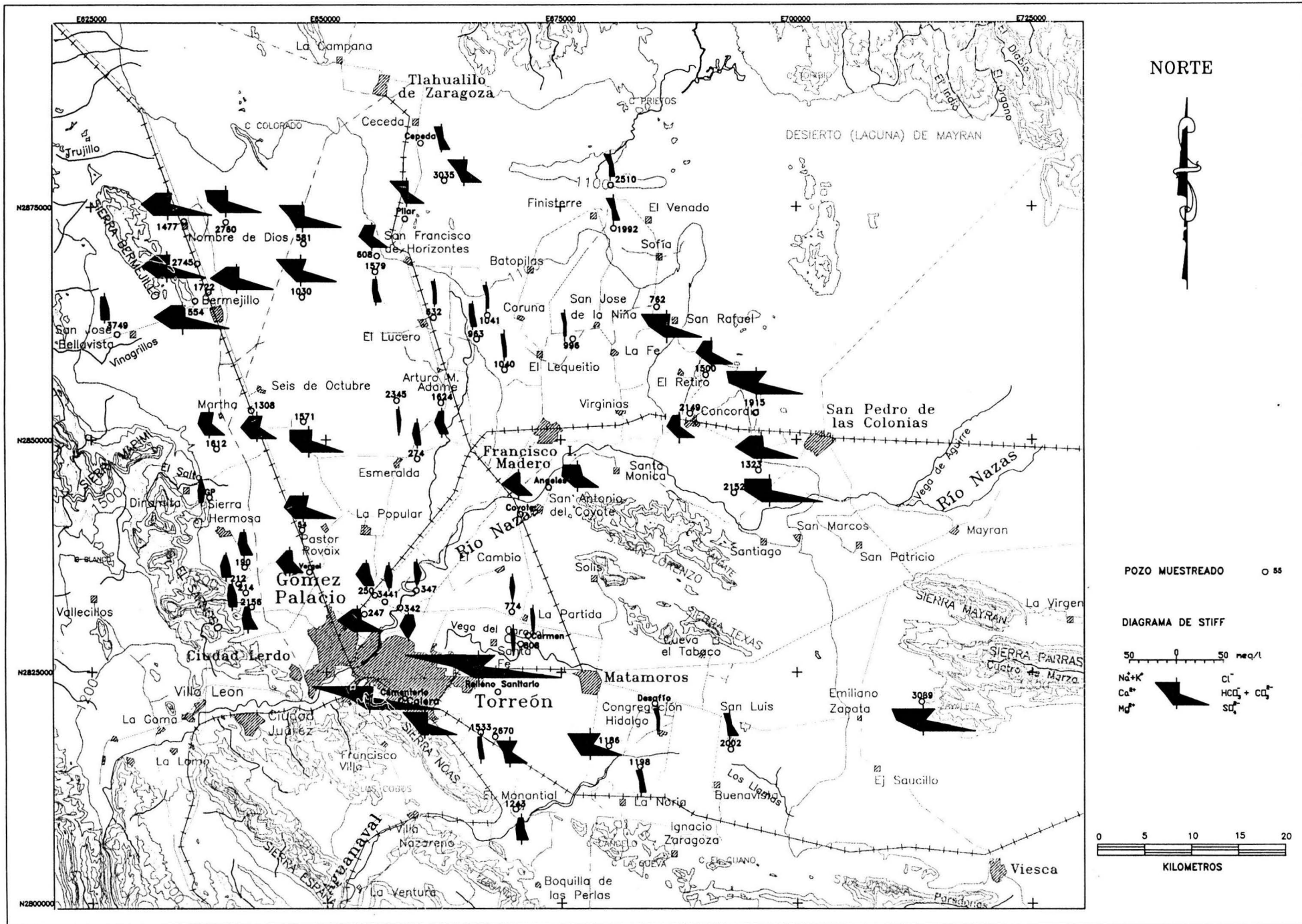


Figura 4.5 Diagramas de Stiff

4.1.6 FAMILIAS DE AGUA DE ACUERDO AL ION DOMINANTE

Con base en la distribución de las muestras en el diagrama de Piper (Figura 4.6), se identificó la existencia de diversas familias de agua con base en el criterio de ion dominante. En la tabla 4.1 se indica la familia de agua por ion dominante a la que pertenece cada una de las muestras de agua subterránea de la zona de estudio. En el diagrama de Piper pudo corroborarse el comportamiento de los iones principales, identificados mediante los diagramas de Stiff.

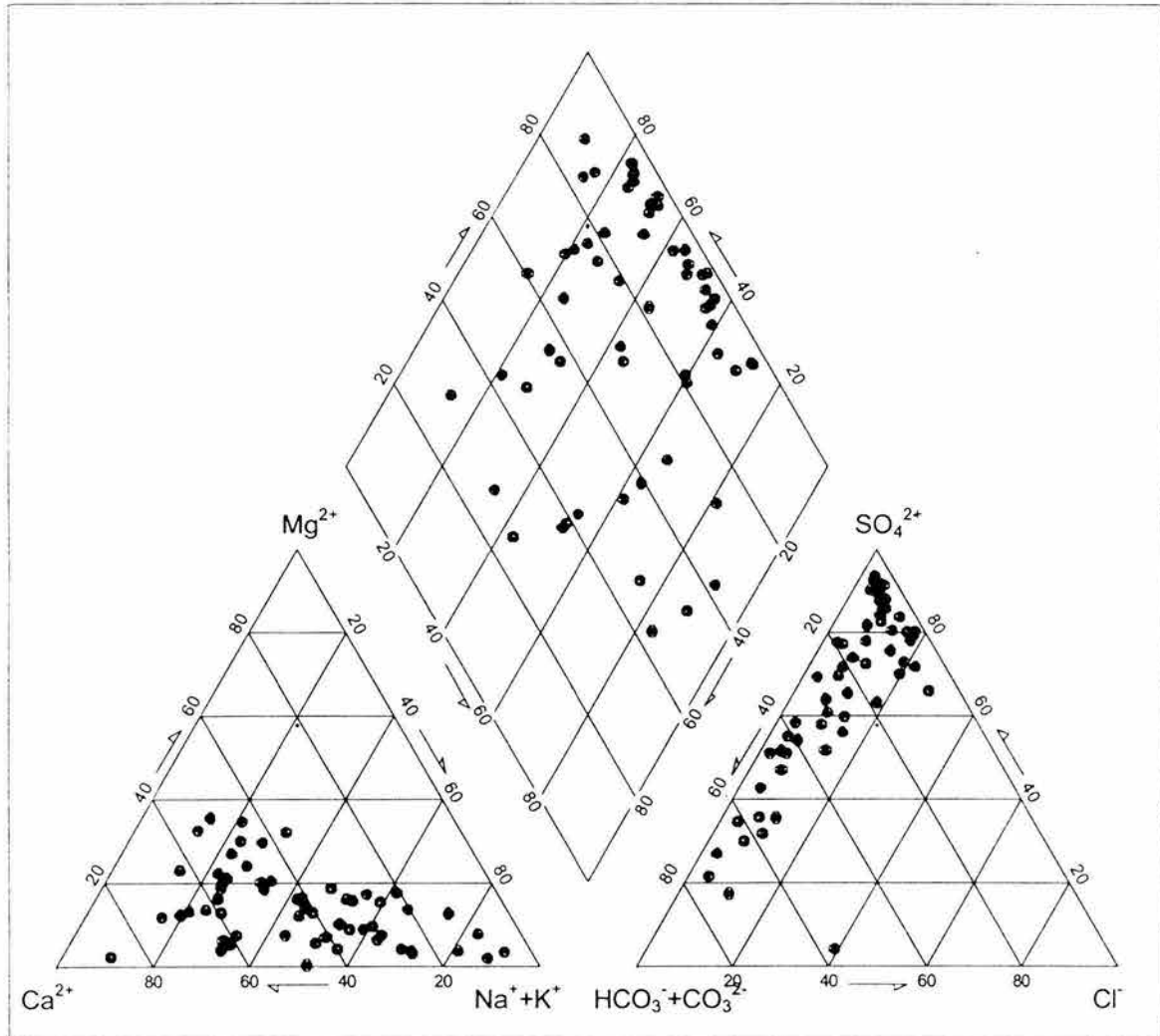
La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el agua subterránea es una característica importante en la Comarca Lagunera, tal como lo indica el hecho de que el 85 % de las muestras pertenecen a familias de agua en las que predomina esta especie. Esta característica hidrogeoquímica es consecuencia de las condiciones geológicas de la región, pues como se estableció en el marco geológico de referencia, las rocas sedimentarias del Mesozoico que afloran y se encuentran en el subsuelo de la región contienen cantidades variables de yeso y anhidrita; debido a los procesos de intemperismo que originaron los sedimentos que rellenan la cuenca, el yeso y la anhidrita forman parte del material granular en el subsuelo.

Al norte de Francisco I. Madero predomina el agua sódica-sulfatada, aunque al oeste de San Pedro de las Colonias se presentan algunas muestras de tipo cálcico-sulfatada. A lo largo de la carretera federal Torreón-Bermejillo existen algunas muestras de agua agrupadas en las familias cálcica-sulfatada y mixta-sulfatada; considerando las profundidades de los pozos y su relación con el espesor del material granular, las muestras correspondientes a la familia cálcica-sulfatada representan agua subterránea con mayor influencia de las rocas sedimentarias calcáreas, mientras que la familia mixta-sulfatada se relaciona con agua subterránea derivada en mayor proporción del material granular y con menor influencia de las rocas calcáreas.

Considerando la distribución espacial de las muestras, se observa que el agua bicarbonatada se presenta al noreste y oriente de la zona conurbada de Torreón, en parte coincidiendo con el curso del río Nazas. De acuerdo con Brouste *et al* (1997) la composición química del agua superficial del río Nazas es de tipo bicarbonatada-cálcica, lo que justifica la distribución espacial definida para esta familia. El agua bicarbonatada, en términos generales presenta menores concentraciones de sólidos totales disueltos.

Las diferencias en la composición del agua subterránea sugieren la presencia de distintos medios geológicos con características hidrogeoquímicas e hidrogeológicas diferentes, así como distintos sistemas de flujo subterráneo.

Figura 4.6 Diagrama de Piper



4.1.7 DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

En la figura 4.7 se observa la distribución espacial del arsénico total disuelto en el agua subterránea. Las zonas que presentan concentraciones mayores al máximo permisible para consumo humano son muy amplias en la zona de estudio y en general coinciden con las establecidas en estudios previos.

Las mayores concentraciones de arsénico se localizan en la zona norte, donde alcanzan valores de hasta 718 ppb en la zona de Finisterre, 470 ppb en las cercanías de Tlahualilo y 547 ppb al norte de Bermejillo; al oriente de San Pedro de las Colonias las concentraciones alcanzan valores de 260 ppb. En la porción sur de la zona de estudio, al oriente de Matamoros el arsénico disuelto es de hasta 288 ppb, y al norte de la exlaguna de Viesca es de 240 ppb.

Las menores concentraciones de arsénico se localizan al norte de la zona conurbada, adyacente al Río Nazas, donde las concentraciones varían de 4.7 a 33 ppb.

Las zonas que rebasan la concentración de 50 ppb de arsénico se localizan en la porción norte del área de estudio, hacia Bermejillo, Tlahualilo, Finisterre, al norte de Francisco I. Madero, San Pedro de las Colonias; en la región al oriente de Torreón, Matamoros y la laguna de Viesca. Las concentraciones de arsénico menores a 50 ppb se limitan a la zona localizada al norte de Torreón y al noroeste de Gómez Palacio.

No existe un patrón geográfico en la concentración del arsénico que se relacione directamente con alguno de los parámetros analizados, por lo que se infiere que el comportamiento geoquímico del arsénico en la zona de estudio es complicado y sus altas concentraciones en el agua subterránea se deben a diversos procesos y controles hidrogeoquímicos y posiblemente a diferentes fuentes. La evidencia de zonas en las que la temperatura es menor a 25°C y la concentración de sólidos totales disueltos es menor a 1000 mg/l, pero las concentraciones de arsénico son muy elevadas, permite desechar la hipótesis de que el origen del arsénico se debe únicamente al hidrotermalismo, tal como lo concluye el estudio del IMTA (1991).

Las mayores concentraciones de arsénico se localizan en la zona norte, donde alcanzan valores de hasta 718 ppb en la zona de Finisterre, 470 ppb en las cercanías de Tlahualilo y 547 ppb al norte de Bermejillo; al oriente de San Pedro de las Colonias las concentraciones

Tabla 4.1 Familias de agua definidas con el criterio de ion dominante

FAMILIA		MUESTRA		
Bicarbonatada	Cálcica	GP		
		342 3441 774		
	Mixta	347		
	Sódica	2345 808 El Carmen Desafío 996		
Mixta	Sódica	632		
Sulfatada	Cálcica	212 274 250 Coyote Vergel 247 1500 2149 1624 608 1308 1477 554 2745 1722 1323		
		Mixta	214 190 3749 963 1533 1579 1243 2156 1612 Angeles 2760 1571 2152 54 1186	
			Sódica	2510 1992 1041 1040 Cepeda 2002 1198 3089 1915 581 3035 1030 2670 Calera Pilar 762 Cementerio El Carmen Relleno Sanitario

alcanzan valores de 260 ppb. En la porción sur de la zona de estudio, al oriente de Matamoros el arsénico disuelto es de hasta 288 ppb, y al norte de la exlaguna de Viesca es de 240 ppb.

Las menores concentraciones de arsénico se localizan al norte de la zona conurbada, adyacente al Río Nazas, donde las concentraciones varían de 4.7 a 33 ppb.

Las zonas que rebasan la concentración de 50 ppb de arsénico se localizan en la porción norte del área de estudio, hacia Bermejillo, Tlahualilo, Finisterre, al norte de Francisco I. Madero, San Pedro de las Colonias; en la región al oriente de Torreón, Matamoros y la laguna de Viesca. Las concentraciones de arsénico menores a 50 ppb se limitan a la zona localizada al norte de Torreón y al noroeste de Gómez Palacio.

No existe un patrón geográfico en la concentración del arsénico que se relacione directamente con alguno de los parámetros analizados, por lo que se infiere que el comportamiento geoquímico del arsénico en la zona de estudio es complicado y sus altas concentraciones en el agua subterránea se deben a diversos procesos y controles hidrogeoquímicos y posiblemente a diferentes fuentes.

La evidencia de zonas en las que la temperatura es menor a 25°C y la concentración de sólidos totales disueltos es menor a 1000 mg/l , pero las concentraciones de arsénico son muy elevadas, permite desechar la hipótesis de que el origen del arsénico se debe únicamente al hidrotermalismo, tal como lo concluye el estudio del IMTA (1991).

4.2 CLASIFICACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Se efectuó una clasificación hidrogeoquímica de acuerdo a las características químicas y físicas del agua subterránea. Para ello se emplearon distintos diagramas que permiten visualizar el comportamiento hidrogeoquímico como diagramas de Stiff, de Piper y diversas relaciones X-Y. Fue importante considerar la distribución espacial de las muestras para poder relacionarlas con la geología del subsuelo y el contexto hidrogeológico.

En la tabla 4.2 se presenta el resultado de la clasificación hidrogeoquímica, indicando las muestras que corresponden a los distintos grupos identificados. En el mapa de la figura 4.8 se observa la distribución de la clasificación hidrogeoquímica, a través de los diagramas de Stiff representados con un color distinto para cada uno de los grupos de agua identificados. Del mismo modo en la figura 4.9 se representan en el Diagrama de Piper los distintos grupos de agua empleando una simbología diferente para cada uno de ellos.

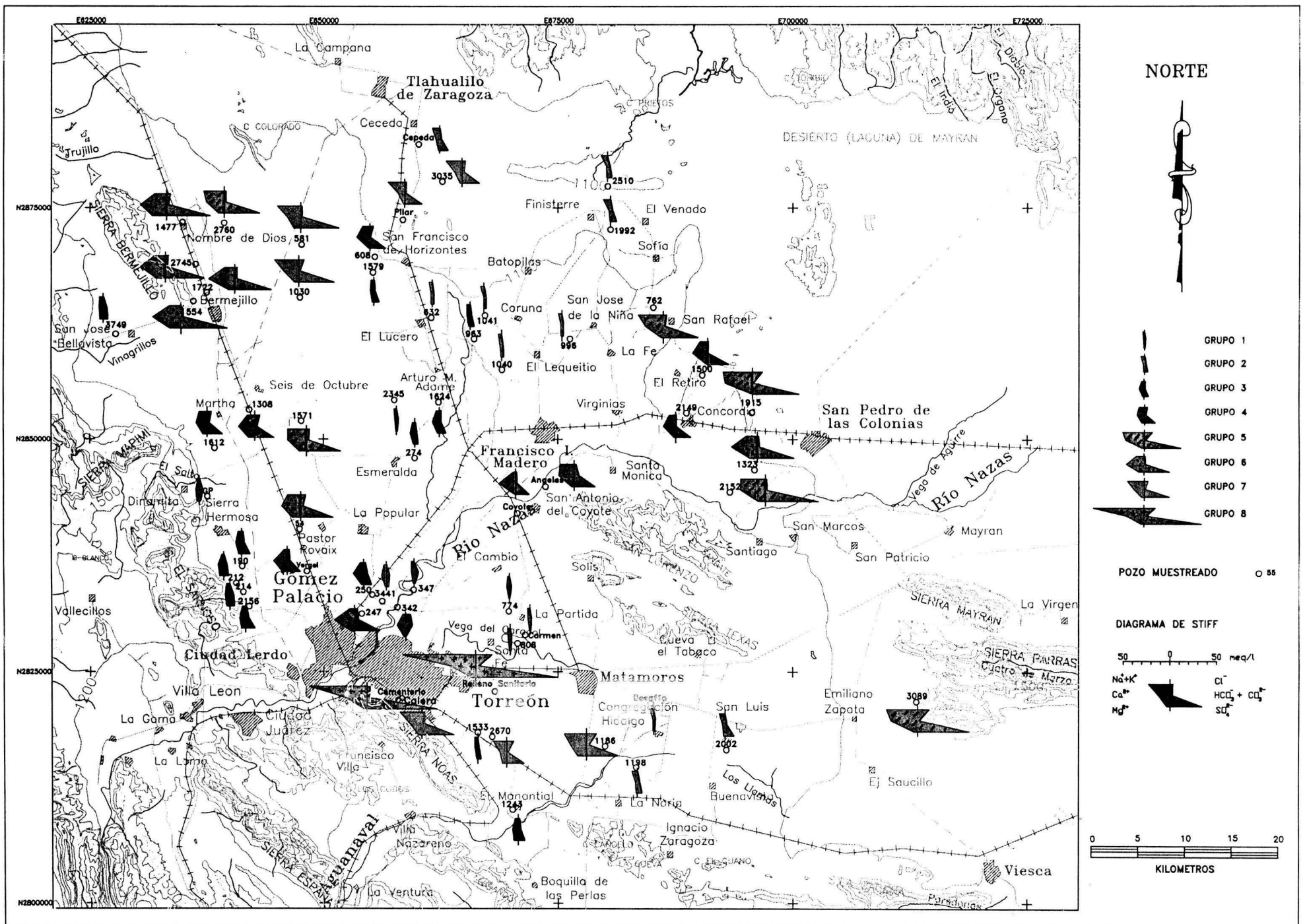
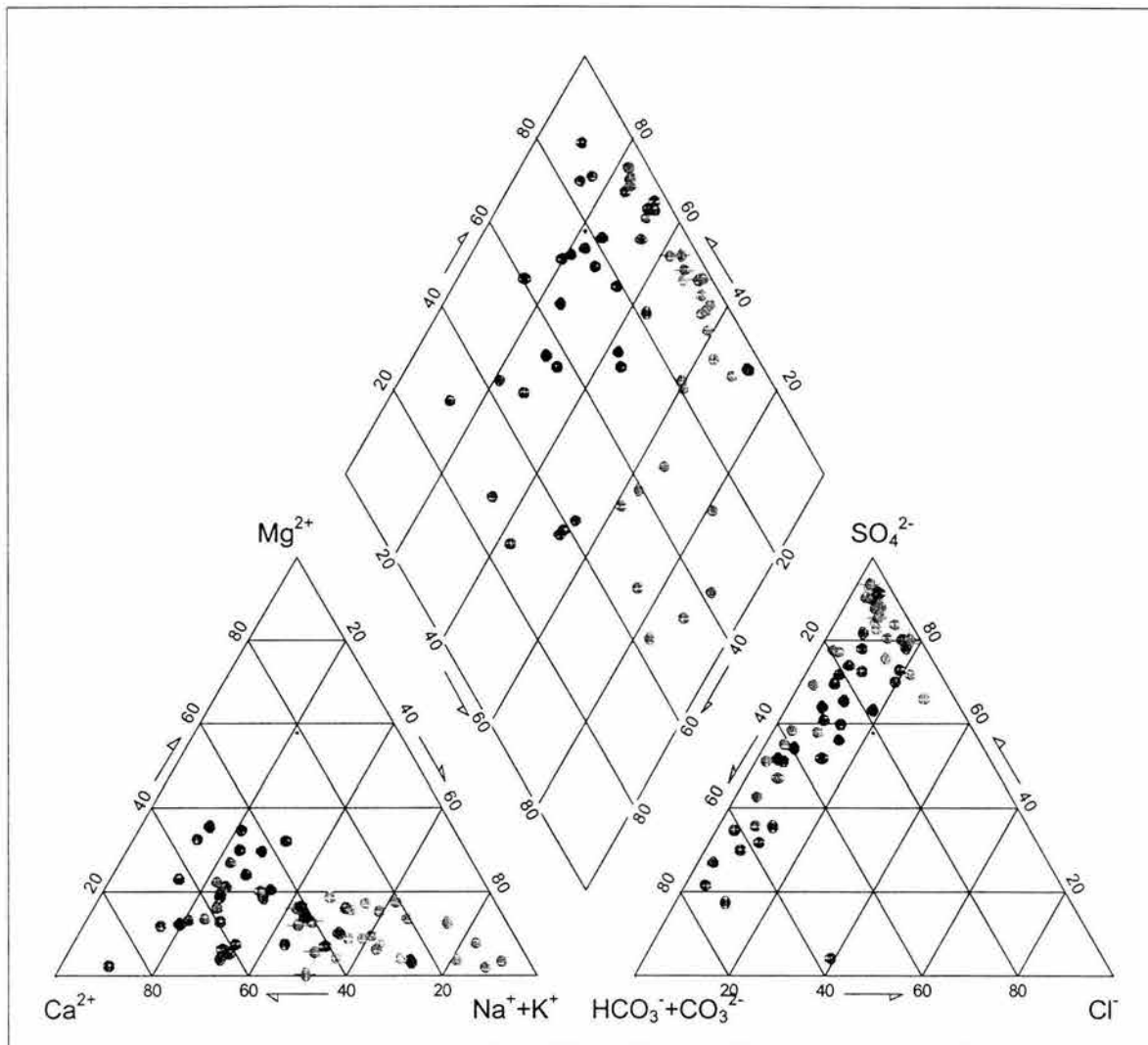


Figura 4.8 Distribución espacial de los grupos de agua a través de los Diagramas de Stiff

Figura 4.9 Diagrama de Piper mostrando los grupos hidrogeoquímicos identificados



- GRUPO 1
- GRUPO 2
- GRUPO 3
- GRUPO 4
- GRUPO 5
- GRUPO 6
- GRUPO 7
- GRUPO 8

Tabla 4.2 Grupos de agua identificados

GRUPO	MUESTRA	LOCALIDAD
GRUPO 1	GP	Mpio. Gómez Palacio
	342	Establo El Tajito
	3441	Industria Linamar
	347	Establo cerca de La Unión
	774	Establo La Partida
	2345	Ejido Arcinas
	808	San Miguel
	El Carmen	Establo El Carmen
GRUPO 2	Desaño	Establo Desaño
	2510	Establo Providencia del Norte
	1992	Cantabro Progreso
	1041	Ejido Yucatán
	1040	Establo Buena Vista
	996	El Rosario
	632	Establo El Lucero
	Cepeda	Cepeda, Tlah.
	2002	Ejido Gabino Vázquez (San Luis)
1198	Pequeña Propiedad El Refugio	
GRUPO 3	214	Granja La Providencia
	212	Rancho San Martín
	190	Rancho Bercial
	3749	Ejido Roma - Texas
	274	Ejido California
	963	Establo Huitron
	1533	San Esteban
	1579	
	250	Predio Santa Rita
	1243	Rancho Noacan
	2156	Rancho Las Palmas
1624	12 de diciembre	
GRUPO 4	Coyote	Establo El Coyote
	Vergel	Vergel
	247	Establo Santa Teresa
	1500	La Palma
	2149	San Judas
	1612	Las Cármenes
	Angeles	Granja Avícola Los Angeles
	608	Las Teresitas
1308	Santa María de Berlín	
GRUPO 5	3089	Ejido Villa de Bilbao
	2760	La Espada
	1571	Rancho La Rosita
	2152	Tacubaya (Santo Domingo)
	1915	Noría la 4
GRUPO 6	554	Peñoles Bermejillo
	2745	San Isidro, GP
	1722 ?	Bermejillo
	1477	Nombre de Dios
	1323	Rancho Nuevo Texas
	54	Granja Ideal
GRUPO 7	581	Tierras Bajas
	3035	El Capulín, Tlah.
	1030	Las Arcadias
	Pilar	Establo El Pilar
	2670	Campo Sagrado
	Calera	Calera en Torreón
	762	Rancho Maravillas
1186	Rancho Ciprés Matamoros	
GRUPO 8	Cementerio	Cementerio Del Carmen
	Relleno	Relleno Sanitario Torreón

En la tabla 4.3 se presenta un resumen de los resultados de algunos parámetros utilizados en la clasificación, para los distintos grupos, con la finalidad de comparar numéricamente los valores. Adicionalmente, para apoyar la descripción que a continuación se hace de los distintos grupos y poder comparar entre sí las características hidrogeoquímicas de los distintos grupos, en la figura 4.10 se presentan gráficas en las que se observan las concentraciones de algunos iones. En estas gráficas se presenta una simbología diferente para las muestras de cada uno de los grupos de agua identificados; esta simbología será la misma para todas las gráficas que se presenten en la discusión de resultados.

4.2.1 GRUPO 1

Este grupo está integrado por las muestras GP, 342, 3441, 774, 347, 2345, 808, Carmen.

La muestra denominada GP se localiza cerca de la población Dinamita en la sierra calcárea al occidente de la zona de estudio. Las muestras 347, 342 y 3441 se localizan en las inmediaciones del Río Nazas al norte de la Ciudad de Torreón, las muestras 774, 808 y Carmen se localizan al noreste de la Ciudad de Torreón, en las inmediaciones del poblado La Partida y la muestra 2345 se localiza al norte del poblado Esmeralda.

El agua de este grupo se caracteriza por ser de tipo bicarbonatada de baja salinidad, cuya concentración de sólidos totales disueltos es menor a 340 mg/l, con excepción de la muestra 342. Las concentraciones de bicarbonato son altas, varían de 145.75 a 305.24 mg/l, mientras que las de sulfato son bajas, entre 25 y 130 mg/l, al igual que las de litio, que varían entre 0.023 a 0.087 mg/l. Esta agua se caracteriza por presentar bajas concentraciones de arsénico, mismas que varían entre 0.004 y 0.048 mg/l; las concentraciones de fluoruro se encuentran entre 0.25 y 0.90 mg/l. En general es un agua de buena calidad.

Las características hidrogeoquímicas descritas permiten inferir que el agua de este grupo se trata de un agua de reciente infiltración. Este grupo puede subdividirse de acuerdo a sus características hidrogeoquímicas.

La muestra denominada GP es del tipo bicarbonatado cálcico; el pozo penetra en toda su longitud a través de calizas, por lo que representa al agua subterránea de reciente infiltración que circula por el medio fracturado constituido por calizas, con un tiempo de residencia corto en el acuífero.

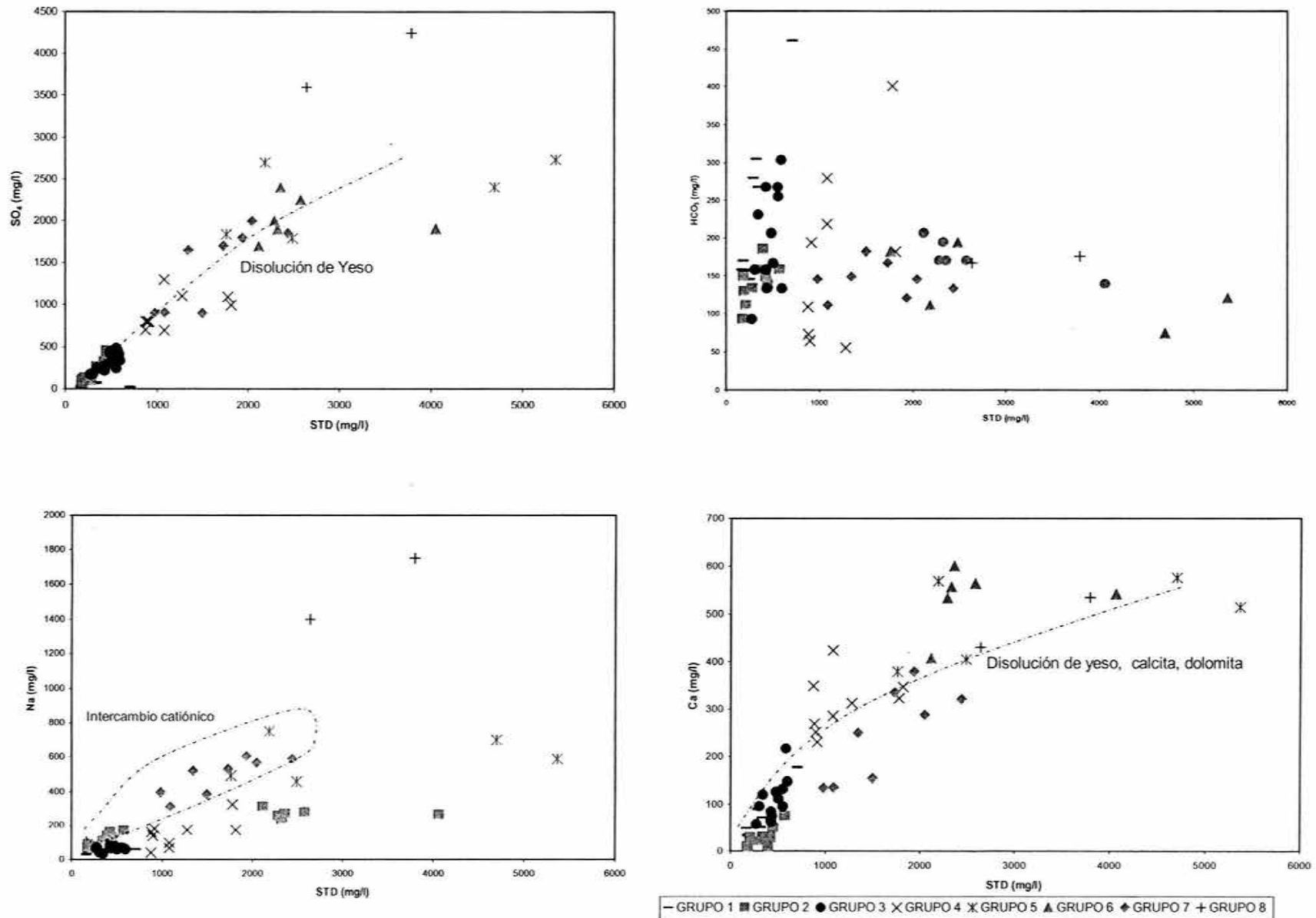
Las muestras 347, 342 y 3441 también son bicarbonatadas cálcicas, se localizan en las inmediaciones del Río Nazas al norte de la Ciudad de Torreón, por lo que se asocian a la infiltración del agua superficial del río Nazas, razón por la cual se caracteriza por ser el agua

dentro del grupo con mayor concentración de bicarbonato, de 279.36 a 461.56 mg/l, la más fría con temperatura de 23.4 a 26.2 °C y con menor pH, de 6.46 a 6.9, las concentraciones de oxígeno disuelto son mayores que para las demás muestras del grupo (3.3 a 5.7 mg/L), y presenta mayor contenido de calcio, de 177.60 a 51.20 mg/l.

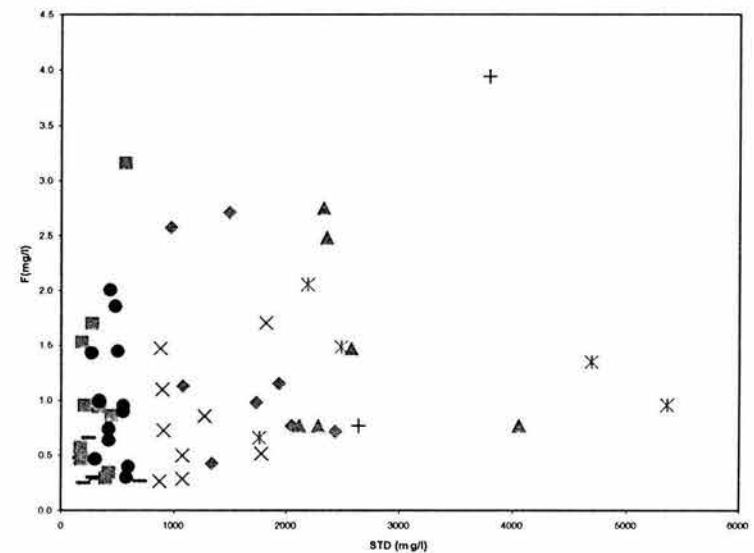
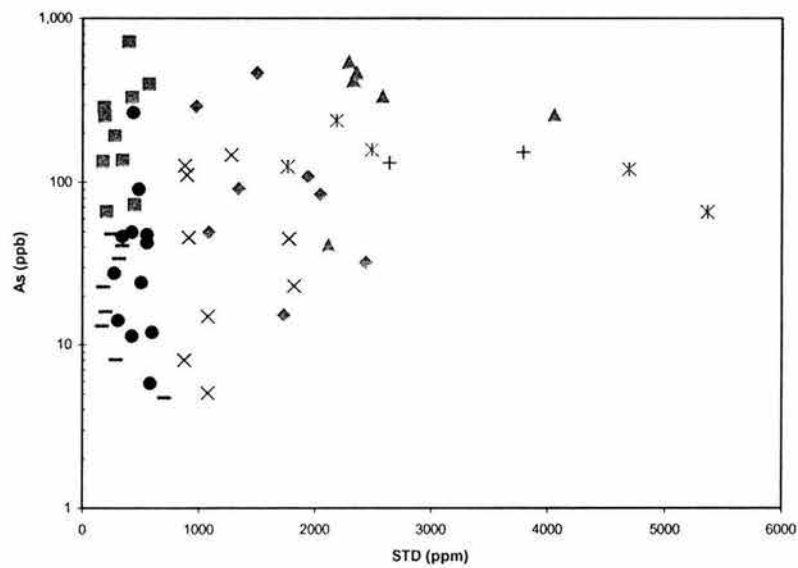
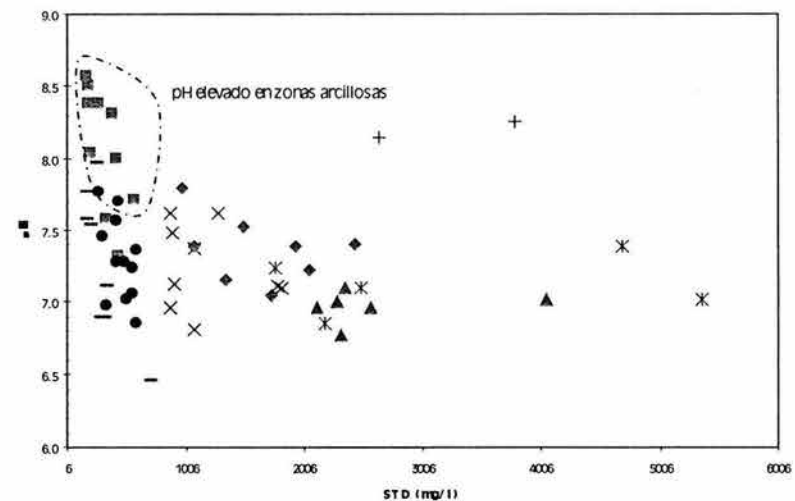
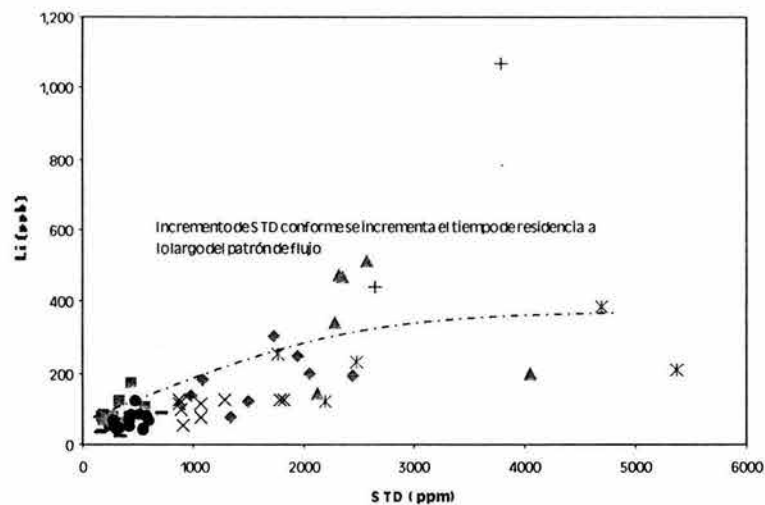
La muestra 342 presenta mayor concentración de sólidos totales disueltos (706 mg/l) probablemente debido a la influencia del agua residual que es vertida a esa zona del río Nazas. Este aprovechamiento es el más somero de la zona con 152 m de profundidad, por lo que evidencia de mejor manera el efecto de dicha contaminación antropogénica. Este aprovechamiento presenta dentro del grupo 1 las mayores concentraciones de cloruro, manganeso, cobalto, cobre, estaño y plomo con 176.72 mg/l, 433.518, 0.596, 5.210, 0.229 y 0.406 ppb respectivamente. Estos elementos en concentraciones mucho mayores que para el resto del grupo indican una fuente adicional de tipo antropogénico.

Las muestras 774, 808 y Carmen se localizan al noreste de la Ciudad de Torreón, en las inmediaciones del poblado La Partida y la muestra 2345 se localiza al norte del poblado Esmeralda. Estas muestras son de tipo bicarbonatado sódico; presentan menores concentraciones de bicarbonato, (de 145 a 170 mg/l), mayores temperaturas (de 29.36 a 32 °C), pH mayores a 7.5, menores concentraciones de oxígeno disuelto y valores menores de Eh, con respecto al resto del grupo, por lo que se infiere que esta agua tiene mayor tiempo de residencia en el acuífero, o bien puede presentar la influencia de algún otro tipo de agua. Por ejemplo, la muestra 2345 en el Ejido Arcinas, en la que se muestra una ligera influencia del agua característica del grupo 2, y dada su ubicación geográfica es probable que se trate de una mezcla de agua.

Figura 4.10 Gráficas de concentraciones de algunos iones para los distintos grupos



Continuación de la Figura 4.10



— GRUPO 1 ■ GRUPO 2 ● GRUPO 3 × GRUPO 4 ✕ GRUPO 5 ▲ GRUPO 6 ◆ GRUPO 7 + GRUPO 8

TABLA 4.3 COMPARACIÓN DE LOS GRUPOS DE AGUA IDENTIFICADOS

PARAMETRO	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7	Grupo 8	
Temperatura °C	Promedio	28.30	28.80	28.30	27.20	30.30	28.70	27.60	18.00
	Máxima	32.30	33.80	31.60	29.90	42.50	39.00	32.70	20.30
	Mínima	23.40	24.30	23.50	24.10	24.40	23.80	25.20	15.70
pH	Promedio	7.27	8.07	7.30	7.24	7.12	6.97	7.36	8.20
	Máxima	7.97	8.56	7.76	7.62	7.38	7.10	7.79	8.26
	Mínima	6.46	7.31	6.86	6.82	6.86	6.78	7.05	8.14
STD (mg/l)	Promedio	305.80	325.30	460.80	1179.40	3303.00	2623.30	1635.40	3215.00
	Máxima	706.00	575.50	600.00	1820.00	5370.00	4060.00	2440.00	3790.00
	Mínima	168.00	180.00	277.50	876.50	1765.00	2120.00	983.00	2640.00
Bicarbonato (mg/l)	Promedio	243.10	140.40	197.70	175.30	136.50	175.00	144.30	171.50
	Máxima	461.60	185.40	303.60	400.80	194.30	206.50	182.20	176.10
	Mínima	145.70	92.70	92.70	55.60	74.20	139.10	111.30	166.90
Cloruro (mg/l)	Promedio	33.30	12.16	37.50	98.00	217.00	119.50	171.93	380.70
	Máxima	176.70	31.60	79.70	190.00	441.60	198.40	383.50	628.20
	Mínima	5.00	3.30	15.00	30.00	55.00	53.40	46.70	133.30
Sulfato (mg/l)	Promedio	63.40	224.60	302.50	919.50	2293.20	2021.70	1461.20	3925.00
	Máxima	130.00	462.50	487.50	1300.00	2736.00	2393.80	1996.80	4250.00
	Mínima	25.00	74.00	179.50	693.60	1793.80	1693.40	896.60	3600.00
Sodio (mg/l)	Promedio	46.18	111.64	65.81	153.95	598.81	270.75	488.49	1575.50
	Máxima	61.00	173.65	82.11	327.75	751.56	312.80	606.97	1750.57
	Mínima	18.44	69.46	36.53	41.51	457.47	237.59	311.65	1400.46
Calcio (mg/l)	Promedio	67.11	27.13	110.79	311.28	488.52	533.40	250.11	482.05
	Máxima	177.60	75.20	217.26	423.97	576.00	600.00	379.20	534.11
	Mínima	28.80	8.00	57.60	232.00	379.20	406.40	134.40	430.00
Silice (ppb)	Promedio	19.10	24.15	17.55	20.87	20.22	21.96	20.61	15.61
	Máxima	21.50	29.60	24.20	36.50	28.96	58.80	26.56	24.28
	Mínima	10.10	21.60	11.00	15.13	11.70	10.47	15.55	6.95
Litio (ppb)	Promedio	50.24	91.84	64.57	108.38	239.60	355.04	181.65	752.89
	Máxima	87.89	173.35	119.57	129.09	385.76	511.57	300.57	1067.92
	Mínima	23.62	59.72	37.88	55.82	120.24	145.28	75.48	437.85
Arsénico (ppb)	Promedio	23.49	259.56	53.51	58.86	142.07	347.63	143.26	142.20
	Máxima	48.35	718.83	268.99	148.21	240.46	547.72	470.46	153.12
	Mínima	4.77	65.68	5.80	5.11	65.96	41.20	15.33	131.29

4.2.2 GRUPO 2

Este grupo incluye las muestras de los pozos 2510, 1992, 1041, 1040, 996, 632, 1198, 2002, así como los pozos del Establo Desafío y de Cepeda, Tlahualilo.

Las muestras 2510, 1992, 632, 1041, 963, 1040 y 996 se localizan entre los poblados de Finisterre y El Lucero, en la porción noreste de la zona de estudio que corresponde geológicamente a depósitos de origen lacustre con un alto contenido de arcillas. Las muestras Desafío, 1198 y 2002 se localizan al sureste de Matamoros, también hacia la zona lacustre.

El agua de este grupo se caracteriza por ser sódica, tanto sulfatada, bicarbonatada o mixta; aunque con mayor tendencia a ser sulfatada. Así mismo este grupo se caracteriza por tener baja salinidad, con concentraciones de sólidos totales disueltos menores a 500 mg/l (de 180 a 426 mg/l) con excepción del pozo 2002, cuya salinidad es de 575 mg/l. Las concentraciones de litio, en general son mayores a los del grupo 1, ya que varían de 0.060 a 0.173 mg/l. Las concentraciones de sodio son muy altas en comparación con el grupo 1, de 69.46 a 173.65 mg/l. La temperatura del agua subterránea de este grupo varía desde 24 hasta 33 °C, y en todos los casos el pH es básico, prácticamente mayor a 8, con excepción de las muestras 1198, 2002 y Cepeda, en las que varía de 7.31 a 7.7.

A pesar de la baja salinidad, las concentraciones de arsénico son muy elevadas para todas las muestras de este grupo, variando desde 65 hasta 718 ppb. Todas las muestras de este grupo presentan elevadas concentraciones de fosfatos, en comparación con el resto de las muestras, ya que ese varía de 0.10 a 0.65 mg/l. En cuanto al fluoruro sólo las muestras Cepeda, 632 y Desafío son superiores a 1.5 mg/l.

Este grupo se caracteriza por ser anóxico, ya que el contenido de oxígeno disuelto no es detectado, excepto para las muestras 2510 en las que se midió 0.3 mg/l y en la muestra Cepeda, en la que se registró 1.9 mg/l de oxígeno disuelto.

La muestra denominada Cepeda, así como la del pozo 2002 podrían representar agua de mezcla con otros grupos.

4.2.3 GRUPO 3

Este grupo está integrado por las muestras 214, 212, 190, 3749, 274, 963, 1533, 1579, 250, 1243, 2156 y 1624. Los pozos 190, 212, 214 y 2156 se localizan al occidente en las inmediaciones de la Sierra El Sarnoso. Mientras que las muestras 274, 1624, 1579 y 963 se localizan en el centro de la

zona de estudio, al noroeste de Francisco I. Madero; la muestra 250 se localiza al norte de Gómez Palacio y los pozos 1533 y 1243 se encuentran al sur de Torreón y la muestra 3749 al noroeste de la zona de estudio.

El agua de este grupo es del tipo sulfatada cálcica y sulfatada mixta con salinidad relativamente baja, de 310 a 600 mg/l de sólidos totales disueltos. En general las muestras localizadas en el valle se ubican cercanas a los arroyos. La temperatura del agua varía de 23.5 a 31.6 °C, encontrándose las más elevadas en las estribaciones de la Sierra El Sarnoso. El pH varía de 6.86 a 7.8, la concentración de oxígeno disuelto de 0 a 8.3 mg/l, la concentración de bicarbonato varía de 92 a 303 mg/l, la de sulfato de 179 a 487 mg/l, la de sodio de 36 a 82 mg/l, la de calcio de 57 a 217 mg/l, la de magnesio de 11 a 53 mg/l, la de litio varía de 37 a 119 ppb y el arsénico es menor a 50 ppb, con excepción de las muestras tomadas en los pozos 190 y 1579 en los que las concentraciones son elevadas, de 91 y 268 ppb respectivamente.

También estos dos aprovechamientos son los únicos que tienen concentraciones de fluoruro mayores a 1.5 mg/l con 1.86 y 2.01 mg/l.

El pozo 1579 que presenta muy elevadas concentraciones de arsénico y fluoruro podría representar una mezcla con el agua del grupo 2, ya que se ubica geográficamente muy cerca de la zona norte donde se manifiesta este grupo. La muestra 190 presenta las mayores concentraciones de sulfato, cobre y hierro con respecto a las demás muestras del grupo.

4.2.4 GRUPO 4

Este grupo está integrado por las muestras de los pozos Coyote, Vergel, 247, 1500, 2149, 1612, Angeles, 608 y 1308. Los pozos 1612, 1308, Vergel y 247 se localizan en la porción occidental de la zona de estudio. El Coyote y Los Angeles al sur de Francisco I. Madero, la 608 al centro y las muestras 2149 y 1500 al oriente.

Este grupo es del tipo sulfatada cálcica y sulfatada mixta, con sólidos totales disueltos de 876.5 a 1820 mg/l, la temperatura varía de 24.1 a 30 °C, el pH de 6.82 a 7.6, la concentración de oxígeno disuelto varía de 0 a 7 mg/l, el bicarbonato de 55 a 400 mg/l, el sulfato de 693 a 1104 mg/l, el sodio de 41.51 a 327 mg/l, el calcio de 232 a 423 mg/l, el litio de 55 a 129 ppb y el arsénico de 5 a 46 ppb, con excepción de los pozos 1500, 2149 y 608 en los que las concentraciones de arsénico son 148, 111 y 127 ppb respectivamente y estas muestras son las que contienen un pH mayor dentro del grupo, de 7.5 y 7.6, así mismo el oxígeno disuelto en estas muestras es el menor ya que varía de 0 a 1.3. Estas tres muestras se ubican al noreste y al norte, asociadas geográficamente a muestras del grupo 5, por lo que puede tratarse de mezclas de agua.

4.2.5 GRUPO 5

Este grupo de agua está integrado por las muestras tomadas en los pozos 3089, 2760, 1571, 2152, 1915. Estos pozos se localizan en los extremos oeste y noreste de la zona de estudio en las inmediaciones de las Sierras calcáreas y adyacentes a las fallas geológicas que permiten el afloramiento de las unidades Mesozoicas. Dentro de la porción oriente del área de estudio se localizan los pozos 3089, 2152 y 1915; el pozo 3089 se localiza al norte del poblado de Viesca, y los pozos 2152 y 1915 al oeste de San Pedro de Las Colonias; mientras que al occidente de la zona de estudio se localizan los pozos 2760 y 1571; el pozo 2760 se localiza al norte de Bermejillo y el pozo 1571 al oeste del poblado Esmeralda.

Todas las muestras de este grupo se caracterizan por su elevada salinidad que varía de 1765 a 5370 mg/l; el agua es del tipo sulfatada sódica y sulfatada mixta y se caracteriza por su elevada concentración de sulfato, de 1793 a 2736 mg/l; su alto contenido de sodio, de 457 a 751 mg/l; y de calcio, que varía de 379 a 576 mg/l. La temperatura del agua subterránea varía de 42.5°C en el pozo 3089 a 24°C en el pozo 2152. El pH varía de 6.86 a 7.4. La concentración de bicarbonato varía de 74.17 a 194 mg/l. El oxígeno disuelto indica condiciones anóxicas para todas las muestras, y sólo en el pozo 1571 es de 0.9 mg/l. Las concentraciones de litio varían de 120 a 385 ppb y las de arsénico varían de 65 a 240 ppb, por lo que sobrepasan la norma para agua potable. En cuanto al fluoruro, sólo el pozo 3089 rebasa 1.5 mg/l con 2.06 mg/l.

Las muestras localizadas al occidente tienen menor salinidad, así como mayor concentración de bicarbonato y menores concentraciones de sulfato, sodio y calcio del grupo y, mientras que las muestras del oriente son las de mayor salinidad y mayor concentración de sulfato, sodio y calcio.

Por su posición geográfica y su características hidrogeoquímicas se puede inferir que se trata de muestras que representan agua subterránea con un largo recorrido en el acuífero, a través del medio calcáreo.

La muestra correspondiente al pozo 3089 presenta características especiales dentro del grupo ya que su temperatura es mayor a 42°C y a la descarga se manifiesta un olor característico a ácido sulfhídrico, el pH es de 6.86 y el cloruro alcanza valores de 441 mg/l.

4.2.6 GRUPO 6

Las muestras que integran este grupo son las obtenidas de los pozos 554, 2745, 1722, 1477, 1323 y 54. Al igual que las muestras del grupo 5 tienen elevada salinidad y se presentan en las inmediaciones de las sierras calcáreas al noroeste de la zona de estudio y en la porción oriente, pero se distinguen del grupo 5 en que las concentraciones de calcio son mucho más significativas que las de sodio, por lo que son sulfatadas cálcicas. Las muestras 1477, 2745, 554 y 1722 se

localizan en el extremo noroeste en las inmediaciones de la Sierra Bermejillo y representan al agua subterránea que circula a través del medio calcáreo, proveniente del occidente.

Las muestra 54 se localiza al norte de Gómez Palacio y la 1323 al oeste de San Pedro de Las Colonias, que al encontrarse en el material granular del valle, pueden representar agua de mezcla con predominio del agua de este grupo, pero con componente del agua identificada para otros grupos.

La concentración de sólidos totales disueltos varía de 2120 a 4060 mg/l. La temperatura del agua subterránea a la descarga varía de 24 a 39 °C, en la zona de Bermejillo se presenta el agua de mayor temperatura del grupo, con valores de 27 a 39 °C. El pH varía de 6.97 a 7.1, la concentración de oxígeno disuelto varía de 0.1 a 5.2. La concentración de bicarbonato de 139 a 206 mg/l, la de sulfato de 1693 a 2393 mg/l, la concentración de sodio es de 237 a 312 mg/l y la de calcio es de 406 a 600 mg/l. La concentración de magnesio es elevada en comparación con el resto de las muestras y varía de 73 a 182 mg/l. La concentración de litio varía de 145 a 511 ppb, la concentración de arsénico varía de 260 a 547 ppb, excepto para el pozo 54 en el que dicha concentración es apenas de 41 ppb. La concentración de fluoruro es elevada sólo en el aprovechamiento 554 con 2.48 mg/l y en el pozo 1722 con 2.75 mg/l.

4.2.7 GRUPO 7

Este grupo está integrado por las muestras 581, 1030, 2670, Calera, 3035, El Pilar, 1186 y 762. Los pozos 3035, Pilar, 581 y 1030 se localizan al noroeste de la zona de estudio, mientras que los pozos Calera, 2670 y 1186 se localizan al sur de Torreón y Matamoros.

Este grupo se caracteriza por ser del tipo sulfatado sódico, con sólidos totales disueltos de 983 a 2440 mg/l. La temperatura varía de 25 a 33°C, el pH varía de 7.1 a 7.8, la concentración de bicarbonato es de 111 a 182 mg/l, la de sulfato es de 896 a 1996 mg/l, la de cloruro de 46 a 383 mg/l, la de sodio varía de 311 a 606 mg/l, la de calcio de 134 a 379 mg/l, la de litio de 75 a 300 ppb, la concentración de arsénico varía de 32 a 470 ppb. Las muestras 3035 y Pilar presentan las concentraciones más elevadas de arsénico en el grupo, de 470 y 294 ppb respectivamente, en estas dos muestras el pH es el más alto dentro del grupo, de 7.5 y 7.8.

En términos generales la localización de las muestras indica la proximidad a las zonas de menor granulometría en el material geológico que conforma el acuífero, debido al ambiente de depósito que lo originó, en el que el material arcilloso es más abundante.

4.2.8 GRUPO 8

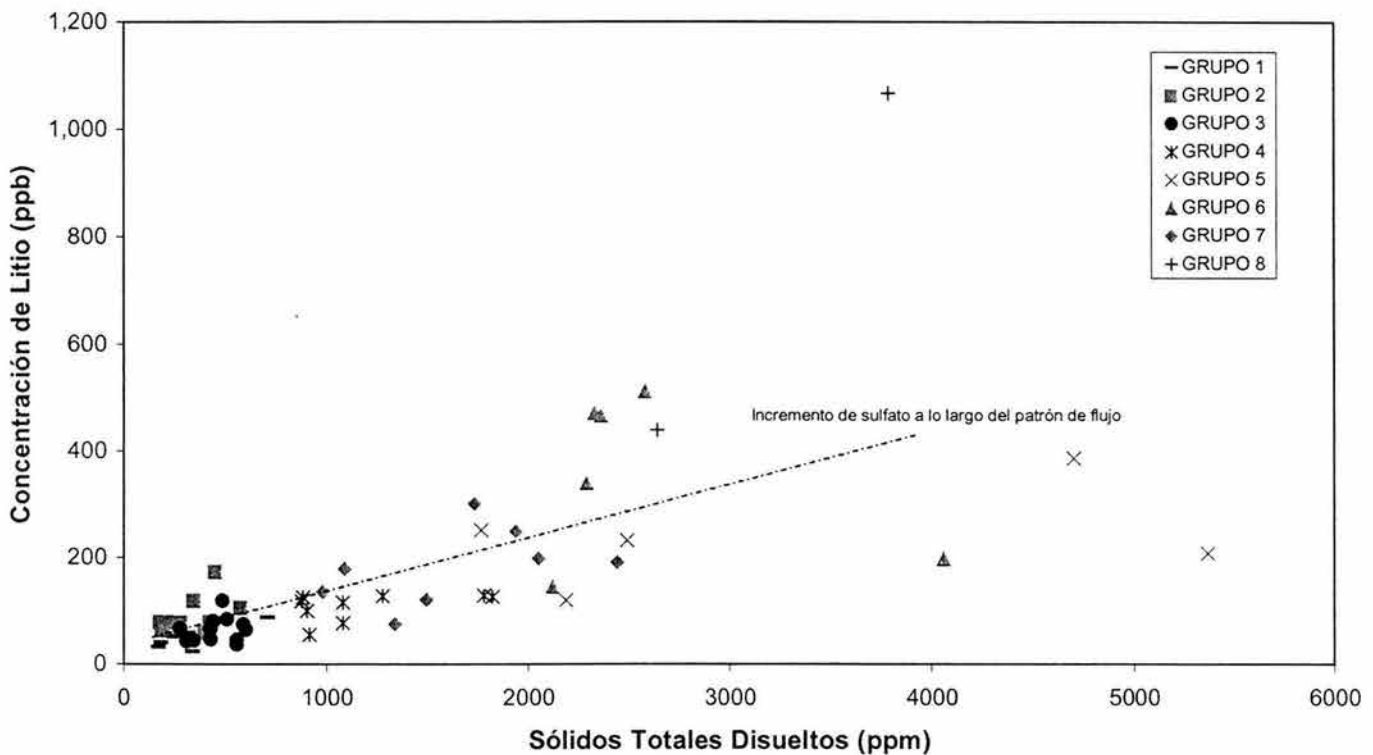
Como un grupo aparte se consideraron las muestras de agua subterránea recolectadas en la zona de descarga ocurrida en Torreón, en el Cementerio y en El Relleno Sanitario. Evidencias isotópicas e hidrogeoquímicas parecen señalar que estas muestras se ven afectadas por evaporación, al aflorar a la superficie. También es muy probable que se vean afectadas por contaminación antropogénica.

4.3 REACCIONES HIDROGEOQUÍMICAS

La composición química del agua subterránea en la Comarca Lagunera está controlada por la interacción entre el agua subterránea y los minerales que forman parte del medio granular y fracturado por donde circula. Las reacciones químicas más importantes que potencialmente afectan la concentración de los iones principales en el agua subterránea incluyen; *i*) precipitación y disolución de minerales, *ii*) oxidación y reducción e *iii*) intercambio iónico. Entre los procesos adicionales que en ocasiones modifican la composición del agua subterránea se menciona la evaporación y la mezcla de aguas por efecto del bombeo. La importancia de estos procesos en el control de la concentración de los elementos principales está condicionado por los patrones de flujo y la velocidad, además de la secuencia de las reacciones que se presentan a lo largo de los sistemas de flujo de agua subterránea.

El litio, por ser un ion conservativo permite estimar de manera relativa la intensidad de interacción del agua subterránea con el material geológico (Edmunds, 1996). En la figura 4.11 se presenta la relación litio contra sólidos totales disueltos, donde se observa que en términos generales a mayor concentración de litio mayor salinidad del agua subterránea; este comportamiento permite inferir que a mayor concentración de sólidos totales disueltos existe una mayor interacción entre el agua subterránea y el medio geológico. Por ello fue seleccionada la concentración de sólidos totales disueltos para ser graficada en las abscisas de diversas gráficas.

Figura 4.11 Concentración de sólidos totales disueltos contra concentración de litio



A continuación se presenta una descripción de los procesos hidrogeoquímicos identificados que condicionan la composición del agua subterránea.

4.3.1 EVAPORACIÓN

El agua subterránea de los grupos 5, 6 y 8 se caracteriza por su elevada salinidad y altas concentraciones de sulfato, calcio y magnesio. Estudios previos han señalado a la evaporación como la responsable de la alta salinidad del agua subterránea en la Comarca Lagunera.

Brouste *et al* (1997) sugieren que las diferentes Facies hidrogeoquímicas que identificaron en la Región Lagunera, así como la mineralización del agua subterránea pueden explicarse por medio de procesos de evaporación y con base en un modelo hidrogeoquímico comprueban que la evaporación de agua superficial o de agua subterránea somera puede generar las diferentes Facies hidrogeoquímicas. Sin embargo, también concluyen que la evaporación no es el único proceso responsable del incremento en la salinidad del agua subterránea. González (1995) demuestra mediante modelación hidrogeoquímica la existencia de reacciones de evaporación, y asegura que este proceso contribuye a incrementar las concentraciones de arsénico en el agua subterránea. Así mismo El IMTA (1991) identifica el proceso de evaporación como resultado del análisis isotópico.

Los datos isotópicos obtenidos para el presente trabajo también permiten identificar a la evaporación como un proceso importante en la zona de estudio. A continuación se analizan los resultados isotópicos obtenidos para este trabajo.

Para incorporar los datos de la precipitación local en la interpretación efectuada a los resultados isotópicos fue necesario recopilar información existente. Brouste *et al* (1997) reportan datos isotópicos de precipitación en la zona de la Comarca Lagunera a una elevación de 1100 msnm. Así mismo se cuenta con información isotópica obtenida por IAEA para la precipitación de la estación Chihuahua entre 1962 y 1987. Las condiciones climáticas de Chihuahua son muy similares a las que prevalecen en la Comarca Lagunera, por lo que su extrapolación de la línea meteórica local de la Estación Chihuahua a la zona de estudio se considera válida.

La regresión lineal que describe la Línea meteórica local para la estación Chihuahua es la siguiente:

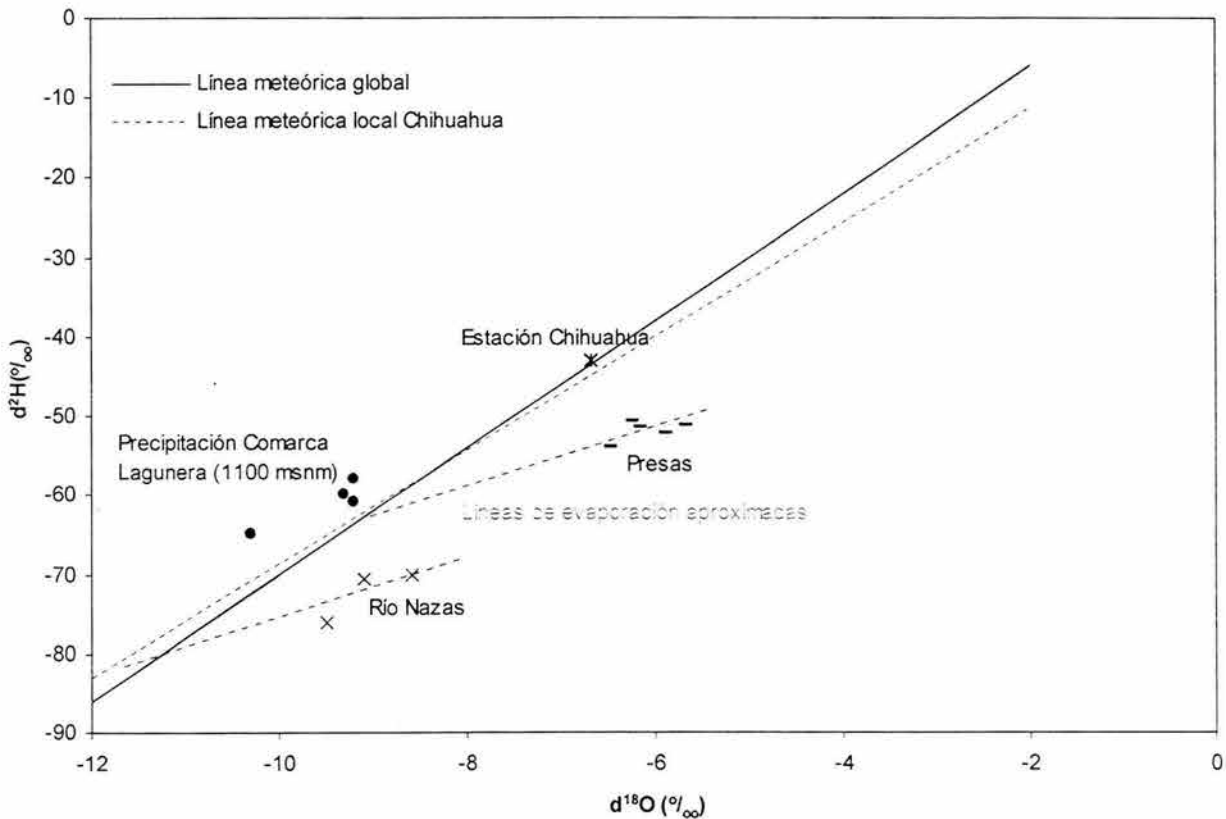
$$\delta^2\text{H} = 7.2 (\pm 0.2) \delta^{18}\text{O} + 3.3 (\pm 1.2) \text{‰} \quad (4.1)$$

Con un valor medio de -6.7‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -43‰ de $\delta^2\text{H}$, 121 datos y un coeficiente de correlación de $r^2=0.94$.

Una vez que la precipitación llega a la superficie terrestre la evaporación modifica su composición isotópica. El proceso de evaporación ocasiona un enriquecimiento de ^{18}O y ^2H en el líquido residual, debido a que los isótopos ligeros son los que se pierden en la evaporación. Diversos efectos cinéticos afectan de forma diferente a estos isótopos, por lo que ocurre un fraccionamiento que enriquece el $\delta^{18}\text{O}$ en mayor proporción que el $\delta^2\text{H}$. La relación entre los isótopos $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en el líquido residual evoluciona, revelando una pendiente entre cuatro y seis, sin importar el contenido isotópico original (Payne, 1988).

En cuanto a la información isotópica del agua superficial de la zona de estudio, Brouste (1997) obtuvo datos isotópicos del agua del río Nazas para 1994 y el IMTA (1991) de las Presas Francisco Zarco y Lázaro Cárdenas, ambas localizadas en la región de la Comarca Lagunera. Si se observa la relación isotópica de oxígeno 18 y el deuterio de la información isotópica del agua superficial en relación con la información de la precipitación y la línea de agua meteórica considerada para la zona de estudio, (figura 4.12) resulta evidente la existencia del efecto de evaporación en las muestras de agua superficial, tanto de las presas como del Río Nazas debido a las condiciones semiáridas que prevalecen en la zona de estudio.

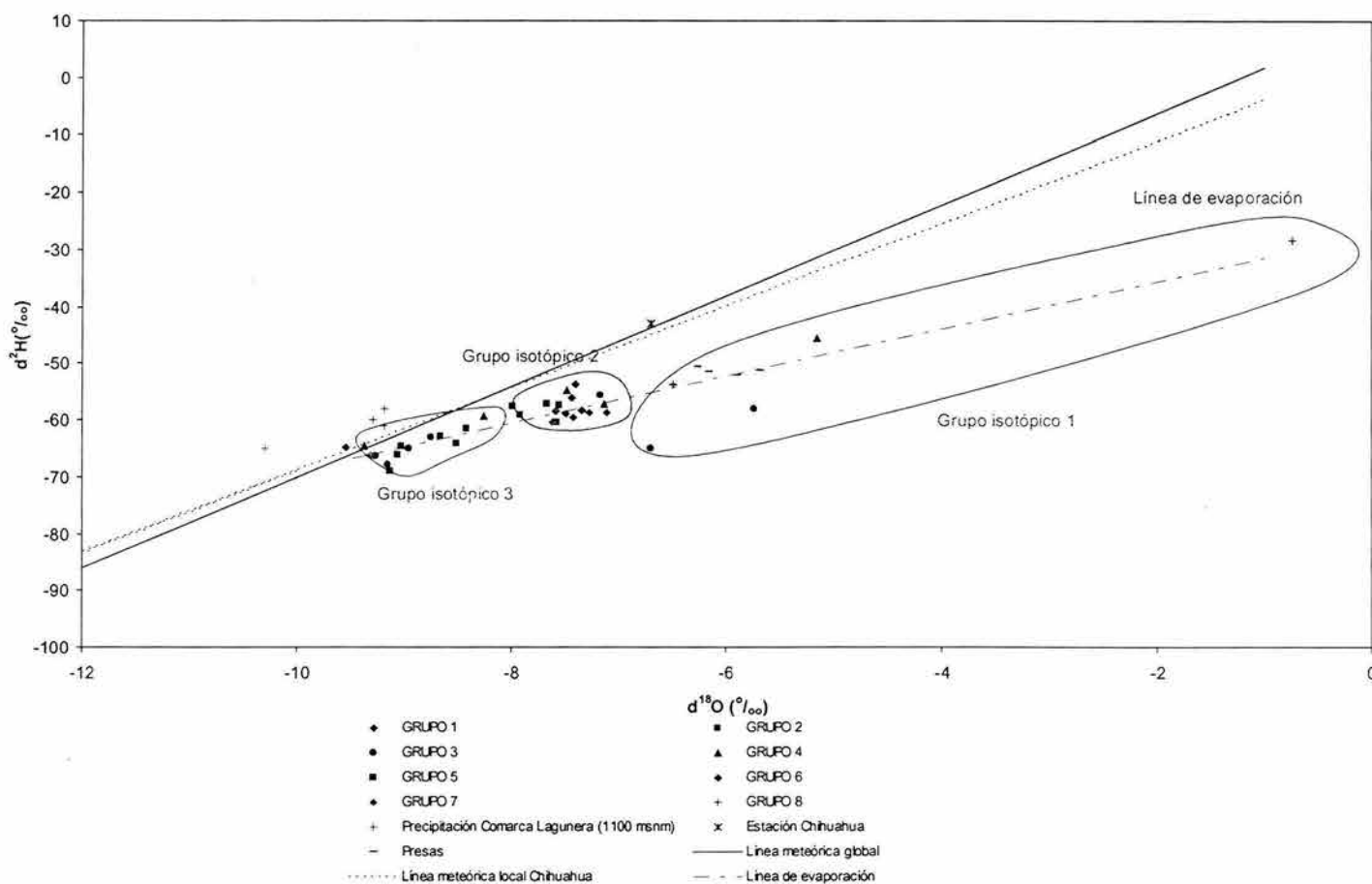
Figura 4.12 Relación isotópica entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua superficial



En este tipo de gráficas la intersección entre la línea de evaporación y la línea meteórica local señala la composición isotópica previa al proceso de evaporación. Debido a que se tienen muy pocos datos, la línea de evaporación no puede ser trazada matemáticamente, sin embargo puede inferirse que el agua del Río Nazas antes de evaporarse tenía una composición isotópica más ligera que la precipitación en la Comarca Lagunera. Esto puede explicarse debido al efecto de altitud, ya que el escurrimiento del Río Nazas se genera en las elevaciones topográficas localizadas al suroeste de la ciudad de Torreón, con elevaciones de al menos 1000 metros por arriba del nivel medio de la planicie.

En la figura 4.13 se observa la relación isotópica entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua subterránea, de acuerdo a los resultados obtenidos por este trabajo. La composición isotópica del agua subterránea no se asemeja a la de precipitación, tal como lo observó Brouste *et al* (1997). Esta diferencia puede deberse a alguno de los siguientes factores: *i*) modificaciones en la composición isotópica del agua subterránea producidas por evaporación durante la recarga, *ii*) efecto de altitud, *iii*) infiltración preferencial de la precipitación durante determinada época del año, *iv*) efecto paleoclimático.

Figura 4.13 Relación isotópica entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua subterránea



En las zonas áridas y semiáridas, el agua superficial que recarga el acuífero puede sufrir modificaciones en su composición isotópica, con relación de la precipitación local que la originó, debido al enriquecimiento isotópico que se presenta durante el proceso de evaporación. El agua de recarga puede evaporarse cuando es agua superficial que constituye un lago o cuerpo de agua estancado, o cuando escurre de las zonas elevadas a partes planas subyacentes. La evaporación también puede ocurrir a partir de la zona no saturada durante la infiltración, en cuyo caso el grado de fraccionamiento se incrementa.

La evaporación causará una evolución en el contenido de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ que seguirá una pendiente entre 2.5 a 5.5, dependiendo de la humedad relativa del aire y del lugar donde ocurre la evaporación, ya sea a partir de un cuerpo de agua o del perfil del suelo.

Los datos isotópicos del agua subterránea generados en este trabajo (Figura 4.13) permiten identificar un marcado fraccionamiento isotópico producido por el proceso de evaporación. La ecuación de la línea de evaporación para las muestras de agua subterránea calculada con mínimos cuadrados es la siguiente:

$$\delta^2\text{H} = 4.183 \delta^{18}\text{O} - 27.124 \quad (4.2)$$

La pendiente de esta recta concuerda con aquella que se produce por evaporación a partir de un cuerpo de agua y una humedad en el ambiente de aproximadamente el 25%. No se tienen datos de la humedad promedio ambiental para la Comarca Lagunera, sin embargo se considera que dicha humedad sería demasiado baja; condición que sugiere que la evaporación del agua se produce tanto durante el escurrimiento del agua superficial, como durante la infiltración a partir del perfil de suelo. Esta misma conclusión se puede obtener a partir de los datos del trabajo de Brouste *et al* (1997). Es importante señalar que la intersección de la línea de evaporación con la línea meteórica local sugiere que la composición isotópica original es muy similar a la detectada a partir del análisis realizado a la información de Brouste *et al* (1997).

En la figura 4.13 primeramente se observa que no existe una relación directa entre la composición isotópica y la composición química del agua subterránea, pues las muestras de los grupos obtenidos hidrogeoquímicamente no presentan un comportamiento isotópico similar. Adicionalmente se observa en la gráfica que la modificación isotópica producida por la evaporación varía para cada muestra dependiendo de las condiciones específicas de cada sitio. Las muestras fueron agrupadas dependiendo de su comportamiento isotópico.

El grupo isotópico 1 está integrado por las muestras del Relleno Sanitario, del Cementerio y las de los pozos 247 y 1243; y se caracteriza por tener un mayor fraccionamiento isotópico provocado por la evaporación. Las muestras que presentan mayor influencia de la evaporación son las que corresponden al Relleno Sanitario y al Cementerio debido a que se trata de agua subterránea

somera que incluso aflora a la superficie, situación que propicia un mayor efecto de evaporación. La composición isotópica de las muestras 247 y 1243 permite inferir que también han sido fuertemente afectadas por evaporación. Estas dos muestras se ubican en las inmediaciones del curso de los ríos Nazas y Aguanaval respectivamente, por lo que pueden representar la composición del agua superficial que se infiltró en los cauces de estas corrientes donde fue afectada por procesos de evaporación. Cabe señalar que no ocurre el mismo comportamiento isotópico para las demás muestras asociadas a reciente infiltración a partir de los ríos, lo que hace pensar que es más probable que en estas muestras exista la influencia de las aguas residuales que se utilizan para riego al oriente de la Ciudad de Torreón y que se infiltran al subsuelo después de haber sufrido el proceso de evaporación durante su recorrido a través de los canales a cielo abierto.

Es importante destacar que la composición isotópica del agua de las Presas (IMTA, 1991), en las que la evaporación ocurre directamente a partir de un cuerpo de agua superficial, es muy similar a la de este grupo isotópico. Ello confirma la interpretación.

Las muestras 808, Carmen, 347, 3441, Angeles, 250, 2345, 1030, 1040, 2152, 1323 (grupo isotópico 2) presentan un efecto de evaporación de menor magnitud que el correspondiente al grupo anterior. La distribución espacial de estas muestras señala que corresponden a la antigua zona de llanura de inundación del río Nazas. Esta condición sugiere que la recarga de agua subterránea en esta región se generó a partir de la infiltración de agua superficial acarreada por el río Nazas.

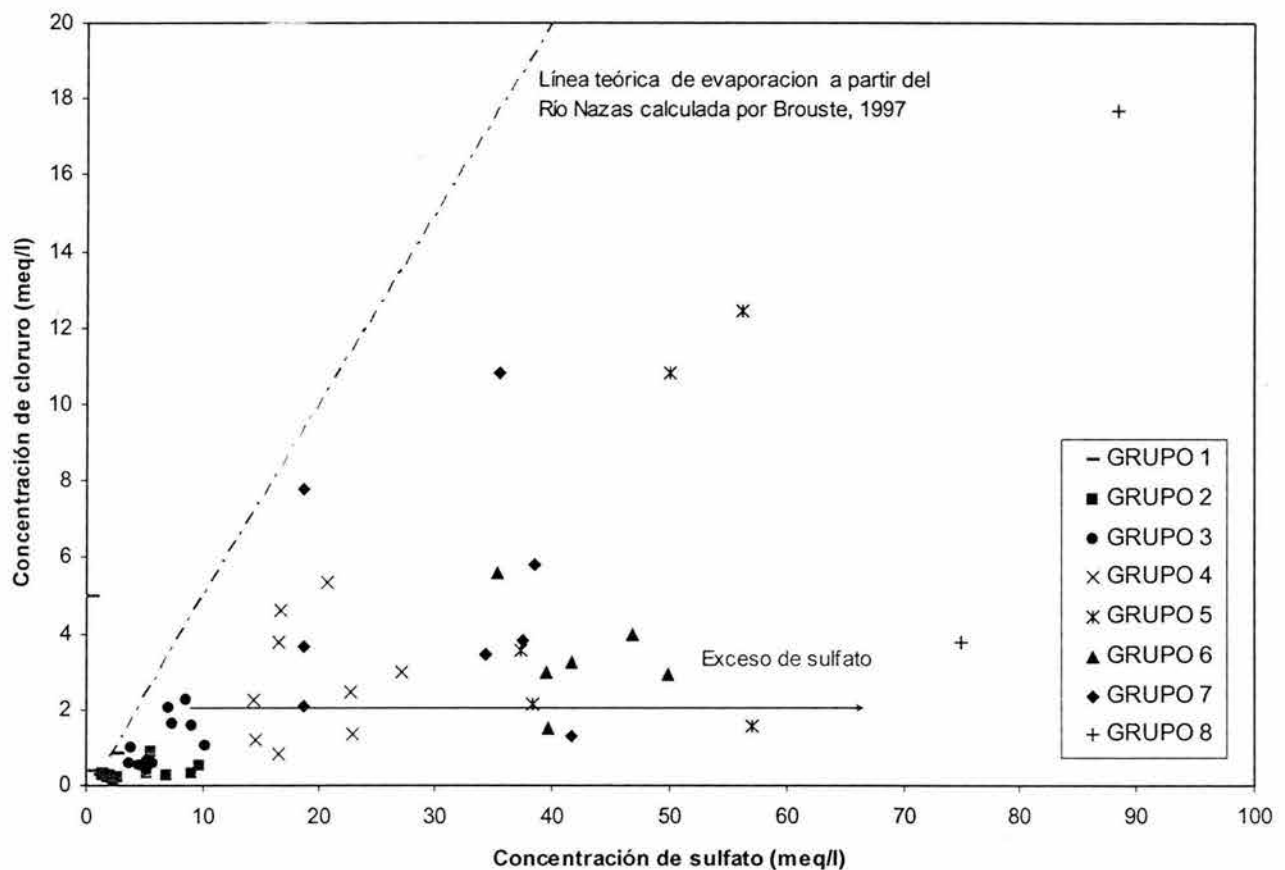
Las muestras Calera, Vergel, 1308, 554, 1722, 632, 1041, 996 también integran el mismo grupo isotópico pero se observan más cercanas a la línea meteórica local, por lo que se infiere que el efecto por evaporación es menor al observado en las demás muestras de este grupo. Los pozos 554, Calera y 1722 se encuentran en las estribaciones de sierras calcáreas, mientras que las muestras 632, 1041, 996 se ubican en la planicie de la Comarca Lagunera; estas muestras presentan una temperatura mayor a 31°C; por lo que podría inferirse flujo profundo cuya zona de recarga haya sido a través del medio fracturado, antes de pasar al medio granular.

El grupo isotópico 3 está conformado por las muestras GP, 1612, 190, 2156, 214 y 212, que se localizan en la porción occidental de la zona de estudio en las estribaciones de la sierra El Sarnoso, donde el agua se infiltra a través de fracturas en las rocas. La recarga a través de fracturas en el medio calcáreo o intrusivo permite una alta velocidad de infiltración, por lo que el efecto de evaporación en estas muestras es mínimo, motivo por el cual estas muestras tienen una composición isotópica parecida al agua superficial del Río Nazas y de la precipitación en la Comarca Lagunera. Ese mismo efecto debido a la infiltración por fracturas se observa en la muestra del pozo 3089, localizado en la sierra calcárea al sureste de la zona de estudio. Las muestras 1992, 3035, 2510, Cepeda, 1915 al norte en la zona de Tlahualilo-Finisterre y la muestra

Desafío en la zona de Matamoros también presentan una composición isotópica muy similar al grupo anterior y se caracteriza por no mostrar efectos de evaporación importantes. Aunque estas muestras no se localizan en las cercanías del medio fracturado, de acuerdo con la información hidrogeoquímica, su temperatura y el contexto hidrogeológico, representan agua de circulación profunda, que podría haber sido recargada en el medio fracturado.

Adicionalmente a las relaciones isotópicas observadas, la información hidrogeoquímica permite inferir que la evaporación no es el único proceso que condiciona la salinidad y la composición química del agua subterránea en la zona de estudio. Por ejemplo en la relación sulfato cloruro presentada en la figura 4.14 se observa que las aguas subterráneas no evolucionan directamente a lo largo de la línea de evaporación del agua superficial del río Nazas, calculada por Brouste *et al* (1997). El exceso de sulfato se explica en el siguiente apartado.

Figura 4.14 Concentración de sulfato contra concentración de cloruro



4.3.2 DISOLUCIÓN DE YESO

En la zona de estudio la concentración de sulfato en el agua subterránea se incrementa notoriamente conforme aumenta la concentración de sólidos totales disueltos, como se muestra en el figura 4.15. Ello es un indicador de que conforme se incrementa la interacción agua-roca, o el tiempo de residencia relativo del agua subterránea la concentración de sulfato aumenta, tal como se observa en la relación litio contra sulfato (figura 4.16). Lo que sugiere la existencia de una fuente de sulfato para toda la zona de estudio. Así mismo la concentración de calcio presenta un comportamiento similar como se observa en la figura 4.17.

Las elevadas concentraciones de sulfato en la zona de estudio hacen pensar en la disolución de yeso como una de las posibles fuentes de este ion, especialmente debido a la presencia de este mineral en las formaciones geológicas que conforman el acuífero; y que podrían explicar las altas concentraciones de sulfato y calcio disueltas en el agua subterránea de la zona de estudio. Aunque cabe mencionar que el calcio también está relacionado con reacciones de disolución-precipitación de carbonatos.

Figura 4.15 Relación entre la concentración de Sólidos Totales Disueltos y sulfato

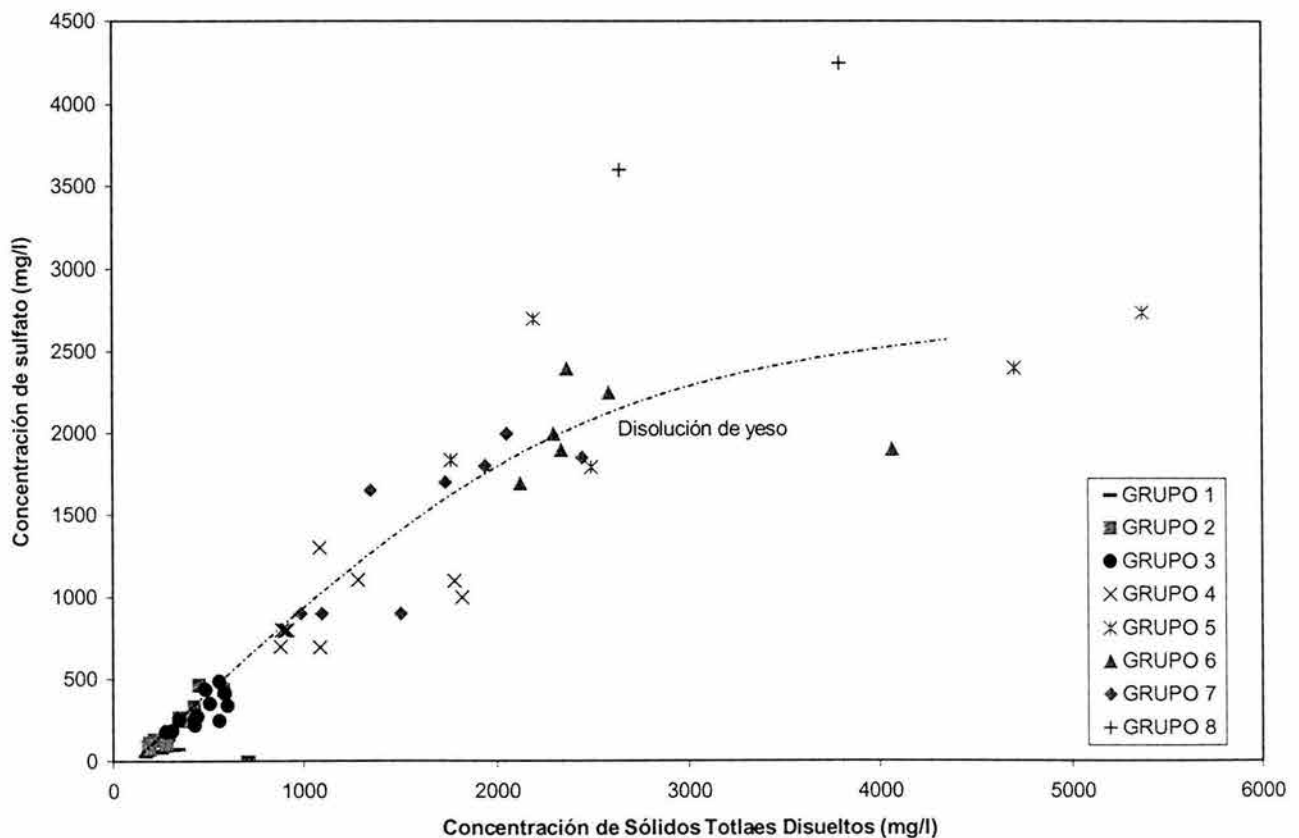


Figura 4.16. Relación entre la concentración de litio y la de sulfato

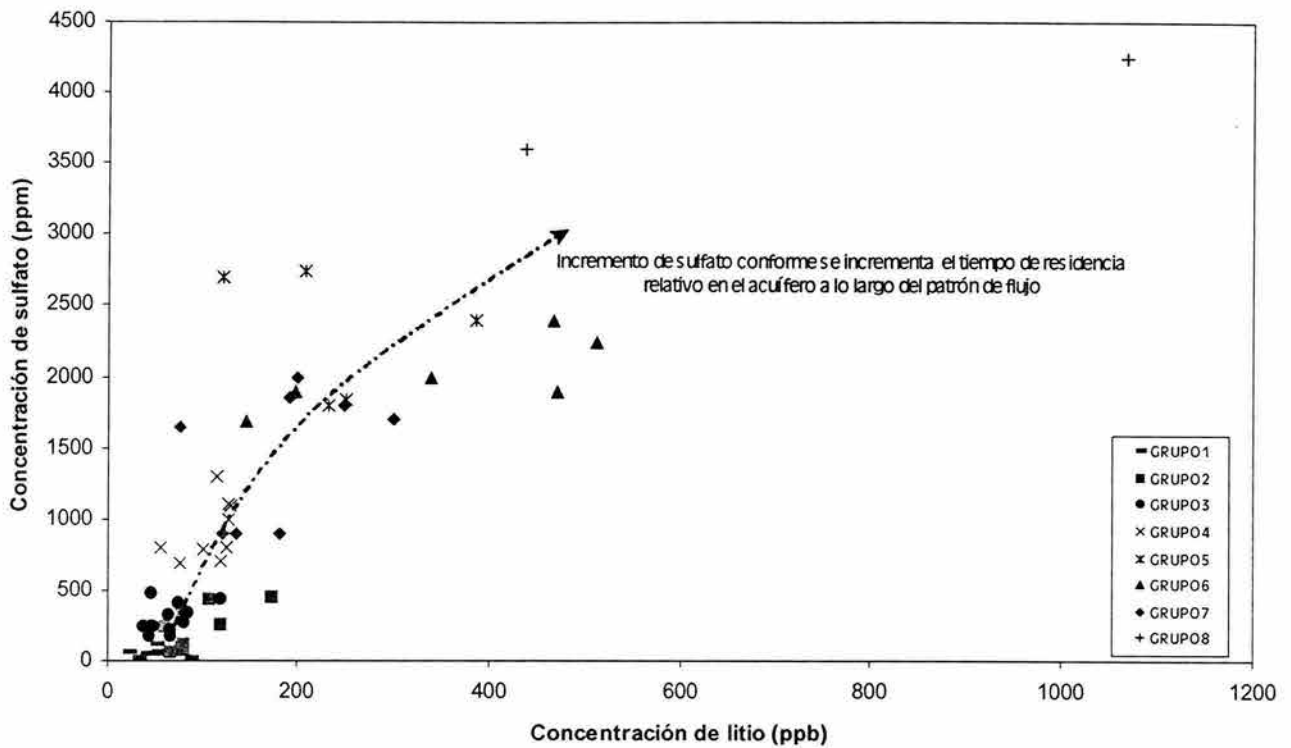
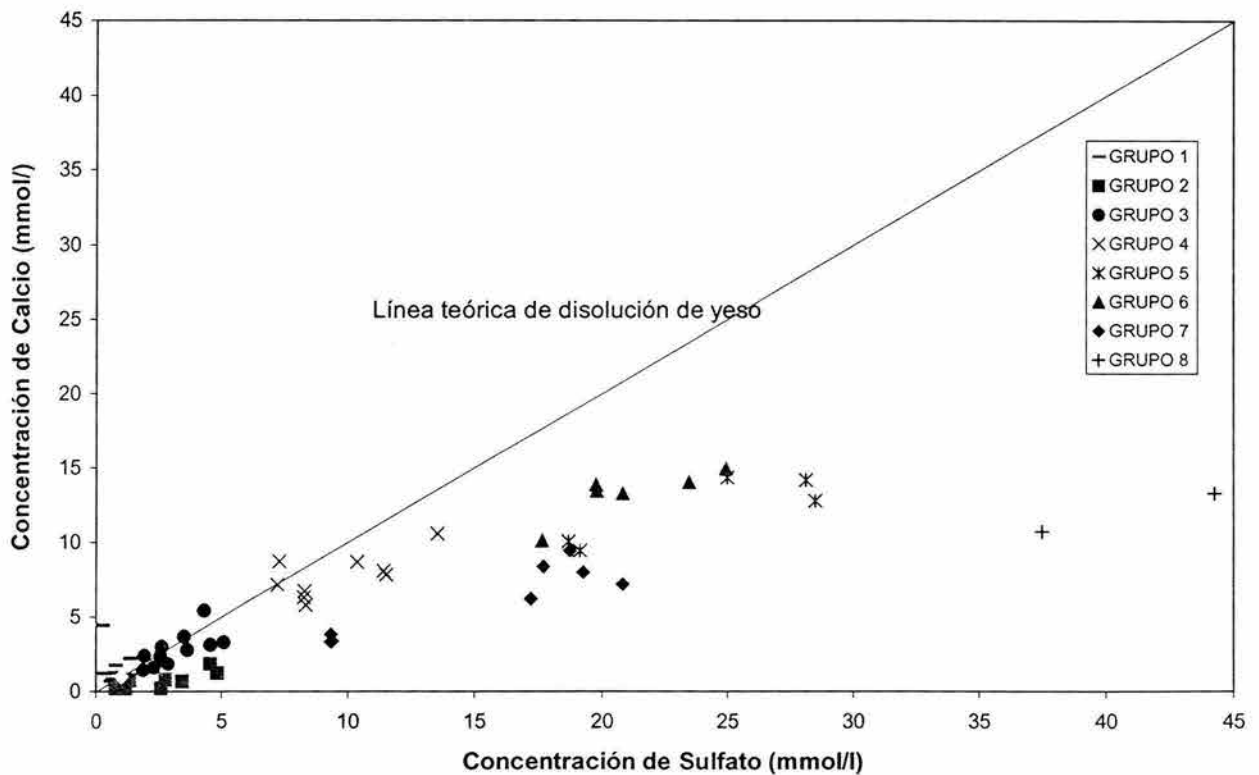
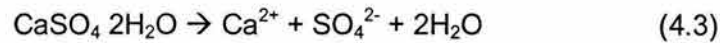


Figura 4.17 Relación entre la concentración de sulfato y calcio



La reacción que define la disolución de yeso o anhidrita es la siguiente (Drever, 1997):



Los índices de saturación con respecto al yeso calculados mediante modelación hidrogeoquímica son menores a cero para la mayoría de las muestras, incrementándose conforme aumenta la salinidad del agua subterránea, tal como se observa en la figura 4.18 y en la tabla 4.4. Los índices de saturación con respecto al yeso indican la subsaturación de este mineral en el agua subterránea, ello confirma que en la mayor parte de la zona de estudio ocurre la disolución del yeso a partir del material geológico que lo contiene y que permite la incorporación de sulfato y calcio al agua subterránea.

Figura 4.18 Relación entre sólidos totales disueltos e índice de saturación con respecto al yeso

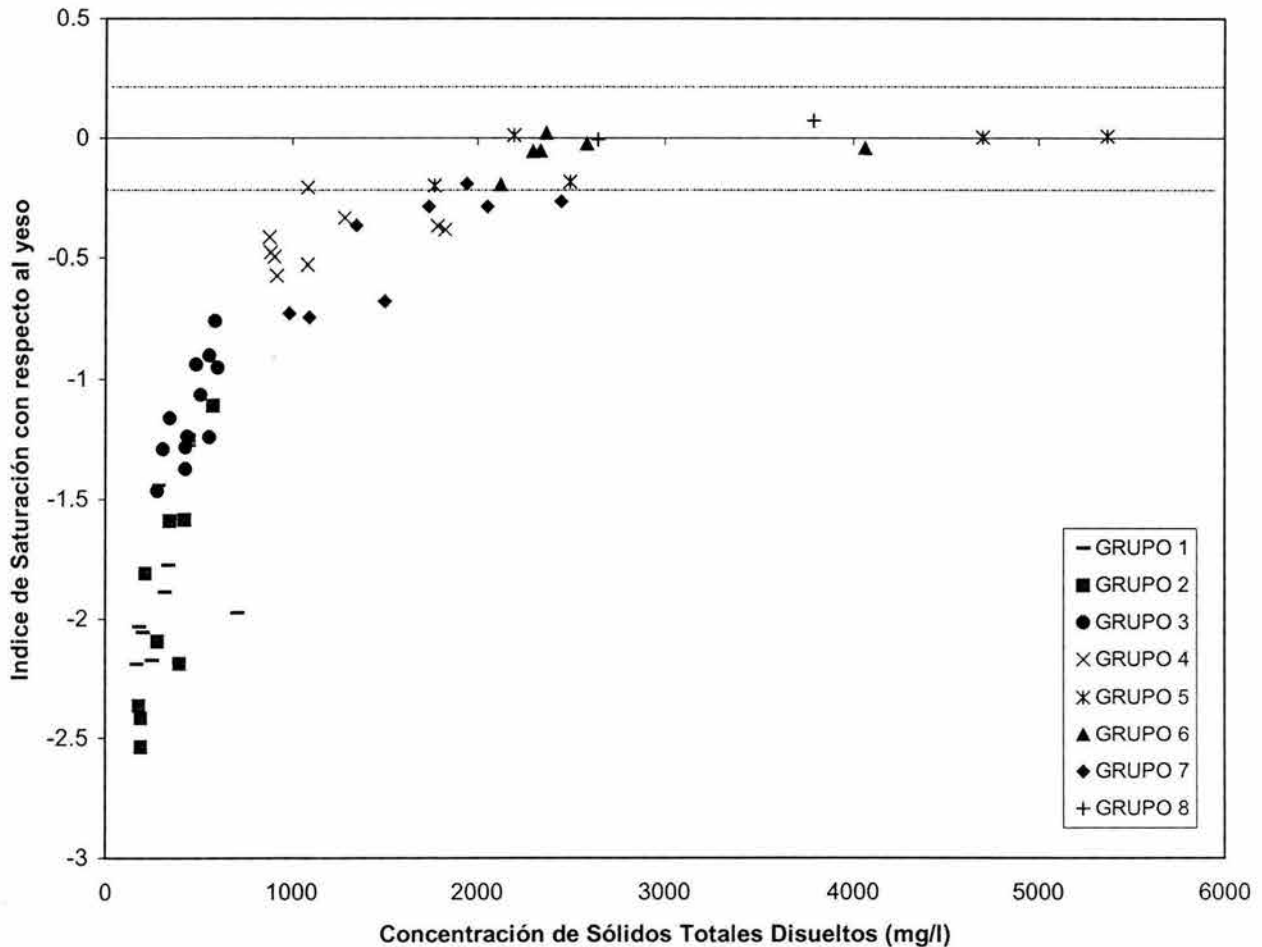
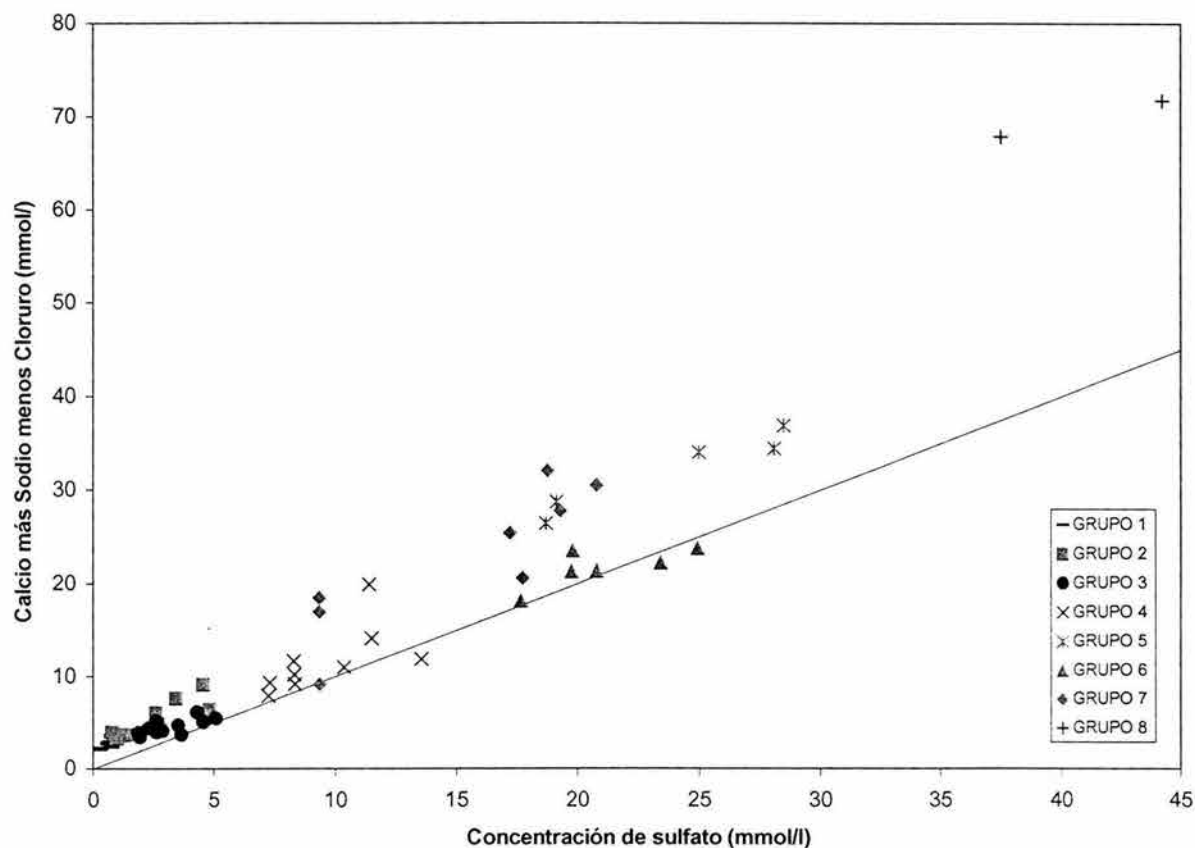


Tabla 4.4. Índices de saturación calculados mediante modelación hidrogeoquímica

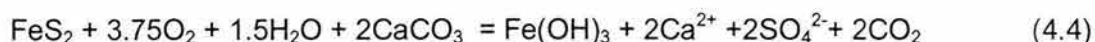
Pozo	Lugar	Yeso	Calcita	Dolomita	Aragonita	Fluorita	Arsenolita	Claudetita	Oropimente	Rejalgar	Scorodita	si_As2O5	si_Pb3AsO4
GRUPO 1													
Pozo s/n	Mpio. Gómez Palacio	-1.7734	-0.014	-0.0493	-0.1529	-1.221	-85.6794	-85.9982	-999.999	-116.8803	-5.1778	-30.1337	-18.0809
Pozo 342	Establo El Tajito	-1.9735	-0.1709	-0.8942	-0.3138	-1.8813	-83.1781	-82.911	-999.999	-113.7977	-7.1272	-30.1016	-20.0651
Pozo 3441	Industria Linamar	-1.4401	-0.261	-1.0814	-0.406	-1.9896	-84.9437	-84.6838	-999.999	-114.8469	-6.3161	-30.9687	-18.9492
Pozo 774	Establo La Partida	-2.1867	0.2467	-0.2583	0.1043	-1.7651	-92.8184	-92.5495	-999.999	-121.4298	-7.5706	-33.5978	-18.7567
Pozo 347	Establo cerca de La Unión	-1.887	-0.3939	-1.081	-0.5375	-2.2419	-85.048	-84.7835	-999.999	-117.781	-5.5813	-29.69	-18.6995
Pozo 2345	Ejido Arcinas	-2.1713	0.2137	0.321	0.0743	-1.797	-92.1631	-91.8836	-999.999	-120.8409	-6.9034	-33.1711	-18.5866
Pozo 808	San Miguel	-2.0545	-0.1493	-0.6797	-0.29	-2.5571	-88.01	-87.7349	-999.999	-116.0786	-6.9973	-32.4767	-17.9299
Pozo s/n	Establo El Carmen	-2.0322	-0.0179	-0.5971	-0.1566	-2.0925	-89.566	-89.2841	-999.999	-118.2783	-7.2146	-32.2619	-18.7058
GRUPO 2													
Pozo s/n	Establo Desafío	-2.5365	0.1105	0.3537	-0.0275	-1.6032	-91.3642	-91.0795	-999.999	-120.0325	-6.7711	-33.1624	-16.5988
Pozo 2510	Establo Providencia del No	-2.1852	-0.0857	-0.2716	-0.2297	-3.1096	-93.2205	-92.957	-999.999	-125.322	-6.4485	-32.3597	-15.8401
Pozo 1992	Cantabro Progreso	-1.5841	0.0142	-0.4824	-0.1297	-2.474	-91.026	-90.7625	-999.999	-122.8355	-6.1468	-31.7984	-16.9694
Pozo 1041	Ejido Yucatán	-2.4151	0.1133	-0.2609	-0.0243	-2.7159	-96.8943	-96.6085	-999.999	-126.2202	-8.9684	-33.7832	-16.7901
Pozo 1040	Establo Buena Vista	-1.808	0.1326	-0.2376	-0.0077	-1.475	-94.7313	-94.455	-999.999	-124.2534	-7.3807	-33.2228	-17.3049
Pozo 996	El Rosario	-2.3605	0.1824	0.5522	0.0426	-2.3386	-99.0236	-98.7456	-999.999	-128.0522	-8.3863	-34.6243	-16.9523
Pozo s/n	Cepeda, Tlah.	-1.1091	0.1605	-0.043	0.0178	-0.1738	-82.9741	-82.7062	-999.999	-113.5951	-4.9421	-30.5664	-15.107
Pozo 2002	Ejido Gabino Vázquez (San	-1.2513	-0.4532	-0.9835	-0.5952	-1.4969	-73.5383	-73.268	-999.999	-99.7264	-6.1373	-30.5084	-17.0949
Pozo 632	Establo El Lucero	-2.0926	0.4125	0.9534	0.274	-1.1664	-94.6511	-94.3681	-999.999	-123.6717	-7.7627	-33.5764	-16.3787
Pozo 1198	Pequeña Propiedad El Refu	-1.5886	-0.3102	-0.681	-0.4545	-1.496	-82.3426	-82.0804	-999.999	-112.1755	-6.1184	-30.9422	-17.5934
GRUPO 3													
Pozo 214	Granja La Providencia	-1.2416	0.1519	0.3372	0.0128	-1.198	-87.2617	-86.9812	-999.999	-117.7767	-6.2499	-30.6281	-17.9769
Pozo 212	Rancho San Martín	-1.162	-0.0857	-0.1401	-0.2253	-1.0159	-83.3931	-83.1146	-999.999	-114.2804	-5.8114	-29.6588	-17.958
Pozo 190	Rancho Bercial	-0.9374	0.1135	0.0768	-0.0276	-0.4684	-85.8926	-85.619	-999.999	-117.2522	-5.0228	-30.1704	-17.5068
Pozo 3749	Ejido Roma - Texas	-1.2842	0.0692	0.2258	-0.0735	-1.4916	-90.662	-90.3942	-999.999	-120.3093	-6.543	-32.0224	-18.9127
Pozo 274	Ejido California	-1.2901	0.1199	-0.0841	-0.022	-1.6446	-88.9126	-88.642	-999.999	-117.291	-7.0501	-32.3979	-18.367
Pozo 963	Establo Huitron	-1.3719	0.0516	-0.1407	-0.09	-1.4312	-88.3495	-88.0779	-999.999	-118.1054	-6.5344	-31.7103	-16.5429
Pozo 1533	San Esteban	-1.464	0.0092	-0.2971	-0.1319	-0.8786	-84.5275	-84.2539	-999.999	-110.4065	-6.8744	-32.9397	-18.6509
Pozo 1579		-1.2391	0.17	0.1451	0.0287	-0.5248	-84.6115	-84.3389	-999.999	-115.1778	-6.255	-30.7834	-15.511
Pozo 250	Predio Santa Rita	-0.7587	0.0104	-0.6154	-0.1345	-1.7524	-86.23	-85.9699	-999.999	-115.5174	-6.3065	-31.2459	-20.7408
Pozo 1243	Rancho Noacan	-1.0648	-0.3015	-0.5697	-0.4442	-0.6982	-83.5689	-83.3011	-999.999	-113.4299	-6.4586	-30.4598	-18.1912
Pozo 2156	Rancho Las Palmas	-0.9006	-0.0028	-0.0355	-0.1431	-1.0729	-85.4315	-85.1554	-999.999	-116.4382	-6.0639	-29.9704	-16.8473
Pozo 1624	12 de diciembre	-0.9506	0.0934	-0.218	-0.0476	-1.6946	-86.2566	-85.9828	-999.999	-113.3334	-7.0692	-32.255	-18.0426
GRUPO 4													
Pozo s/n	Establo El Coyote	-0.4114	-0.1122	-1.6676	-0.2538	-1.7372	-84.2366	-83.965	-999.999	-111.9078	-6.4903	-31.274	-19.1678
Pozo s/n	Vergel	-0.5269	-0.109	-0.5464	-0.2534	-1.3003	-85.2385	-84.9768	-999.999	-115.8749	-5.7782	-30.3223	-16.139
Pozo s/n	Granja Avícola Los Angeles	-0.365	0.425	0.1561	0.2814	-1.2929	-86.0035	-85.7389	-999.999	-116.9179	-5.7627	-30.4082	-18.7659
Pozo 247	Establo Santa Teresa	-0.2052	0.6235	0.5765	0.4797	-1.7028	-91.8704	-91.6064	-999.999	-119.059	-7.889	-33.2652	-19.234
Pozo 1500	La Palma	-0.3317	0.1251	-0.8153	-0.0157	-0.8777	-89.8174	-89.5428	-999.999	-120.6935	-6.8046	-31.1714	-15.5366
Pozo 2149	San Judas	-0.4954	0.029	-0.7793	-0.1113	-0.7071	-88.5286	-88.2523	-999.999	-119.4034	-6.0883	-30.8297	-16.6886
Pozo 1612	Las Cármenes	-0.5717	0.0833	-0.0943	-0.0578	-1.1383	-85.6354	-85.3621	-999.999	-116.1089	-5.6183	-30.3154	-18.6137
Pozo 608	Las Teresitas	-0.4757	0.2041	-0.5311	0.0624	-0.4019	-84.6197	-84.3484	-999.999	-113.6933	-6.2999	-31.2591	-14.8577
Pozo 1308	Santa María de Berlín	-0.3814	0.1472	0.0168	0.0045	-0.2574	-88.3699	-88.1018	-999.999	-118.819	-6.0932	-30.9189	-17.1617
GRUPO 5													
Pozo 3089	Ejido Villa de Bilbao	0.012	-0.0981	-0.8959	-0.23	-0.2567	-59.0784	-58.7722	-999.999	-81.6718	-5.6416	-27.9237	-15.6153
Pozo 2760	La Espada	-0.1967	0.2338	0.1127	0.0929	-1.1816	-85.0441	-84.77	-999.999	-115.9716	-5.9673	-29.9599	-15.118
Pozo 1571	Rancho La Rosita	-0.1812	0.1354	-0.024	-0.0072	-0.4228	-85.1845	-84.9164	-999.999	-117.7918	-5.1931	-29.3265	-15.5364
Pozo 2152	Tacubaya (Santo Domingo)	0.0104	-0.1596	-0.7775	-0.3038	-0.7508	-80.8668	-80.6043	-999.999	-110.6737	-5.1033	-29.8912	-16.8645
Pozo 1915	Noria la 4	0.0043	0.1089	-0.4267	-0.0321	-0.4342	-87.4134	-87.1398	-999.999	-118.001	-6.2931	-30.6277	-15.8762
GRUPO 6													
Pozo 554	Peñoles Bermejillo	0.0216	0.2366	0.2232	0.0961	0.0736	-80.6381	-80.3623	-999.999	-113.0873	-4.1375	-28.3555	-13.7414
Pozo 54	Granja Ideal	-0.1921	0.0449	-0.159	-0.0978	-0.9845	-85.2474	-84.9799	-999.999	-116.1078	-5.4177	-30.0253	-14.1438
Pozo 2745	San Isidro, GP	-0.0526	0.0878	-0.1381	-0.0545	-0.9085	-81.5728	-81.3037	-999.999	-115.7667	-3.9193	-27.8901	-14.0068
Pozo 1722	Bermejillo	-0.0524	0.102	-0.2664	-0.0322	0.0998	-64.1366	-63.8384	-999.999	-90.954	-4.3239	-27.1358	-13.8767
Pozo 1477	Nombre de Dios	-0.0235	0.0435	-0.0589	-0.0991	-0.3749	-80.1762	-79.9083	-999.999	-113.1497	-4.5158	-28.1961	-15.805
Pozo 1323	Rancho Nuevo Texas	-0.0416	-0.0028	-0.4598	-0.1474	-0.8327	-79.3793	-79.1184	-999.999	-111.6639	-4.8292	-28.6509	-16.3598
GRUPO 7													
Pozo1186	Rancho Ciprés Matamoros	-0.2828	-0.0553	-0.2392	-0.198	-0.8756	-84.4673	-84.1993	-999.999	-112.5524	-6.3205	-31.1841	-19.026
Pozo 581	Tierras Bajas	-0.2845	-0.0215	-0.2046	-0.1632	-1.1772	-80.1123	-79.8407	-999.999	-108.5636	-5.7531	-30.2884	-17.4566
Pozo 3035	El Capulín, Tlah.	-0.6767	0.2093	-0.0532	0.0657	-0.1253	-83.3104	-83.0458	-999.999	-115.3035	-5.306	-29.8536	-15.1595
Pozo 1030	Las Arcadias	-0.2626	0.2338	0.0392	0.0955	-1.2169	-92.3493	-92.0661	-999.999	-121.7134	-6.7971	-31.7213	-16.7685
Pozo 2670	Campo Sagrado	-0.7426	-0.1851	-0.441	-0.3281	-0.9729	-84.758	-84.4912	-999.999	-113.6809	-6.7235	-31.2655	-16.9231
Pozo Calera	Calera en Torreón	-0.3625	-0.128	-0.6952	-0.2712	-1.6536	-83.5382	-83.2721	-999.999	-114.235	-6.1503	-30.009	-15.6077
Pozo s/n	Establo El Pilar	-0.7275	0.3702	0.0812	0.2295	-0.2749	-86.3757	-86.1006	-999.999	-116.1945	-6.5269	-31.22	-16.7686
Pozo 762	Rancho Maravillas	-0.1881	0.1744	-0.5177	0.032	-0.6448	-88.7111	-88.4422	-999.999	-120.0581	-6.4785	-30.6849	-15.7297
GRUPO 8													
Zona inundada	Cementerio Del Carmen	-0.0064	0.8075	0.7157	0.6569	-0.9484	-95.6171	-95.3777	-999.999	-125.9549	-7.298	-33.813	-15.4957
Zona inundada	Relleno Sanitario Torreón	0.0724	1.079	1.3996	0.9318	0.4421	-96.6379	-96.3861	-999.999	-125.9597	-6.6151	-34.1269	-14.5853

De acuerdo con la expresión 4.3 la disolución del yeso o de anhidrita indica que por cada mol de yeso disuelto se genera una mol de calcio y una mol de sulfato en el agua subterránea, por lo que la línea de disolución teórica en la relación sulfato contra calcio es una línea recta con pendiente de 1. En la figura 4.17 se presenta la relación de la concentración de calcio contra la de sulfato; en ella se observa que algunas muestras tienen mayor concentración de sulfato con respecto al calcio de acuerdo con la línea teórica de disolución de yeso, sin embargo si se considera que en algunas de las muestras el proceso de intercambio catiónico, que se describirá más adelante, produce la disminución de calcio y el aumento de sodio, la tendencia se asemeja más a la línea teórica de disolución de yeso. Para observar este comportamiento en la gráfica 4.19 se presenta la relación sulfato contra calcio más sodio menos cloruro, restando el efecto del sodio proveniente de reacciones de evaporación.

Figura 4.19. Relación entre la concentración de sulfato contra calcio más sodio menos cloruro



Las altas concentraciones de sulfato y calcio también pueden provenir de la oxidación de la pirita (FeS_2) y reacción con la calcita, como se muestra en la ecuación 4.4:



Sin embargo en gran parte de la zona de estudio las condiciones parecen ser más reductoras que oxidantes, adicionalmente al hecho de que se tienen evidencias de importantes cantidades de yeso en el subsuelo y no así de pirita. Sin embargo sólo con relaciones isotópicas del azufre, sería posible definir con mayor certidumbre la ocurrencia de las reacciones de oxidación de pirita.

4.3.3 EQUILIBRIO CON RESPECTO A LA CALCITA Y LA DOLOMITA

Debido a las características geológicas de la zona de estudio, la calcita, dolomita, así como el yeso son minerales abundantes en el acuífero en estudio, por ello es de esperarse que la composición química del agua subterránea se vea influenciada por los procesos de disolución-precipitación de dichos minerales.

La disolución de calcita y dolomita requiere de una fuente suficiente de CO₂, que generalmente se origina a partir de la descomposición de la materia orgánica y la respiración de las plantas en la zona del suelo, por lo que es disuelto por el agua subterránea durante el proceso de recarga natural. Los valores de presión parcial para el CO₂, calculados mediante la modelación hidrogeoquímica realizada, en general varían entre 10^{-1.5} y 10^{-2.5} atm, lo que sugiere que el origen del CO₂ es la zona del suelo.

La disolución de calcita y dolomita a partir de agua con dióxido de carbono puede escribirse de la siguiente manera:

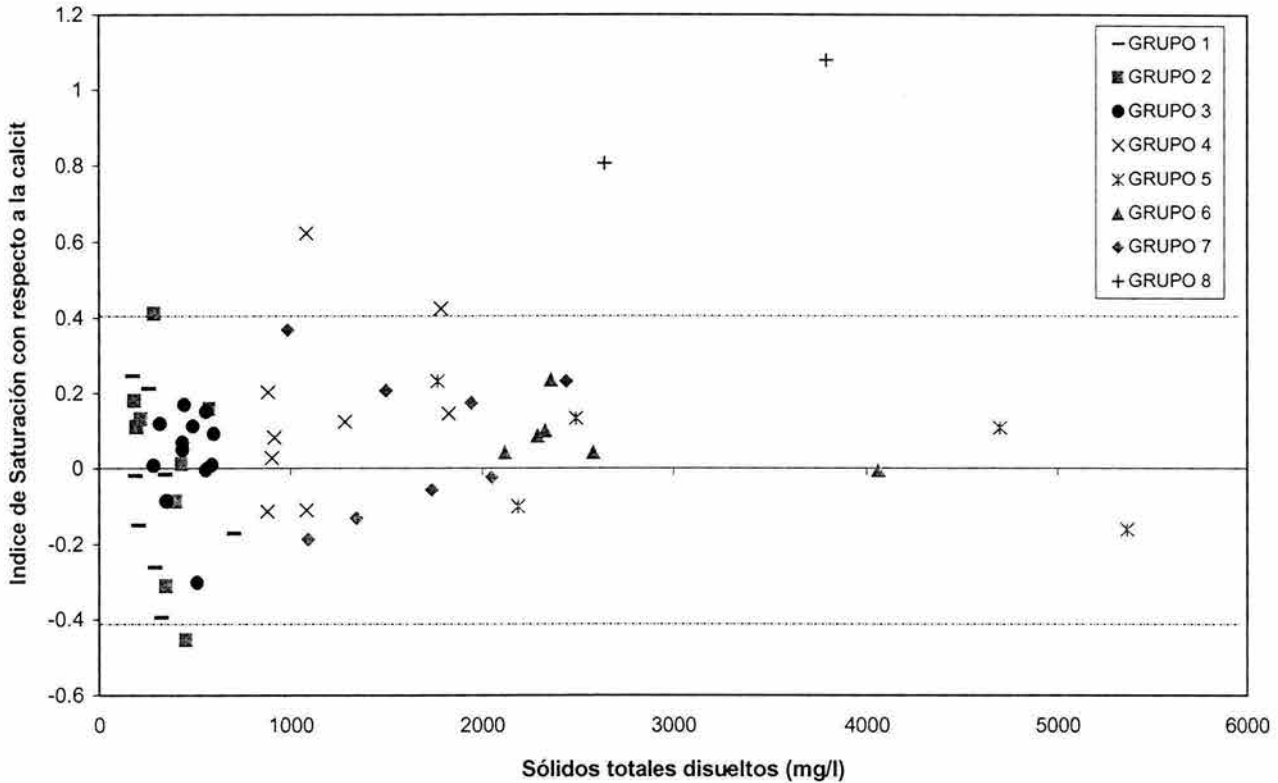


En sistemas compuestos por minerales carbonatados, los índices de saturación para la calcita y dolomita generalmente no presentan relación con la salinidad del agua subterránea.

Jenne *et al* (1980) observaron que la varianza en los índices de saturación alrededor del valor cero (en equilibrio) con determinado mineral, se incrementa con el valor de la constante de solubilidad para ese sólido. Ellos determinaron que un valor del 5% del logaritmo del producto de solubilidad de un mineral ($\pm 5\% \times \log K_f$), representa una banda de error, en la que para efectos prácticos el agua puede considerarse que está en equilibrio con dicho mineral. De acuerdo con lo anterior en las gráficas relacionadas con Índices de saturación que se presenten en este trabajo se indicará esta franja de equilibrio para efectos prácticos, con una línea punteada arriba y abajo del valor de $\log \text{PAI}/K_f=0$.

Prácticamente la totalidad del agua subterránea analizada para la zona de estudio se encuentra dentro de la franja de equilibrio con respecto a los minerales de calcita, dolomita y aragonita, tal como se observa en las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 y en la tabla 4.3. Esta situación puede considerarse como un indicio de que la geoquímica de carbonatos puede ser clave en el control del calcio, magnesio y bicarbonato en el agua subterránea de la zona de estudio.

Figura 4.20 Índices de Saturación con respecto a la calcita



Adicionalmente, la investigación realizada por Brouste *et al* (1997), señala con base en estudios isotópicos de ^{13}C en CO_2 en equilibrio con el carbono inorgánico disuelto total, que existen dos orígenes para el carbono inorgánico presente en las aguas subterráneas de la Región Lagunera: uno relacionado al CO_2 de la zona del suelo ($\delta^{13}\text{C}$ entre -27.7 y 21.7‰), y otro proveniente de la disolución de carbonatos ($\delta^{13}\text{C}=+0.9\text{‰}$). Ello implica que los isótopos estables de carbono corroboran las reacciones de disolución de carbonatos, previstas por el análisis hidrogeoquímico, así como el origen del CO_2 que promueve dicha disolución.

Figura 4.21.- Índice de saturación con respecto a la dolomita

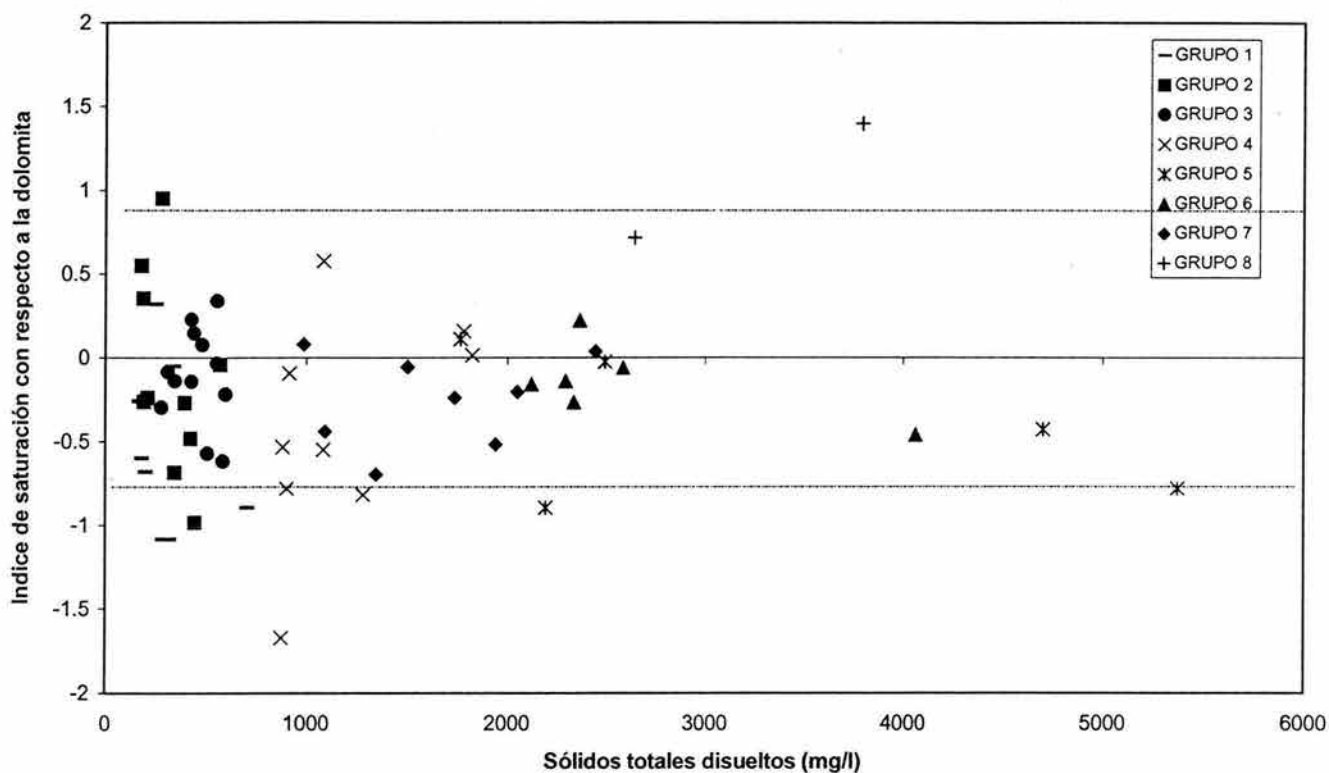
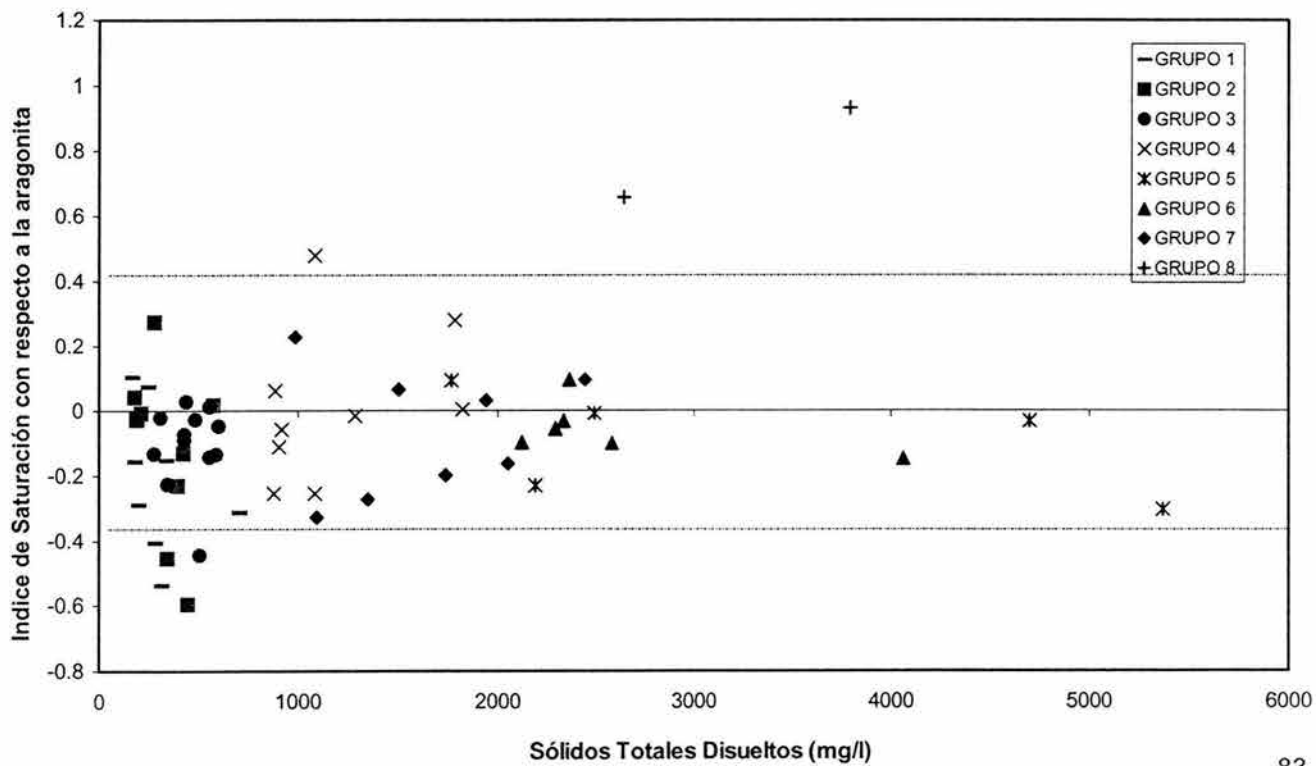


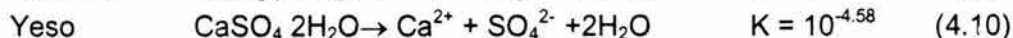
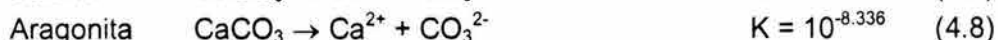
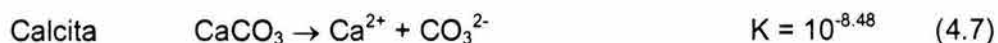
Figura 4.22 Índice de saturación con respecto a la aragonita



4.3.4 PROCESO DE DEDOLOMITIZACIÓN

La dedolomitización es un proceso geoquímico que puede presentarse en acuíferos compuestos por rocas calcáreas con calcita y dolomita y que además cuentan con la presencia de horizontes de yeso o anhidrita (Back y Hanshaw, 1970; Plummer *et al* 1990; entre otros). En la Comarca Lagunera existen las condiciones geológicas e hidrogeoquímicas para que se desencadene el fenómeno de dedolomitización; ya que existen formaciones calcáreas ampliamente distribuidas dentro de la zona de estudio y que forman parte del acuífero definido; el yeso también está presente en cantidades menores en las rocas calcáreas y en forma independiente en otras formaciones. Estas condiciones producen que el material sedimentario que integra la porción granular del acuífero, contenga clastos calcáreos y de evaporitas.

Appelo y Postma (1993) describen ampliamente las bases teóricas del proceso de dedolomitización. En forma general la dedolomitización es producida por el efecto del calcio como ión común, y por las diferencias entre las solubilidades de los minerales involucrados: yeso o anhidrita, dolomita y calcita (ecuaciones 4.7 a 4.11). En el proceso de dedolomitización, como resultado de la disolución del yeso o la anhidrita, la dolomita se disuelve y la calcita precipita.



En los apartados previos se ha evidenciado la ocurrencia de disolución del yeso, así como el equilibrio con respecto a calcita y dolomita en el agua subterránea de la zona de estudio.

Cuando el agua subterránea que circula en un medio calcáreo se encuentra en equilibrio con relación a la calcita y dolomita, la concentración de calcio y magnesio está controlada por la siguiente reacción:

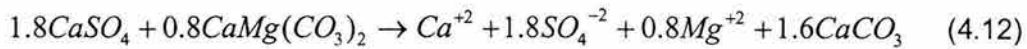


Si el equilibrio se mantiene, la relación $(\text{Mg}^{+2})/(\text{Ca}^{+2})$ debe permanecer aproximadamente constante e igual a 0.8 :

$$K_{eq} = \frac{(\text{Mg}^{+2})}{(\text{Ca}^{+2})} = \frac{K_{dolomita}}{(K_{calcita})^2} = \frac{10^{-17.09}}{(10^{-8.48})^2} = 0.8$$

El incremento en la concentración de calcio debido a la disolución de yeso, ocasiona la precipitación de la calcita por el efecto de ion común. Conforme la calcita precipita se disminuye la alcalinidad; ello provoca que el agua subterránea se torne subsaturada con relación a la dolomita, por lo que se provoca la disolución de dolomita y el consiguiente incremento de magnesio. El resultado final de estas reacciones es que la disolución de yeso induce la transformación de dolomita en calcita en el material geológico, y se genera agua subterránea con concentraciones de magnesio, calcio y sulfato incrementadas y con la alcalinidad disminuida.

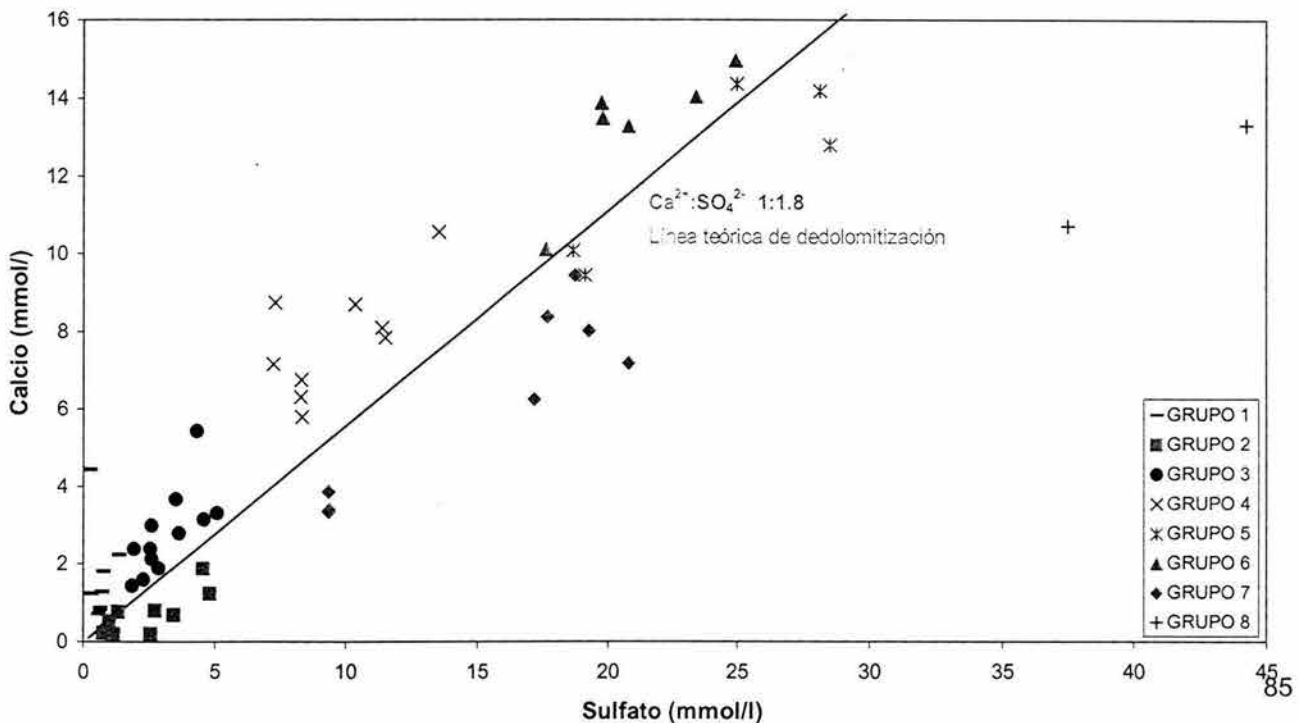
Cuando el equilibrio con respecto a la calcita y la dolomita se mantiene, la relación entre el magnesio y el calcio debe permanecer cercana a 0.8. Por lo tanto, la transferencia de masa total está dada por la reacción 4.12. (Appelo y Postma ,1993):



De acuerdo con la estequiometría de la reacción anterior, 2 moles de calcita precipitan por cada mol de dolomita que se disuelve. Así mismo las concentraciones de sulfato deben incrementarse en forma paralela con las concentraciones de magnesio y calcio; desde un punto de vista teórico y en ausencia de otras reacciones y/o procesos la relación molar Ca:SO₄ debe ser 1:1.8.

En la figura 4.23 se presenta la relación entre calcio y sulfato, en la que se observa que los datos obtenidos por este trabajo se distribuyen cercanos a la línea teórica del proceso de dedolomitización, lo que sugiere que este proceso se desarrolla en la zona de estudio.

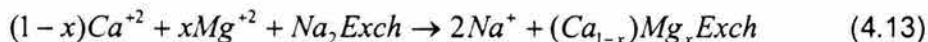
Figura 4.23 Relación calcio sulfato conforme a la línea teórica de dedolomitización



4.3.5 INTERCAMBIO CATIONICO

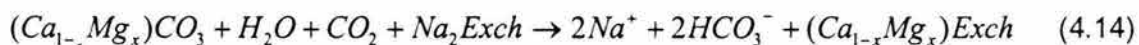
El incremento de la concentración de sodio sin un aumento substancial de la concentración de cloruro puede ser ocasionado por el intercambio catiónico de calcio y magnesio por sodio, proceso que se desarrolla en las superficies de minerales arcillosos (Freeze y Cherry, 1979), como los que se observan en algunas áreas de la zona de estudio.

El agua subterránea en la que la concentración relativa de sodio es elevada, puede originarse a partir de aguas cálcicas-magnésicas en las que haya ocurrido el proceso de intercambio catiónico en las superficies de minerales arcillosos de acuerdo con la siguiente reacción:



En la que $0 \leq x \leq 1$.

En un medio geológico en que abundan minerales carbonatados y/o evaporíticos, como en la zona de estudio, el proceso de intercambio catiónico puede acompañarse de disolución de calcita, dolomita y/o yeso. La combinación de la ecuación 4.13 con la disolución de calcita y dolomita resulta en la siguiente reacción:

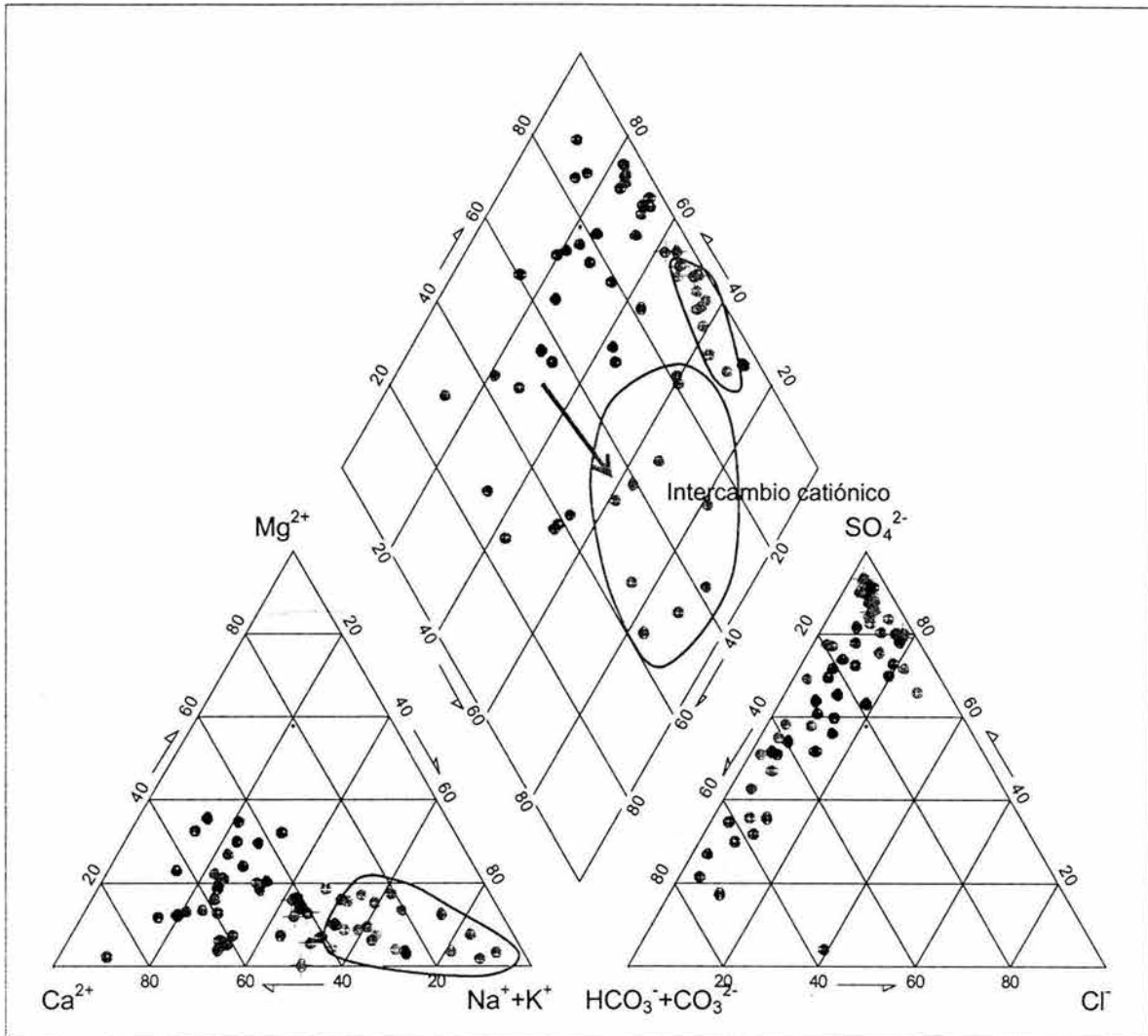


El diagrama de Piper mostrado en la figura 4.24, permiten suponer la existencia del proceso de intercambio catiónico en algunas de las muestras de la zona de estudio. Las muestras pertenecientes a los grupos 2 y 7 ocupan en el diagrama de Piper una posición que indica un mayor contenido relativo de sodio en comparación con el resto de las muestras.

Las muestras pertenecientes al Grupo 2 tienen mayores concentraciones de sodio y menores concentraciones de calcio con respecto al grupo 1, tal como se observa en las figuras 4.25 y 4.26. Las altas concentraciones relativas de sodio y las bajas concentraciones de calcio que caracterizan al agua subterránea del grupo 2, permiten suponer que reacciones de intercambio catiónico podrían originar la composición química del agua subterránea en esta parte de la zona de estudio. Esta misma situación ocurre para el agua del grupo 7.

Las muestras que integran al grupo 2 se distribuyen geográficamente en la porción norte de la zona de estudio, entre los poblados de Finisterre y El Lucero (muestras 2510, 1992, 632, 1041, 963, 1040 y 996) y al sureste de Matamoros (muestras Desafío, 1198 y 2002). Ambas zonas corresponden geológicamente a sedimentos lacustres y de planicies de inundación y se caracterizan por ser altamente arcillosas, tal como puede observarse en la descripción de la geología del subsuelo y en las secciones geológicas presentadas en el capítulo 1.

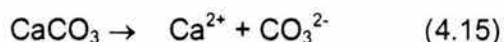
Figura 4.24 Diagrama de Piper mostrando el intercambio catiónico



- GRUPO 1
- GRUPO 2
- GRUPO 3
- GRUPO 4
- GRUPO 5
- GRUPO 6
- GRUPO 7
- GRUPO 8

De acuerdo con las reacciones 4.13 y 4.14, en las muestras de los grupos 2 y 7, el proceso de intercambio tiende a disminuir las concentraciones de calcio y magnesio y a incrementar las de sodio. En las Figuras 4.27 y 4.28 se presenta una relación entre estas variables, tomando como unidades miliequivalentes. Al sodio se le resta la concentración de cloruro para limitar la influencia del sodio derivado del cloruro de sodio. En la Figura 4.28 se presenta una visión más detallada de la figura 4.27, ya que por razones de escala en la última no es posible identificar la tendencia que presentan las muestras con menor salinidad.

En la medida de que el calcio, magnesio y estroncio son removidos de la solución y reemplazados por sodio y potasio debido al proceso de intercambio catiónico, la solución se torna subsaturada con relación a la calcita y dolomita. Situación que permite que se disuelvan nuevamente estos carbonatos, produciendo más calcio y magnesio; lo que ocasiona un nuevo intercambio con sodio y como resultado un incremento neto de bicarbonato y por lo tanto de pH, de acuerdo con las reacciones 4.15 y 4.16.



En las dos zonas geográficas representadas por el grupo 2 el agua subterránea se caracteriza por tener un pH alcalino, mayor a 8. Lo que confirma la existencia de las reacciones de intercambio catiónico, que aunadas a la disolución de carbonatos, propician el incremento del pH observado en la zona.

Las muestras 2002, Cepeda y 1198 son las que presentan una concentración relativa de sodio menor, en comparación con el resto de las muestras del grupo 2; así mismo estas muestras presentan un pH ligeramente menos básico, ya que es menor a 8. Ello implica o que se trata de agua de mezcla con agua de otros grupos, o bien que el intercambio catiónico ocurrió con menor intensidad.

Las reacciones de intercambio catiónico, aunadas a la disolución de carbonatos tienen gran importancia en esta porción del acuífero, debido a que favorecen el incremento del pH, y este a su vez es importante en la movilización del arsénico como se explicará más adelante.

Figura 4.25 Relación sólidos totales disueltos contra sodio

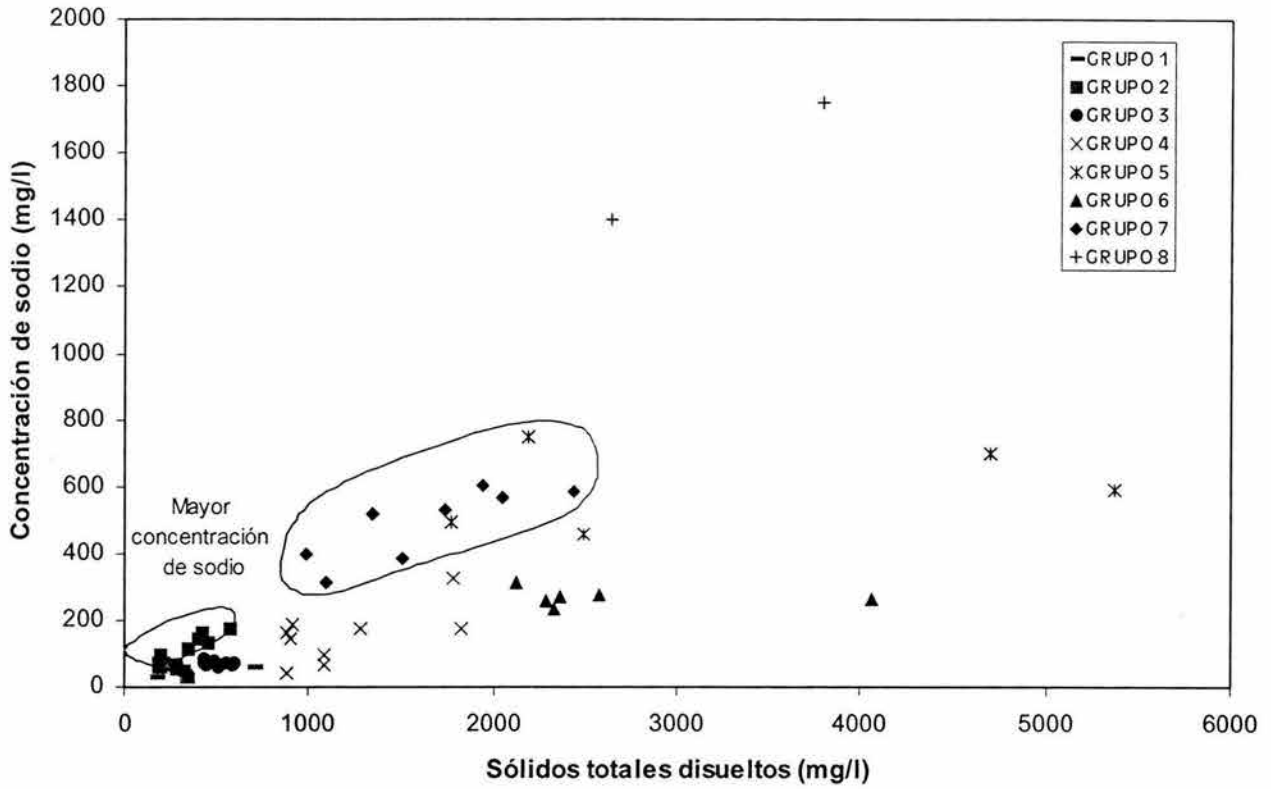


Figura 4.26 Relación de sólidos totales disueltos contra calcio

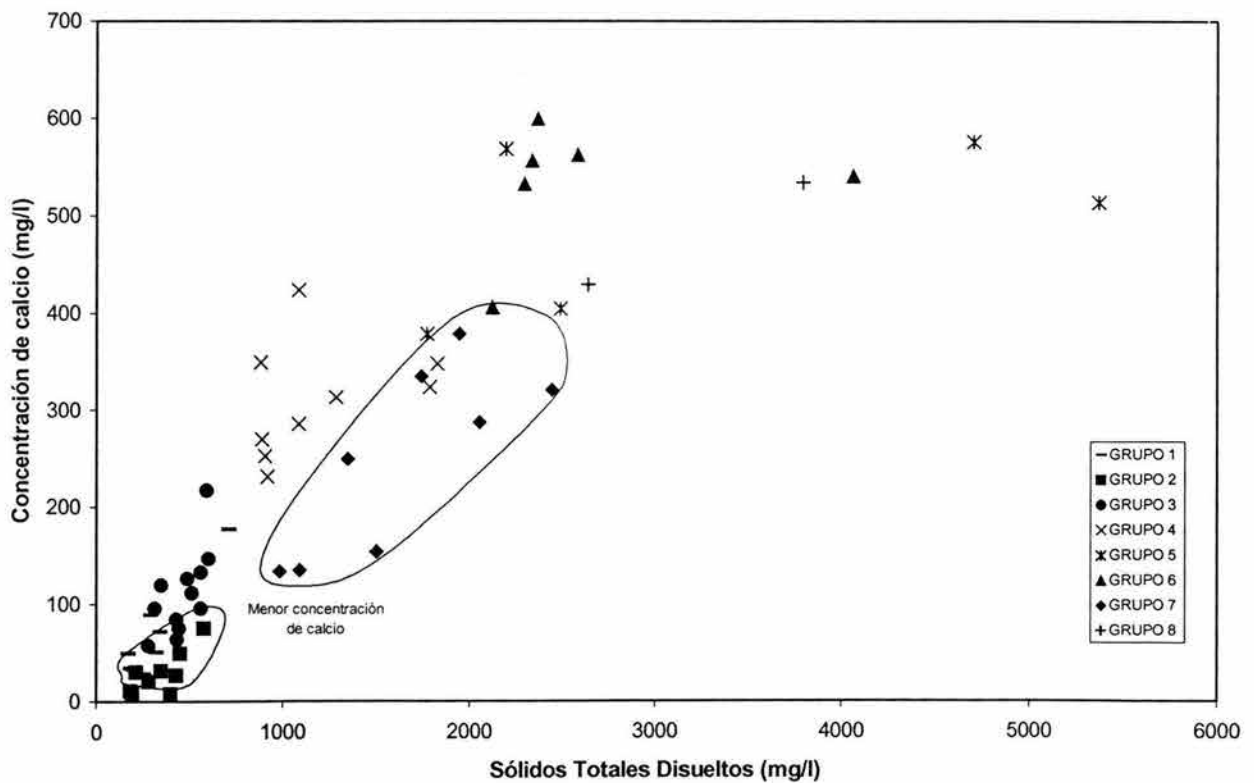


Figura 4.27 Relación de sodio menos cloruro contra calcio más magnesio

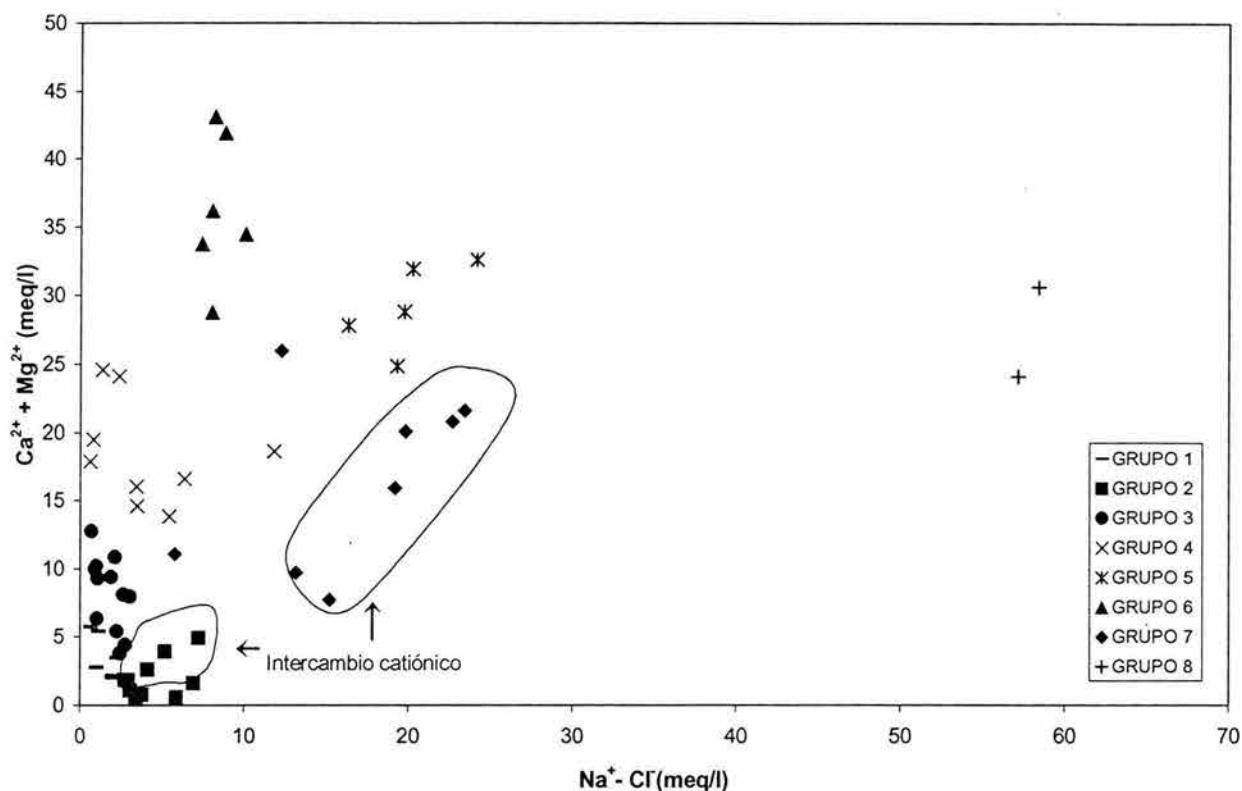
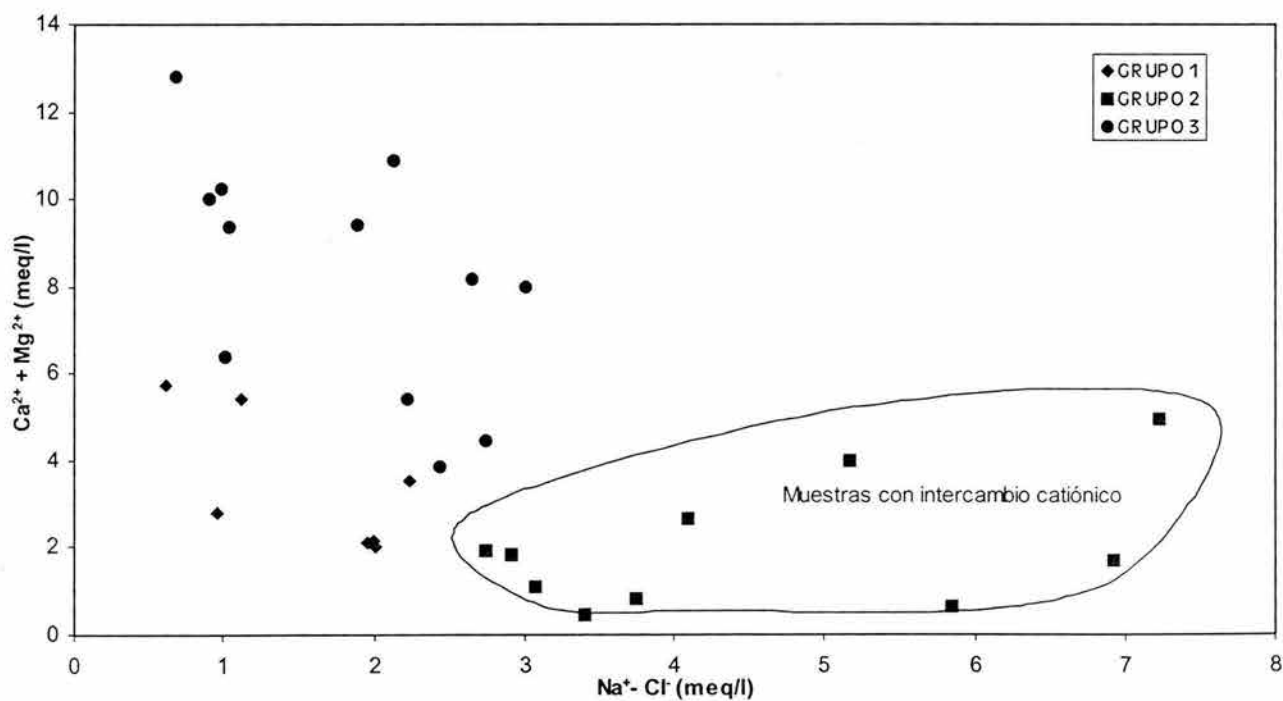


Figura 4.28 Relación de sodio menos cloruro contra calcio más magnesio para muestras de baja salinidad



4.3.6 EL ARSÉNICO EN LA COMARCA LAGUNERA

Hasta hace unos años, internacionalmente la concentración máxima permisible de arsénico en el agua para consumo humano era de 0.05 mg/l. Sin embargo, debido a que se ha identificado un incremento en el riesgo de contraer cáncer asociado a la exposición de bajas concentraciones de arsénico, incluso menores a 0.05 mg/l, recientemente la National Academy of Sciences (1999) ha recomendado que el estándar internacional de arsénico en el agua para consumo humano debe disminuir (National Institute of Health, 1998). En Estados Unidos de América, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2000) analizando la exposición de humanos al arsénico a partir de su presencia en el agua de consumo o debido a las actividades que desarrollan en su trabajo, ha identificado al arsénico como un agente cancerígeno, por lo que han propuesto disminuir el límite máximo permisible gradualmente. La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2001) ha establecido que la concentración de arsénico en agua para consumo humano debe ser menor a 0.01 mg/l, de acuerdo con criterios de salud. En México el límite máximo permisible de arsénico en agua para consumo humano está regulado por la NOM-127-SSA1-1994; hasta el año 2000 este límite era de 0.05 mg/l; pero dicha norma fue modificada en ese año, indicando que el límite máximo permisible para arsénico en agua potable se ajustará anualmente de forma gradual en 0.005mg/l por año, desde 0.045 mg/l para el año 2001, 0.040 mg/l para el 2002 y así sucesivamente hasta llegar a 0.025 mg/l para el año 2005 (SSA,2002). Esta situación agrava la problemática del arsénico en la Comarca Lagunera, pues los aprovechamientos que cumplen con esta concentración son muy pocos y están limitados a un área geográfica muy pequeña. La mayoría de las comunidades rurales de la Región Lagunera se ven afectadas por altas concentraciones de arsénico, muy por arriba de dichos límites. Por ello cada vez es más apremiante comprender el origen y los controles geoquímicos que condicionan la presencia del arsénico en el agua subterránea de la Región.

Welch *et al*, (1999) señalan que en los Estados Unidos de América las concentraciones elevadas de As en el agua subterránea, generalmente se relacionan con flujo vertical ascendente de agua termal, disolución o desorción a partir de óxidos de hierro, disolución de sulfuros metálicos y concentración por evaporación. Y señalan que en Estados Unidos de América la liberación de arsénico a partir de óxidos de hierro parece ser la causa más común de las concentraciones mayores a 0.01 mg/l en el agua subterránea.

La movilidad de las diversas especies de arsénico en la mayoría de las aguas naturales está controlada por sorción en fases sólidas (Langmuir, 1997), como hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso; la adsorción disminuye cuando el pH se eleva (Davies y Kent, 1990). En general, el Arsénico (V) se considera que se adsorbe más fuertemente que el As (III) y por lo tanto presenta menor movilidad.

La amplia distribución de elevadas concentraciones de arsénico en el agua subterránea de la Región Lagunera sugiere que su presencia se relaciona con fuentes naturales más que antropogénicas; pero la utilización en décadas pasadas de pesticidas y fertilizantes arsenicales en amplias regiones también podría considerarse una fuente importante. Adicionalmente en las inmediaciones de Torreón el origen del arsénico puede estar asociado con residuos mineros y la presencia de aguas residuales industriales y domésticas. Sin embargo, los resultados isotópicos de tritio y de carbono 14 obtenidos por El IMTA (1991) y Brouste *et al* (1997), permiten inferir que el agua subterránea con mayores concentraciones de arsénico tiene largo tiempo de residencia en el acuífero, por lo que el arsénico presente en el agua subterránea no puede provenir de los agroquímicos arsenicales que fueron empleados para el cultivo del algodón, ni tampoco proviene de la industria metalúrgica de Peñoles, quien principalmente contamina el aire y el suelo, y si acaso contribuyera a la contaminación del acuífero, sería de manera puntual y no tan regionalizada como ocurre en la zona de estudio.

EL IMTA (1991) propone que un sistema hidrotermal actual podría ser el responsable de las elevadas concentraciones de diversos iones como el arsénico, fluoruro y litio en el agua subterránea de la Región Lagunera; Sin embargo Welch *et al* (1988) señala que si se tratara de agua asociada a un sistema hidrotermal, las concentraciones de sílice serían mayores a 80 mg/l y las concentraciones de cloruro serían también elevadas, lo cual en forma general no se observa en la zona de estudio (Figuras 4.29 y 4.30). Por lo que se considera que el origen del arsénico no se asocia a un sistema hidrotermal actual. Es muy probable que las temperaturas mayores a 30 °C observadas en el agua subterránea de la Región Lagunera se relacionen a sistemas de flujo que circulan a gran profundidad y que incrementan su temperatura debido al gradiente geotérmico local.

El IMTA (1991) señala que los altos valores de arsénico en el agua subterránea se asocian a elevadas salinidades, sin embargo el comportamiento entre estos dos parámetros mostrado en la figura 4.31 para los datos generados por este estudio, permite observar que ese comportamiento no es generalizado para todas las muestras. Si bien, todas las muestras con sólidos totales disueltos mayores a 2500 mg/l presentan altas concentraciones de arsénico en los grupos 5 y 6, y las muestras del grupo 1 y la mayoría del grupo 3 presentan baja salinidad y reducidas concentraciones de arsénico. También es claro que las muestras del grupo 2, localizadas en las zonas de Finisterre y Matamoros, se caracterizan por tener una salinidad menor a 500 mg/l y concentraciones de arsénico muy elevadas. Ello indica que la relación entre la salinidad del agua subterránea y el contenido de arsénico disuelto no es directa.

Tampoco existe una relación directa entre la temperatura del agua subterránea y la concentración de arsénico. Ya que como se observa en la figura 4.32, aunque todas las muestras con temperatura mayor a 33 °C tienen elevadas concentraciones de arsénico, también existen muestras con altos contenidos de arsénico con temperaturas bajas, incluso menores de 25 °C.

Varios casos de fluorosis dental han sido reportados en la Región Lagunera (Secretaría de Salud, 1986) debido a las altas concentraciones del fluoruro disuelto en el agua subterránea. Del Razo, et. al. (1993) encontraron una correlación entre las zonas con elevadas concentraciones de arsénico y fluoruro en la Región Lagunera. Esta correlación se observa especialmente en la porción norte de la zona de estudio, y ello le sirvió en parte de fundamento al IMTA (1991) para atribuir un mismo origen para ambos elementos, asociados a la actividad hidrotermal. Sin embargo la relación entre estos elementos no es directa para toda la zona de estudio. En la figura 4.33 se puede observar que todas las muestras que tienen concentraciones de fluoruro mayores a 2 mg/l también tienen elevadas concentraciones de arsénico, por lo que concuerdan con el comportamiento observado por Del Razo et. al. (1993), sin embargo también se observa que existen muestras en las que las concentraciones de fluoruro son muy bajas, menores a 1.5 mg/l e incluso menores a 0.5 mg/l y que tienen elevadas concentraciones de arsénico.

Tampoco existe una sencilla y única relación entre la composición química del agua subterránea y su contenido de arsénico; la presencia de este elemento traza en el agua subterránea de la zona de estudio no se asocia a un solo grupo de agua, ni a cierta composición hidrogeoquímica. El agua perteneciente al grupo 1, asociada a agua de reciente infiltración se caracteriza por tener bajas concentraciones de arsénico, menores al límite máximo permisible para consumo humano. Por otra parte todas las muestras de agua subterránea de los grupos 2, 5 y 8 tienen elevadas concentraciones de arsénico. Casi todas las muestras de los grupos 6 y 7, con algunas excepciones, presentan contenidos de arsénico considerables.

Figura 4.29 Relación entre la temperatura del agua subterránea y la concentración de sílice

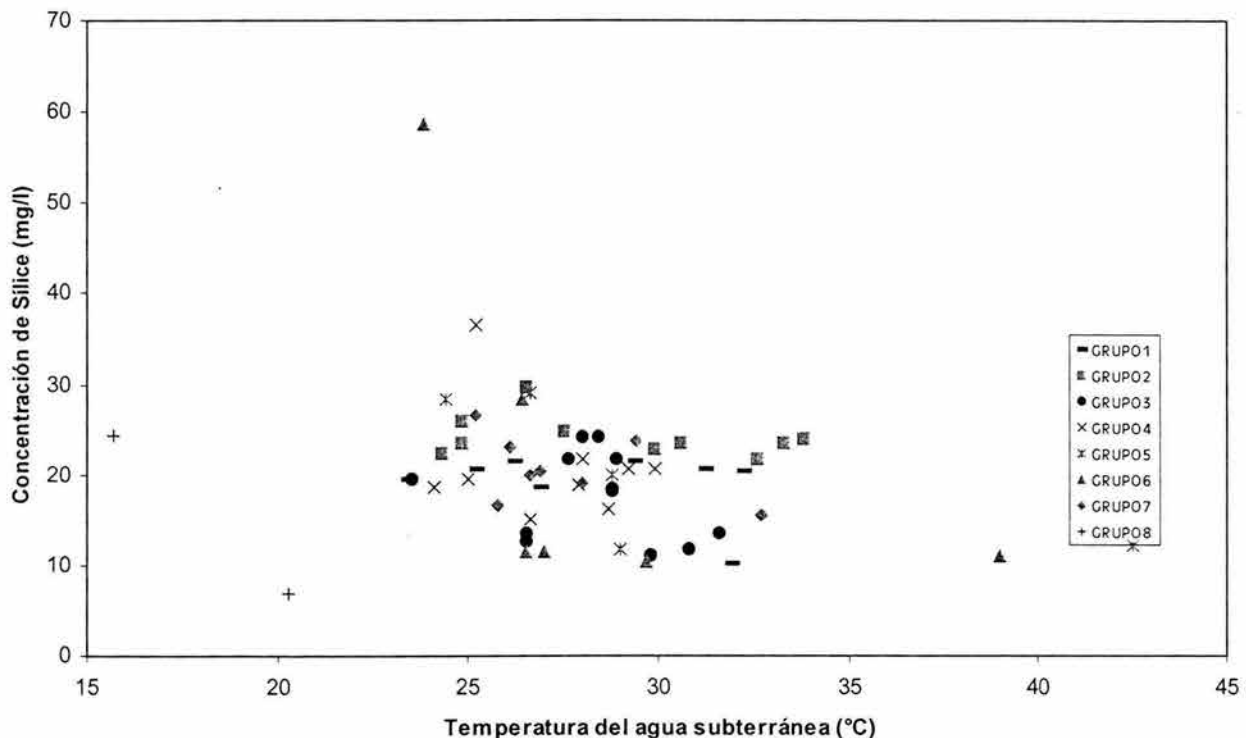


Figura 4.30 Relación entre las concentraciones de cloruro y arsénico

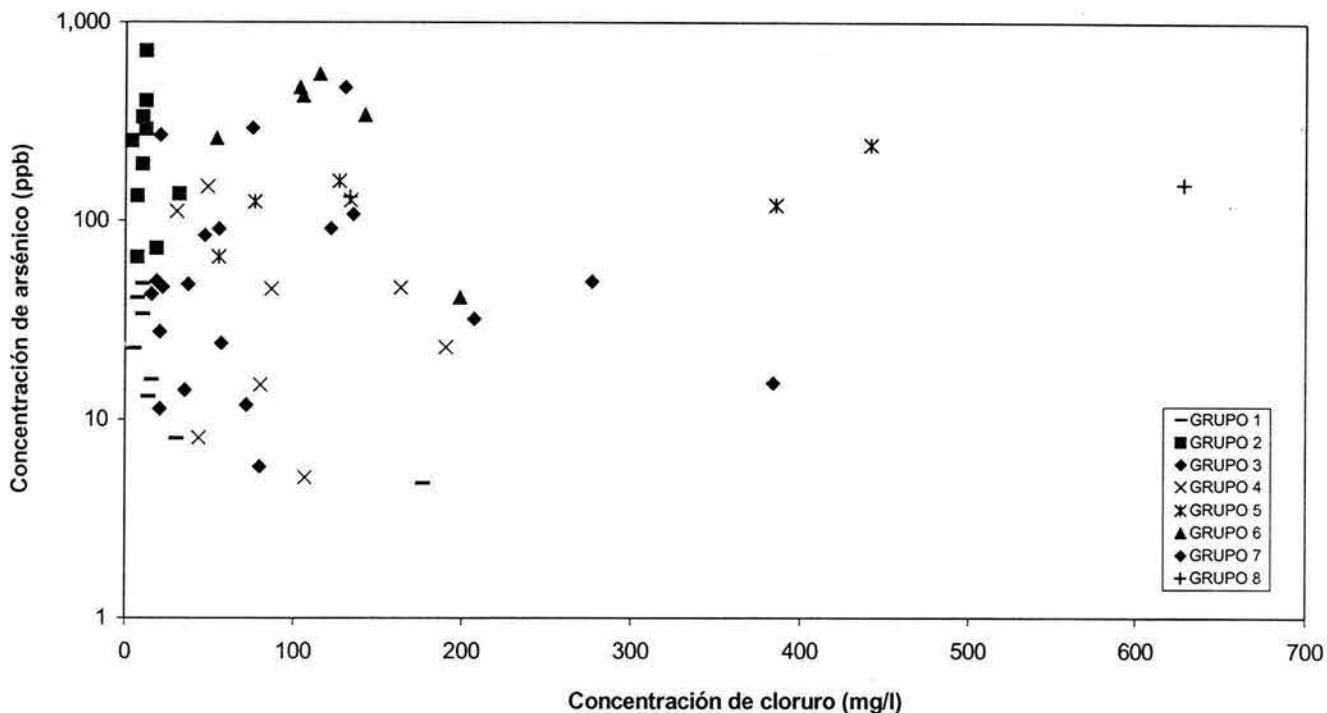


Figura 4.31 Relación entre las concentraciones de sólidos totales disueltos y arsénico

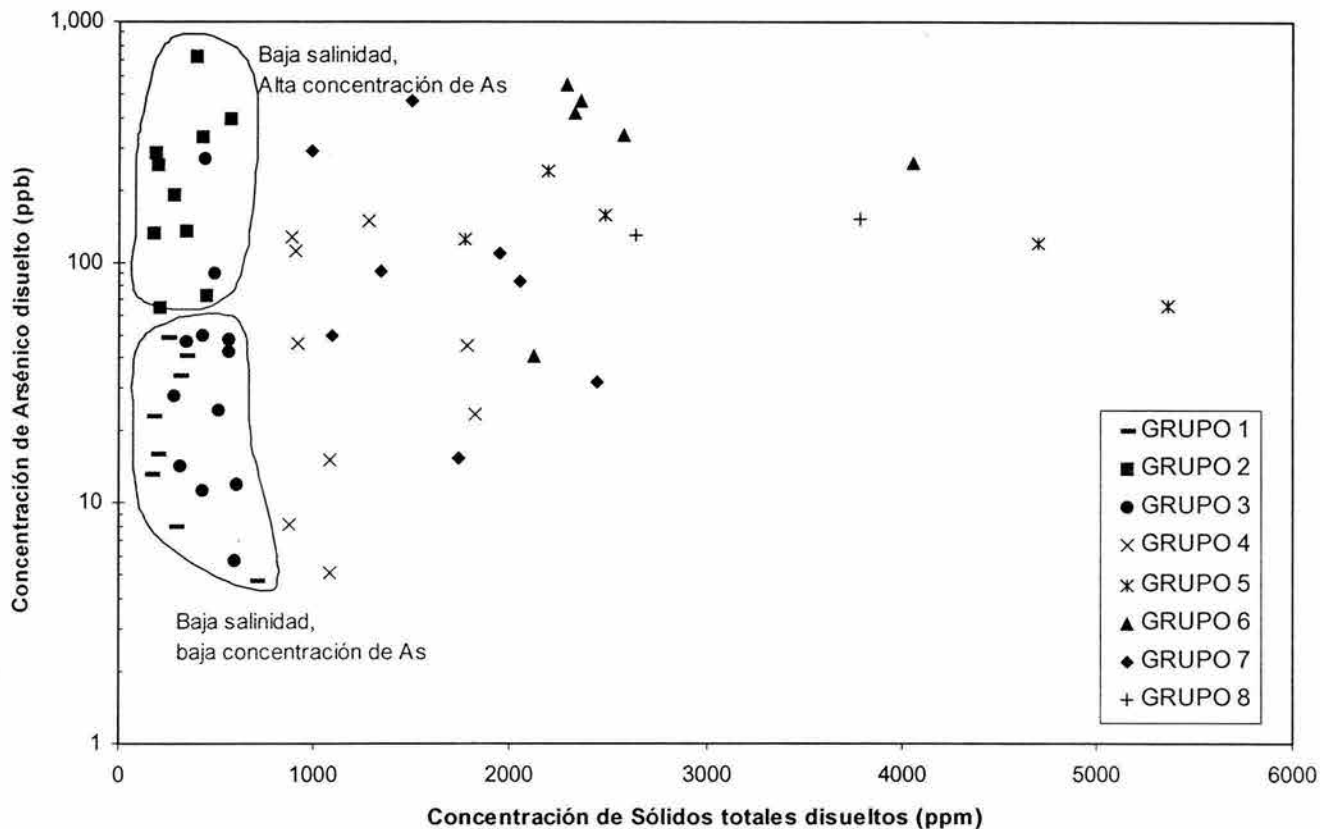
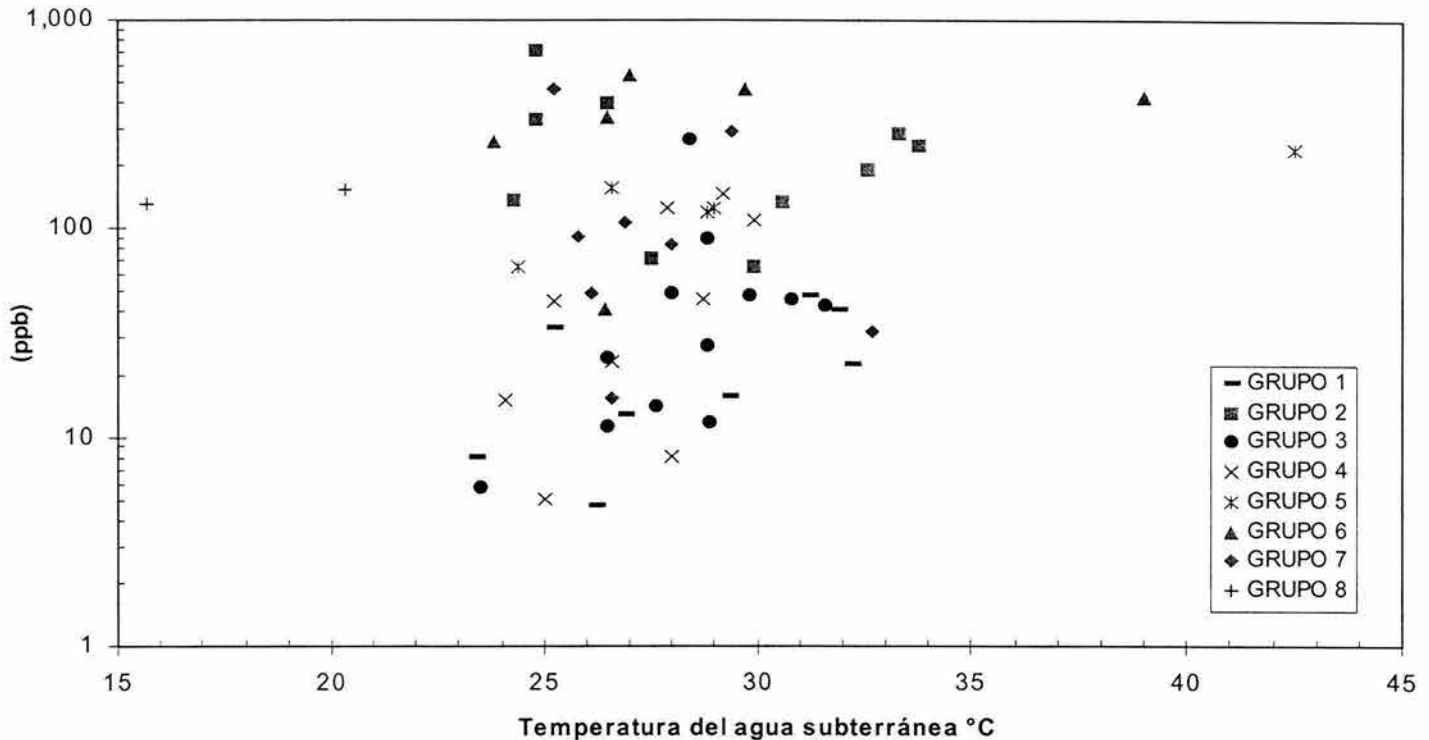


Figura 4.32 Relación entre la temperatura del agua subterránea y la concentración de arsénico



De acuerdo con el análisis presentado en los párrafos anteriores se puede observar que estudios previos han generalizado las características y el comportamiento hidrogeoquímico de unas pocas muestras o casos particulares para toda la zona de estudio, en relación al arsénico. Mientras que el presente estudio sugiere que existen diferentes procesos geoquímicos que controlan y movilizan al arsénico desde la fase sólida hacia el agua subterránea. Ya que como lo afirma Welch, *et al* (1988) la geoquímica del arsénico es compleja y es afectada por procesos de disolución-precipitación, oxidación-reducción, adsorción-desorción, así como reacciones biológicas.

La precipitación de minerales de arsénico puede limitar las concentraciones de este elemento en el agua subterránea. Los más comunes minerales con arsénico son rejalgar (AsS), oropimente (As_2S_3), arsenopirita (FeAsS), claudetita (As_2O_3), arsenolita (As_4O_6), pentóxido de arsénico (As_2O_5) y escorodita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Otros minerales comunes pueden contener arsénico como impureza, tal es el caso de la pirita, galena, esfalerita, marcasita y calcopirita. El arsénico también puede sustituir a otros elementos como en la pirita, la cual está asociada tanto en sistemas geotérmicos fósiles o activos, y en óxidos de hierro formados a baja temperatura (Welch, 1999).

Los índices de saturación calculados para las fases incluidas en la base de datos Wateq que contienen arsénico indican subsaturación, como se observa en la tabla 4.3, por lo que no se considera factible que la precipitación de minerales de arsénico constituya un factor de importancia que controle los valores de arsénico medidos en el agua subterránea de la zona de estudio.

En la zona de Bermejillo, al noroeste de la zona de estudio, las muestras con mayores concentraciones de arsénico están asociadas con agua que circula por rocas sedimentarias calcáreas. El arsénico en esta zona se presenta con mayor concentración en el agua subterránea de mayor salinidad y mayor concentración de sulfato, tal como se observa en la figura 4.34. Lo que indica una relación directa con la intensidad de interacción agua-roca calcárea, producida por un mayor tiempo de residencia en el subsuelo, por lo que un mayor recorrido a lo largo de la dirección de flujo se traduce en mayores concentraciones de arsénico. De aquí se deduce que el arsénico en esta zona se deriva de fuentes naturales presentes en las rocas calcáreas. La muestra GP, localizada al sur de Bermejillo perteneciente al grupo 1, también se localiza en rocas calcáreas, sin embargo el contenido de arsénico es muy bajo, debido a que de acuerdo a sus características hidrogeoquímicas, corresponde con agua de reciente infiltración con muy poco tiempo de residencia en el acuífero.

Armienta *et al*, (2001) ha identificado la oxidación de sulfuros metálicos en el Valle de Zimapán, Hidalgo, como el origen de las elevadas concentraciones de arsénico disuelto en el agua subterránea y altos contenidos de sulfato. Ayote *et al* (1999), Simo *et al* (1996) han identificado este mismo proceso como fuente de arsénico en distintas regiones de los Estados Unidos de América.

Figura 4.33 Relación entre las concentraciones de fluoruro y arsénico

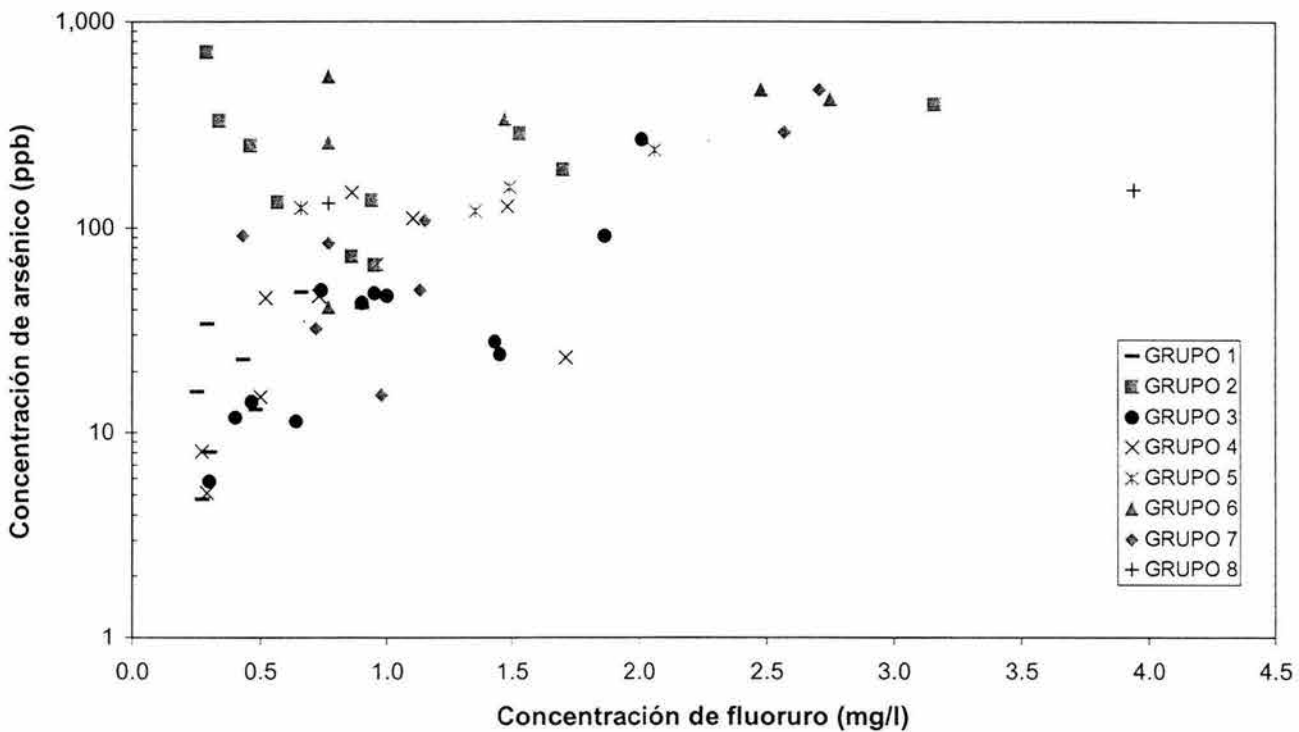
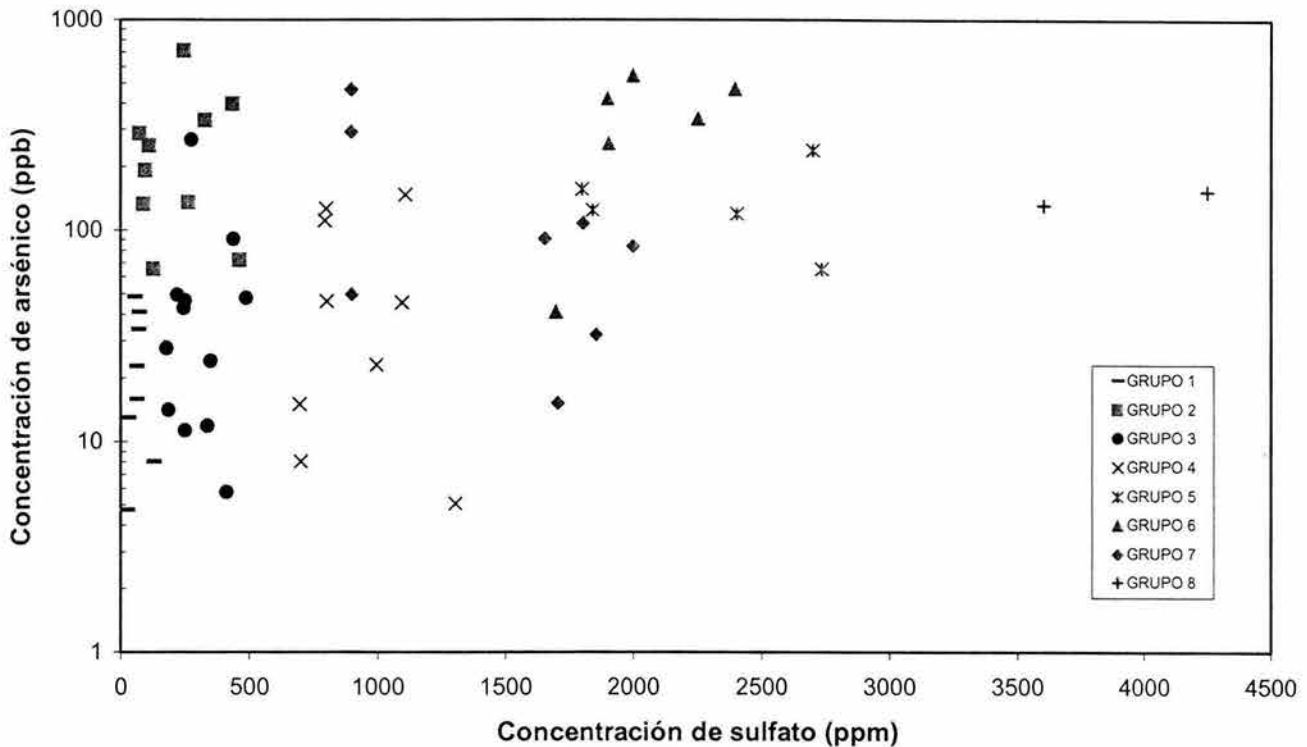


Figura 4.34 Relación entre las concentraciones de sulfato y arsénico



En la Comarca Lagunera, existe la posibilidad de que una fuente de arsénico sea la oxidación de los sulfuros diseminados en las rocas calcáreas. Esta reacción además permitiría explicar las elevadas concentraciones de sulfato. En la Sierra de Bermejillo y Tlahualilo existen diversas minas con presencia de sulfuros; además las rocas calcáreas podrían presentar cantidades subordinadas de pirita, sin embargo como se mencionó previamente no se cuenta con la información suficiente para establecer la importancia relativa de la disolución de yeso o la oxidación de sulfuros en relación con el origen del sulfato en el agua subterránea, por lo que no es posible cuantificar hasta que punto la oxidación de sulfuros justifica la presencia de arsénico en la Región Lagunera. Se requeriría conocer la cantidad de arsénico presente en los sulfuros metálicos, así como la presencia de minerales de arsénico.

Al sur de Tlahualilo y en la zona de Finisterre y en la zona de Matamoros las concentraciones de arsénico son muy elevadas, pero las características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas en estas zonas son muy diferentes a las observadas en las zonas marginales de la cuenca asociadas a las Sierras calcáreas. En forma contrastante, en las zonas de Finisterre, Matamoros y al sur de Tlahualilo la salinidad del agua subterránea es muy baja, en general menor a 500 mg/l de sólidos totales disueltos, y se capta a partir de un medio granular.

Geológicamente estas regiones se caracterizan por tener un alto contenido de arcillas, debido al proceso sedimentario que les dio origen, ya que se trata de ambientes lacustres y planicies de inundación. Ambas zonas coinciden con conos de gran abatimiento del nivel de saturación de agua subterránea en la zona, lo que es consecuencia de su carácter altamente arcilloso.

La adsorción puede ser uno de los factores más importantes que controlan la concentración de arsénico en el agua subterránea. Las fases en las que pueden coprecipitar o adsorber al arsénico incluyen óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, aluminio y manganeso, minerales arcillosos, materia orgánica (Welch *et al* 1988, Welch *et al* 2000).

Diversos estudios de laboratorio de la adsorción del arsénico en hidróxidos de hierro indican que a pH mayor se tiene una capacidad de adsorción menor con respecto a pH más ácidos. La menor capacidad de adsorción a pH mayor probablemente está relacionada a la formación de una superficie cargada negativamente, que resulta en una repulsión electrostática entre el sorbente y el anión de arsénico. Esta reducida capacidad de adsorción a pH elevado en aguas no termales se relacionan con elevadas concentraciones de arsénico en aguas alcalinas (Welch *et al* 1988, Welch *et al* 2000).

Entre los estudios experimentales de adsorción-desorción efectuados en el norte de México, destacan los trabajos realizados por Carrillo y Drever (1998) en un acuífero de Baja California, en el que evidencian experimentalmente la adsorción del arsénico en oxihidróxidos de hierro, así como el proceso de desorción del arsénico conforme el pH se incrementa.

La capacidad de un sedimento para retener y concentrar arsénico generalmente está controlada por el tamaño de grano, porque entre más pequeño es el tamaño de grano mayor será su superficie y por lo tanto mayor capacidad de adsorción por unidad de peso. Según Appelo (1993) los minerales que presentan mayor área superficial son las arcillas y los oxi-hidróxidos. Los minerales arcillosos, materia orgánica, óxidos de hierro y manganeso, comúnmente adsorben a elementos traza como el arsénico (Welch, 1988; Welch, 2000).

Rosas, *et al* (1997) encontraron que los suelos arcillosos de la Región Lagunera se caracterizan por tener un bajo porcentaje de arsénico extractable con respecto al arsénico total y que las plantas que crecen en suelos arcillosos y limosos con alto porcentaje de arcillas y minerales de óxidos de fierro y aluminio, presentan baja concentración de arsénico debido a que éste se encuentra adsorbido en estos minerales, en vez de encontrarse en la fase líquida que rodea las raíces. Mientras que los suelos arenosos en la Región Lagunera, con más del 30 % de arenas, presentan las mayores concentraciones de arsénico extractable con respecto al arsénico total y las plantas que crecen en estos suelos arenosos tienen mayores contenidos de arsénico debido a que la alta proporción de arena implica una menor adsorción de arsénico y una alta disponibilidad para

las plantas. Esto demuestra que el arsénico en la Región Lagunera es retenido en las fracciones de limo y arcilla de los suelos, en minerales arcillosos y en oxihidróxidos.

Aunque el estudio efectuado por Rosas *et al* se enfocó a suelos, es de esperarse que el mismo proceso de adsorción ocurra en los sedimentos que conforman el acuífero granular, especialmente en aquellas zonas en las que el contenido de arcilla es elevado. Los alcances del presente estudio impidieron tomar muestras de sedimentos a las profundidades de los pozos, por lo que se carece de elementos suficientes para demostrar este proceso, aunque el análisis de la información sugiere que es el proceso más probable para explicar la movilización del arsénico a partir del material geológico, en el acuífero granular.

De acuerdo con Brouste (1997), la edad calculada mediante análisis isotópicos de Carbono 14, para la zona de Matamoros y Finisterre es mayor a 30,000 años.

En el diagrama de estabilidad Eh-pH para las diferentes especies de arsénico, mostrado en la figura 4.35, se observa que las muestras del grupo 2 son las que presentan mayores valores de pH y corresponden con elevadas concentraciones de arsénico. Los límites de estabilidad presentados en dicho diagrama fueron tomados de Appelo y Postma (1993). Las especies de arsénico disueltas identificadas en la figura 4.35 para la zona de estudio confirman la especiación del arsénico reportada por Rosas, *et al* (1997), Del Razo (1990), quienes indican que el estado de oxidación del arsénico en la Región Lagunera es As(V) en una proporción del 90 a 95%.

La relación entre el pH y la concentración de arsénico disuelto en el agua subterránea, mostrada en la figura 4.36, permite observar claramente que para las muestras de los grupos 2, 3, 4 y 7 el incremento del pH se relaciona directamente con concentraciones de arsénico cada vez mayores. Específicamente el agua del grupo 2 es el que mayor relación muestra entre el incremento del pH y el incremento de la concentración de arsénico. Ello confirma que el proceso de desorción ocurre y que se incrementa conforme el pH del agua subterránea aumenta. Es importante hacer notar que para los grupos 5 y 6, caracterizados por alta salinidad, pH menor a 7.5, temperatura variable de 24 a 42.5 °C y estar asociados a calizas, el efecto del pH en la concentración de arsénico no tiene importancia. Ello comprueba que las reacciones y procesos que condicionan la presencia de arsénico en el agua subterránea de estos grupos son diferentes a la desorción. Por supuesto que dadas las condiciones anaeróbicas en la parte norte de la zona de interés, se considera factible que los valores de arsénico detectados, sean producidos por una combinación de reacciones de disolución de óxidos de Fe y Mn y desorción debido al pH del agua subterránea.

Del análisis anterior se desprende que las altas concentraciones de arsénico disuelto en el agua subterránea del grupo 2, sin duda están condicionadas por el pH elevado de estas muestras, ya que el alto pH favorece la desorción del arsénico a partir de los minerales arcillosos o de los óxidos

de hierro y manganeso presentes en los sedimentos lacustres de baja granulometría localizados al sur de Tlahualilo, y en las zonas de Finisterre y Matamoros.

Cabe repetir que las reacciones de intercambio catiónico evidenciadas en esta zona del acuífero, son de gran importancia en la movilización del arsénico, puesto que al incorporarse calcio y magnesio a la fase sólida, y debido a que el agua está en equilibrio con la calcita, se propicia una mayor disolución de este mineral, generando un incremento de alcalinidad y una elevación del pH, debido al consumo de iones hidrógeno durante el proceso de disolución de carbonatos.

Todas las muestras del grupo 2 presentan elevadas concentraciones de fosfatos, en comparación con el resto de las muestras, ya que éste varía de 0.10 a 0.65 mg/l. Los fosfatos tienen un comportamiento geoquímico similar a los arsenatos, ya que ambos son oxianiones que son adsorbidos por minerales cargados positivamente, como óxidos e hidróxidos de hierro. Las altas concentraciones de fosfatos en el agua del grupo 2, apoyan la idea de que el proceso de desorción ocurre en esa porción del acuífero, puesto que la concentración de fosfato en el agua subterránea también es controlada por el proceso de adsorción-desorción y los iones de arsénico y el fosfato compiten por los sitios de adsorción en el material geológico.

En la figura 4.37 se presenta el comportamiento del arsénico en relación con el potencial de óxido-reducción (Eh). Las condiciones más reductoras de la zona de estudio están representadas por el pozo 3089, asociado a calizas, que extrae el agua subterránea con la más alta temperatura medida en la zona de estudio (42.5 °C), olor a ácido sulfhídrico y elevadas concentraciones de arsénico. Armienta, *et al* (2001) encontró esta misma relación entre la mayor temperatura y el valor más bajo de Eh asociado a elevadas concentraciones de arsénico en rocas calcáreas de Zimapán, Hgo. Sin embargo la relación entre el Eh y la concentración de arsénico no muestra el mismo comportamiento para toda la zona de estudio debido a que ocurren diferentes controles geoquímicos del arsénico y en parte porque el electrodo de Eh no distinguió adecuadamente las zonas anóxicas y óxicas, probablemente debido a las bajas concentraciones de hierro disuelto.

Para comprobar las hipótesis planteadas para explicar el origen del As a partir de los procesos de desorción a causa del pH del agua subterránea, se requeriría al menos: i) el análisis petrográfico de los sedimentos que componen el acuífero en esta parte del área de estudio, ii) analizar el contenido de arsénico en los óxidos, iii) realizar experimentos de extracción del arsénico a partir de la disolución de óxidos de Fe y Mn en los sedimentos, conceptos que están fuera del alcance del presente trabajo pero que se recomienda se lleven a cabo en el marco de investigaciones posteriores.

Figura 4.35.- Diagrama de estabilidad para diferentes especies de arsénico

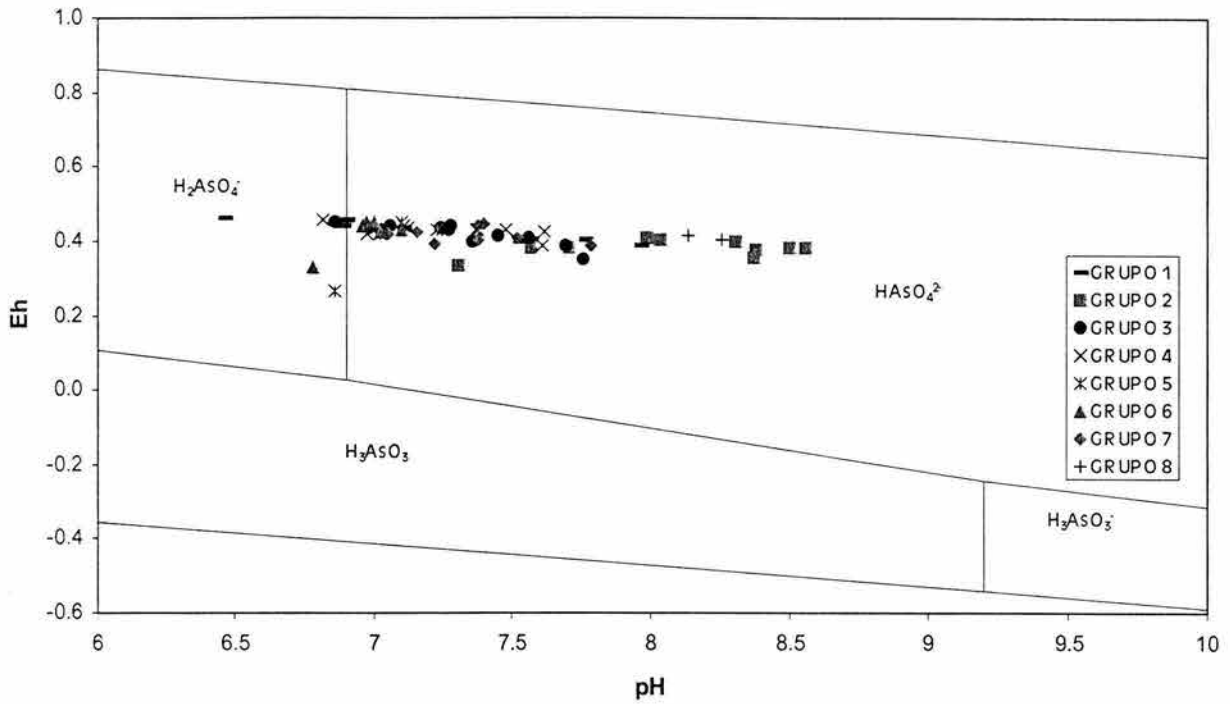


Figura 4.36- Relación entre el pH del agua subterránea y la concentración de As

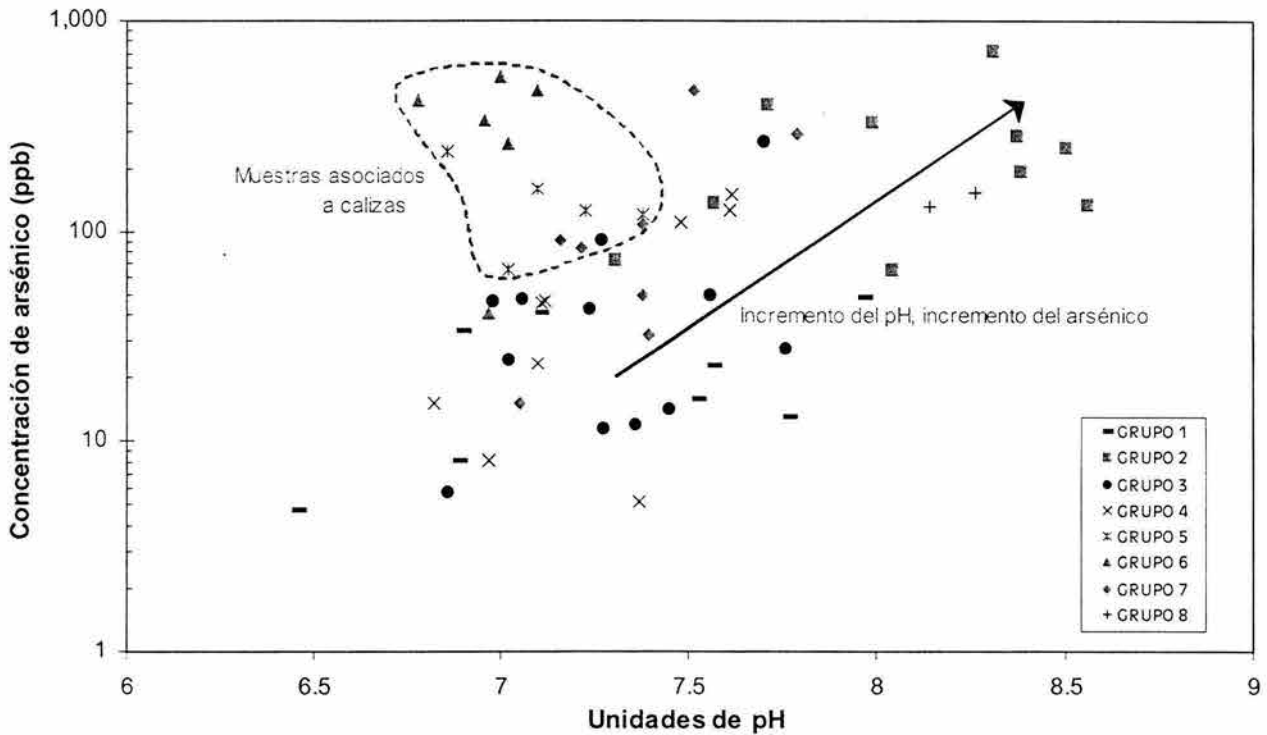
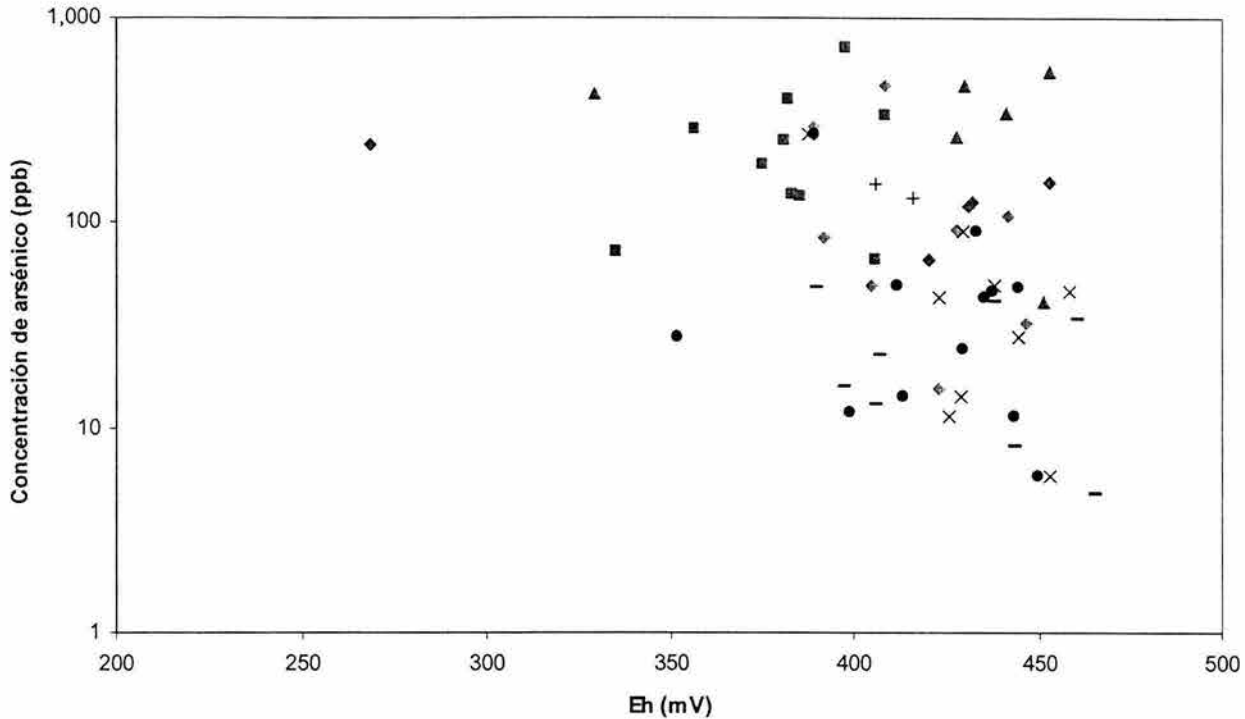


Figura 4.37 Eh contra concentración de arsénico (ppb)



4.4 MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA INVERSA

Una vez identificadas las reacciones principales que condicionan la composición química del agua subterránea en la zona de estudio, se procedió a realizar modelación hidrogeoquímica inversa para demostrar la ocurrencia de algunas reacciones y cuantificar la importancia de cada una de las reacciones identificadas en la porción arcillosa de la zona de estudio, identificada como la zona de Matamoros y la zona de Finisterre. Esta zona se eligió para efectuar la modelación inversa debido a su importancia para entender la movilización del arsénico en el agua de baja salinidad del Grupo Hidrogeoquímico 2.

La modelación inversa pretende determinar los procesos y las reacciones hidrogeoquímicas que dieron origen a la composición química del agua subterránea a lo largo de la dirección de flujo, considerando aquellos procesos que puedan ocurrir de acuerdo con la litología presente y las condiciones prevaletientes en el acuífero. Sólo se consideraron aquellos procesos que modifican las concentraciones de los iones principales y no así los elementos traza, debido a la falta de conocimiento litológico al respecto.

La modelación inversa se realizó para definir y cuantificar los procesos hidrogeoquímicos ocurridos desde la infiltración hasta la composición obtenida para dos muestras del grupo 2, eligiendo como muestras representativas a la muestra Desafío para la porción sur, en la zona de Matamoros y a la muestra 996 para la zona norte de Finisterre.

Se seleccionó al grupo 1, para representar el agua de reciente infiltración como el inicio del recorrido a lo largo de la trayectoria de flujo. La muestra 3441 se seleccionó como una muestra representativa del agua de reciente infiltración en el medio granular, asociada a la recarga a partir del Río Nazas, por ser la que presenta menor temperatura, mayor concentración de oxígeno disuelto y menor pH dentro del grupo. Esta muestras fue considerada como la referencia de inicio durante la modelación inversa.

De acuerdo con el análisis presentado anteriormente, la evaporación/dilución ocurre en la zona de estudio como un proceso de concentración o bien la dilución, por lo que se consideró durante la modelación inversa al cloruro como ion conservativo para obtener mediante el programa MODELAGUA los factores de concentración; esta consideración es válida debido a que no se tienen evidencias de minerales de cloruro que impidan emplear a este ion como conservativo.

Las reacciones que se consideraron durante la modelación fueron la disolución-precipitación de calcita, dolomita, yeso, dedolomitización, intercambio iónico, por ser las reacciones que fueron definidas durante el análisis y procesamiento hidrogeoquímico para la zona de estudio. A continuación se indican las reacciones tal como las considera el programa empleado:

Disolución de Yeso	$\text{CaSO}_4 \leftrightarrow \text{Ca} + \text{SO}_4$	(ec. 4.17)
Disolución de dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca} + \text{Mg} + 4\text{HCO}_3$	(ec. 4.18)
Disolución de calcita	$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca} + 2\text{HCO}_3$	(ec. 4.19)
Dedolomitización	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{Ca} \leftrightarrow 2\text{CaCO}_3 + \text{Mg}$	(ec. 4.20)
Intercambio catiónico	$\frac{1}{2} \text{Ca} + \text{NaR} \leftrightarrow \text{Na} + \frac{1}{2} \text{CaR}_2$	(ec. 4.21)
Intercambio catiónico	$\frac{1}{2} \text{Ca} + \text{KR} \leftrightarrow \frac{1}{2} \text{CaR}_2$	(ec. 4.22)

En las tablas 4.5 y 4.6 se presentan los resultados de la modelación inversa para el grupo 2.

Tabla 4.5 Resultados de la modelación hidrogeoquímica inversa entre el agua de reciente infiltración (3441) y una muestra representativa del Grupo 2 en el área de Matamoros (Desafío) (mmol/L)

Nombre	CO ₂	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
Desafío	0.000	0.328	2.432	0.771	4.074	0.226	0.188	0.041
3441	0.000	0.845	4.580	1.354	1.958	2.240	0.478	0.120
FC=0.39								
DELTA IONICO:	0.000	0.000	0.653	0.245	3.313	-0.644	0.002	-0.006
PROCESOS:								
Yeso (Disolución)	0.000	0.000	0.000	0.265	0.000	0.265	0.000	0.000
Dolomita (Disolución)	-0.433	0.000	0.866	0.000	0.000	0.216	0.216	0.000
Calcita (Disolución)	-0.261	0.000	0.522	0.000	0.000	0.261	0.000	0.000
Calcita - Dolomita	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.235	-0.235	0.000
Na-Ca Intercambio	0.000	0.000	0.000	0.000	3.302	-1.651	0.000	0.000
K-Ca Intercambio	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	-0.016
CO ₂ - HCO ₃	0.715	0.000	-0.715	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TOTAL:	0.021	0.000	0.673	0.265	3.302	-0.665	-0.019	-0.016
ERROR:	-0.021	0.000	-0.021	-0.021	0.010	0.021	0.021	0.010

Tabla 4.6 Resultados de la modelación hidrogeoquímica inversa entre el agua de reciente infiltración (3441) y una muestra representativa del Grupo 2 en el área de Finisterre (996) (mmol/L)

Nombre	CO ₂	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K
996	0.000	0.188	1.520	0.935	3.250	0.280	0.279	0.049
3441	0.000	0.845	4.580	1.354	1.958	2.240	0.478	0.120
FC=0.22								
DELTA IONICO:	0.000	0.000	0.504	0.634	2.815	-0.217	0.173	0.022
PROCESOS:								
Yeso (Disolución)	0.000	0.000	0.000	0.677	0.000	0.677	0.000	0.000
Dolomita (Disolución)	-0.358	0.000	0.715	0.000	0.000	0.179	0.179	0.000
Calcita (Disolución)	-0.232	0.000	0.464	0.000	0.000	0.232	0.000	0.000
Calcita - Dolomita	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	-0.049	0.000
Na-Ca Intercambio	0.000	0.000	0.000	0.000	2.794	-1.397	0.000	0.000
K-Ca Intercambio	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CO ₂ - HCO ₃	0.632	0.000	-0.632	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TOTAL:	0.043	0.000	0.547	0.677	2.794	-0.260	0.130	0.000
ERROR:	-0.043	0.000	-0.043	-0.043	0.022	0.043	0.043	0.022

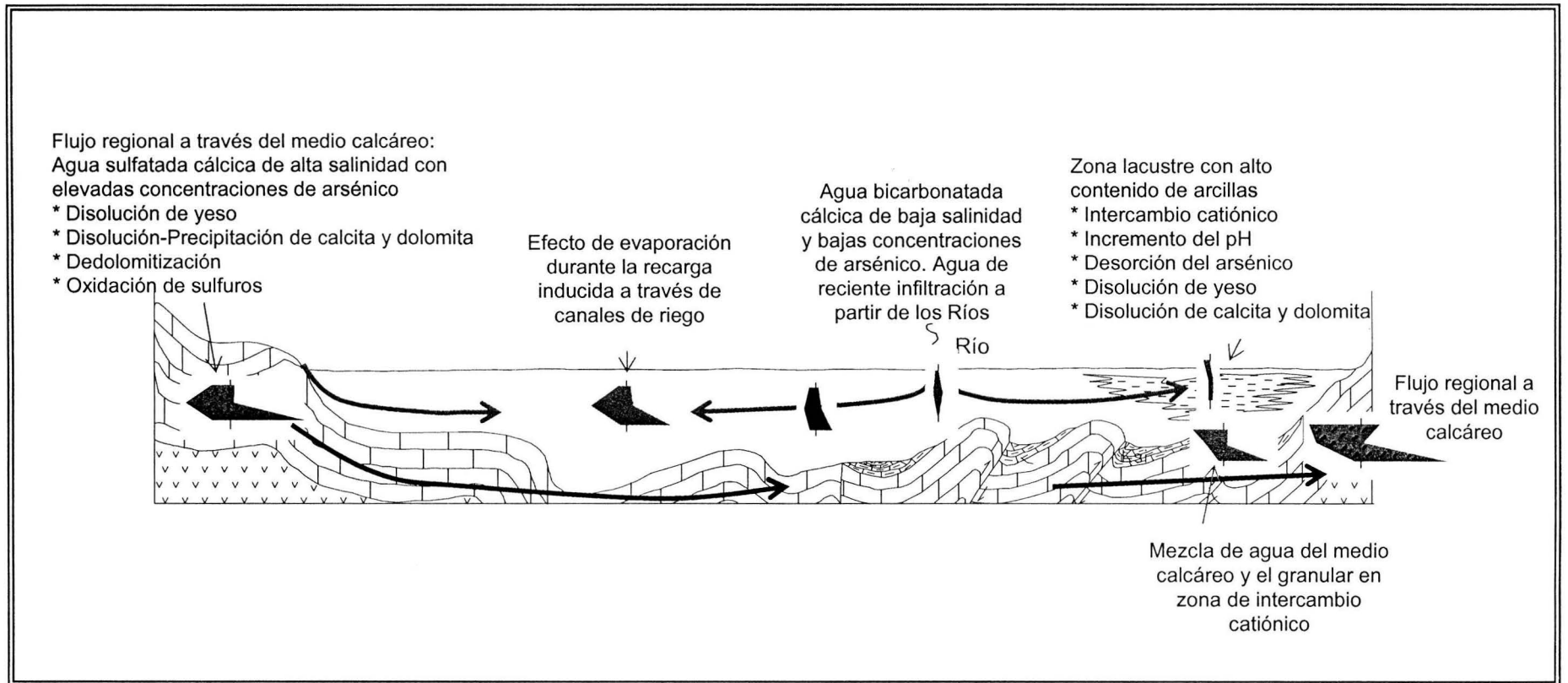
Los resultados de la modelación inversa indican que para el grupo 2, tanto en la zona de Matamoros como en Finisterre, tal como el análisis hidrogeoquímico lo había previsto, el intercambio catiónico entre el calcio y el sodio es el proceso dominante, ya que cerca de 3 mmol/L de sodio son incorporadas al agua subterránea a partir del intercambio por calcio con el material geológico. Otra reacción que ocurre en la trayectoria de flujo aunque en menor proporción es la disolución de yeso, lo cual es congruente con la subsaturación con respecto a este mineral indicado por los índices de saturación, de -2.5365 para la muestra Desafío -2.3605 para la muestra 996. De acuerdo con los índices de saturación con respecto a la calcita y dolomita las muestras

seleccionadas para este grupo se encuentran dentro de la franja de equilibrio; sin embargo la modelación inversa permite verificar la existencia de reacciones de disolución de calcita y disolución de dolomita. Ello confirma que las reacciones de intercambio catiónico promueven la disolución de calcita y dolomita, lo que genera un incremento de alcalinidad y elevación del pH, debido al consumo de iones hidrógeno durante el proceso de disolución de carbonatos.

De lo anterior puede observarse que las reacciones previstas en el análisis hidrogeoquímico, son confirmadas mediante la modelación hidrogeoquímica inversa, para la zona modelada.

Para finalizar este trabajo se presenta en la figura 4.38 un resumen de las características y los procesos hidrogeoquímicos más relevantes que se asocian a diferentes medios geológicos de acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo, y que definen en términos generales el modelo conceptual hidrogeoquímico de forma esquemática y simplificada.

Figura 4.38 Modelo conceptual hidrogeoquímico simplificado



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

La concentración de sólidos totales disueltos se incrementa hacia el oriente, en dirección a las exlagunas de Mayrán y Viesca, de acuerdo con la dirección de flujo subterráneo que prevalecía en condiciones originales. El agua de baja salinidad está asociada a agua de reciente infiltración a partir de los cauces de los ríos, y parcialmente de las sierras del occidente. Mientras que concentraciones mayores a 2000 mg/l se asocian a afloramientos calcáreos, en el extremo noroeste de la zona de estudio, al norte de Bermejillo y en el extremo sureste, al norte de Viesca, por lo que representan sistemas de flujo con un largo recorrido en el subsuelo a través del medio calcáreo.

El valor promedio de la temperatura del agua subterránea medida a la descarga de los pozos varía de 23.4 a 42.5 °C. Las menores temperaturas, de aproximadamente 25°C ocurren al norte de la zona conurbada Torreón-Lerdo y Gómez Palacio a lo largo del Río Nazas y en la zona sur adyacente al Río Aguanaval y en el área norte de la zona de estudio. En general el agua con temperaturas del orden de 25°C representa sistemas de flujo someros que se caracterizan por su reciente infiltración a partir de los cauces de los ríos. En las inmediaciones del Intrusivo El Sarnoso la temperatura del agua subterránea alcanza valores cercanos a los 32°C, por representar un sistema de flujo que circula a mayor profundidad, en el que se muestra la influencia de las rocas intrusivas, donde el decaimiento de elementos radiactivos puede producir un calor adicional al flujo térmico natural. Al oriente de Matamoros y al norte de Francisco I. Madero la temperatura del agua subterránea que circula en el medio granular es mayor a 30°C, y corresponden a zonas en las que el nivel de saturación se localiza más profundo en comparación con el resto del acuífero, alcanzando de 80 a 100 m de profundidad, debido a los conos de abatimiento generados por la extracción del agua subterránea; ello permite inferir que se trata de sistemas de flujo con mayor profundidad de circulación que son inducidos por los pozos de bombeo. La mayor temperatura medida, 42.5° C se presenta en el pozo 3089, localizado en el extremo sureste, en el afloramiento de calizas al norte de Viesca. En la zona noroeste, al norte de Bermejillo, la temperatura es de 39°C; estas muestras representan sistemas de flujo profundos que circulan a través de rocas calcáreas.

El pH varía de 6.46 a 8.56. Los valores de pH menores a 7 se presentan al norte de la zona conurbada Torreón-Lerdo Gómez Palacio cerca del río Nazas, que corresponde a agua de reciente infiltración; así mismo muestras asociadas a calizas en el extremo noroeste en la zona de Bermejillo y al norte de la exlaguna de Viesca presentan valores de pH menores a 7. El agua subterránea con pH mayor a 8 se presenta en el área norte de la zona de estudio, entre los poblados Finisterre, El Lucero y San José de La Niña, así como al sur en la zona de Matamoros. Estas zonas con pH mayor a 8, geológicamente se caracterizan por ser altamente arcillosas debido al ambiente lacustre y de planicie de inundación que dio origen a los sedimentos de esta porción del acuífero.

El oxígeno disuelto en el agua subterránea varía de 8.3 a 0 mg/l. El agua subterránea en amplias áreas de la zona de estudio se caracteriza por ser anóxica, ya que la concentración de oxígeno disuelto medida es cero mg/l. Ello ocurre al oriente de Matamoros hasta la exlaguna de Viesca, al norte de Francisco I. Madero, desde los poblados El Lucero, Finisterre, y hasta San Pedro de Las Colonias, así como al noreste de Bermejillo. Las mayores concentraciones de oxígeno disuelto se presentan al norte de la zona conurbada Gómez Palacio Torreón, en las cercanías del Río Nazas y en un área desde El poblado Esmeralda hasta San Antonio del Coyote. Así como en las estribaciones de la Sierra El Samoso, indicando su cercanía con la zona de recarga.

La composición química del agua subterránea varía considerablemente en la zona de estudio. Las muestras con mayor salinidad que se observan adyacentes a las sierras calcáreas, al noroeste en la zona de Bermejillo, al este de San Pedro de las Colonias, al norte de Viesca y al norte de la Sierra Las Noas dentro de la ciudad de Torreón, se caracterizan por tener muy altas concentraciones de sulfato y bajas concentraciones de bicarbonato y cloruro. Las muestras que se localizan al oriente de la zona de estudio y al este de Bermejillo presentan elevadas concentraciones tanto de sodio como de calcio, y bajas concentraciones de magnesio, mientras que al noroeste de Bermejillo presentan elevadas concentraciones de calcio, y menores concentraciones de sodio y magnesio. En forma contrastante, muestras de baja salinidad y cuyo anión dominante es el bicarbonato predominan cerca del Río Nazas, al norte y noreste de la ciudad de Torreón. En los alrededores del Río Aguanaval, al suroeste de Matamoros así como al noroeste de Francisco I. Madero y en los alrededores de Finisterre el agua subterránea presenta baja salinidad pero el sulfato es el anión dominante y el sodio es el catión dominante. Las muestras que se localizan en las estribaciones de la Sierra El Samoso presentan al calcio como catión dominante y al bicarbonato y sulfato como aniones principales. La muestra denominada GP, que representa al medio calcáreo es bicarbonatada y el calcio y magnesio son los cationes dominantes.

La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el agua subterránea es una característica importante en la Comarca Lagunera, ya que 85 % de las muestras tienen como anión dominante al sulfato. Al norte de Francisco I. Madero predomina el agua sódica-sulfatada, aunque al oeste de San Pedro de las Colonias se presentan algunas muestras de tipo cálcico-sulfatada. A lo largo de la carretera federal Torreón-Bermejillo existen algunas muestras de agua agrupadas en las familias cálcica-sulfatada y mixta-sulfatada. Considerando las profundidades de los pozos y su relación con el espesor del material granular, las muestras correspondientes a la familia cálcica-sulfatada representan agua subterránea con mayor influencia de las rocas sedimentarias calcáreas, mientras que la familia mixta-sulfatada se relaciona con agua subterránea derivada en mayor proporción del material granular y con menor influencia de las rocas calcáreas.

El agua bicarbonatada se presenta al noreste y oriente de la zona conurbada de Torreón, en parte coincidiendo con el curso del río Nazas. El agua bicarbonatada, en términos generales presenta menores concentraciones de sólidos totales disueltos.

Las diferencias en la composición del agua subterránea sugieren la presencia de distintos medios geológicos con características hidrogeoquímicas e hidrogeológicas diferentes, así como distintos sistemas de flujo subterráneo.

Se efectuó una clasificación hidrogeoquímica de acuerdo a las características químicas y físicas del agua subterránea, y su relación con la geología del subsuelo.

El grupo 1, integrado por las muestras GP, 342, 3441, 774, 347, 2345, 808, Carmen, se caracteriza por ser de tipo bicarbonatada de baja salinidad, con altas concentraciones de oxígeno disuelto, con bajas concentraciones de litio, arsénico y fluoruro; que corresponde a agua de reciente infiltración.

El grupo 2 incluye las muestras de los pozos 2510, 1992, 1041, 1040, 996, 632, 1198, 2002, Desafío y Cepeda; el agua de este grupo se caracteriza por ser sódica y con concentraciones de sólidos totales disueltos menores a 500 mg/l; las concentraciones de litio y de sodio, son mayores a las del grupo 1; el pH característico de este grupo es prácticamente mayor a 8, se caracteriza por ser anóxico y porque las concentraciones de arsénico son muy elevadas (de hasta 718 ppb) al igual que las concentraciones de fosfatos (0.1 a 0.65 mg/l); este grupo se asocia geológicamente a depósitos de origen lacustre con un alto contenido de arcillas, donde el nivel de saturación del agua subterránea es más profundo debido a conos de abatimiento.

El grupo 3, integrado por las muestras 214, 212, 190, 3749, 274, 963, 1533, 1579, 250, 1243, 2156 y 1624, es del tipo sulfatada cálcica y sulfatada mixta con concentraciones de 310 a 600 mg/l de sólidos totales disueltos. En general las muestras localizadas en el valle se ubican cercanas a los arroyos.

El grupo 4 está integrado por las muestras de los pozos Coyote, Vergel, 247, 1500, 2149, 1612, Angeles, 608 y 1308; este grupo es del tipo sulfatada cálcica y sulfatada mixta, con sólidos totales disueltos de 876.5 a 1820 mg/l, la concentración de arsénico de 5 a 46 ppb, con excepción de los pozos 1500, 2149 y 608 en los que las concentraciones de arsénico son 148, 111 y 127 ppb respectivamente y estas muestras son las que contienen un pH mayor dentro del grupo y una menor concentración de oxígeno disuelto.

El grupo 5 está integrado por las muestras tomadas en los pozos 3089, 2760, 1571, 2152, 1915; estos pozos se localizan en las inmediaciones de las Sierras calcáreas y adyacentes a las fallas geológicas que permiten el afloramiento de las unidades Mesozoicas; el grupo 5 se caracteriza por ser del tipo sulfatada sódica y sulfatada mixta, por su alta salinidad (de 1765 a 5370 mg/l), su elevada concentración de sulfato (de 1793

a 2700 mg/l), litio (de 120 a 385 ppb) y arsénico (65 a 240 ppb) y por ser anóxica; Este grupo representa agua subterránea con un largo recorrido en el acuífero a través del medio calcáreo.

El grupo 6 incluye las muestras 554, 2745, 1722, 1477, 1323 y 54; es de elevada salinidad (de 2120 a 4060 mg/l), altas concentraciones de litio (de 145 a 511 ppb) y altos contenidos de arsénico (de 260 a 547 ppb); se asocia a las inmediaciones de las sierras calcáreas al noroeste de la zona de estudio y en la porción oriente; se distinguen del grupo 5 en que las concentraciones de calcio son mucho más significativas que las de sodio, por lo que son sulfatadas cálcicas; representan al agua subterránea que circula a través del medio calcáreo, proveniente del occidente. La concentración de magnesio es elevada en comparación con el resto de las muestras. La concentración de fluoruro es elevada sólo en el aprovechamiento 554 con 2.48 mg/l y en el pozo 1722 con 2.75 mg/l.

El grupo 7 está integrado por las muestras 581, 1030, 2670, Calera, 3035, El Pilar, 1186 y 762. Este grupo se caracteriza por ser del tipo sulfatado sódico, con sólidos totales disueltos de 983 a 2440 mg/l. En este grupo el intercambio catiónico eleva las concentraciones de sodio y el pH, y con ello las concentraciones de arsénico, que son mayores en aquellas muestras con el pH más alto dentro del grupo.

El grupo 8 representa las muestras de agua subterránea recolectadas en la zona de descarga ocurrida en la ciudad de Torreón, en el Cementerio y en El Relleno Sanitario. Evidencias isotópicas e hidrogeoquímicas parecen señalar que estas muestras se ven afectadas por evaporación, al aflorar a la superficie. También es muy probable que se vean afectadas por contaminación antropogénica.

Los resultados isotópicos de oxígeno 18 y deuterio permiten identificar a la evaporación como un proceso importante en algunas muestras de agua subterránea. La composición isotópica no tiene relación directa con la composición hidrogeoquímica. Se clasificó el agua subterránea en tres grupos de acuerdo con su comportamiento isotópico. El grupo isotópico 1 presenta un fraccionamiento isotópico muy marcado debido al efecto de evaporación a partir de la superficie, tanto en aquellas muestras que representan zonas de descarga de agua subterránea (en el Cementerio y el Relleno Sanitario) como en menor medida las muestras 247 y 1243 en las que se observa la posible influencia de las aguas residuales que han sufrido evaporación durante su recorrido a través de los canales a cielo abierto. El grupo isotópico 2, presenta un menor efecto de evaporación y corresponde a muestras localizadas en la antigua zona de llanura de inundación del Río Nazas. El grupo isotópico 3 presenta un fraccionamiento isotópico mínimo por efecto de evaporación; las muestras de este grupo están asociadas al medio calcáreo o intrusivo, en el que la recarga se efectúa a través de fracturas, por lo que la infiltración es rápida e impide el proceso de evaporación, por lo que estas muestras se parecen isotópicamente al agua del Río Nazas. Algunas muestras asociadas a flujo profundo presentan estas

mismas características isotópicas, lo que confirma que su recarga ocurrió en zonas topográficamente altas asociadas con medios fracturados.

La concentración de sulfato en el agua subterránea se incrementa conforme aumenta la interacción agua-roca o el tiempo de residencia en el acuífero, lo que sugiere una fuente de sulfato para toda la zona de estudio, asociada a afloramientos de yeso de las formaciones geológicas que podrían explicar las altas concentraciones de sulfato y calcio en la zona de estudio. Los índices de saturación con respecto al yeso calculados mediante modelación hidrogeoquímica indican subsaturación de este mineral en el agua subterránea, lo que implica que efectivamente la disolución a partir del material geológico que lo contiene permite la incorporación de sulfato y calcio al agua subterráneo. Las altas concentraciones de sulfato y calcio también pueden provenir de la oxidación de la pirita (FeS_2) y reacción con la calcita, aunque se tienen evidencias de importantes cantidades de yeso en el subsuelo y no así de pirita. Sin embargo sólo con relaciones isotópicas del azufre, sería posible definir con mayor certidumbre la ocurrencia de las reacciones de oxidación de pirita u otros sulfuros.

La totalidad del agua subterránea analizada para la zona de estudio se encuentra dentro de la franja de equilibrio con respecto a los minerales de calcita, dolomita y aragonita, por lo que la geoquímica de carbonatos puede ser clave en el control del calcio, magnesio y bicarbonato en el agua subterránea de la zona de estudio. La disolución de minerales carbonatados prevista mediante la modelación hidrogeoquímica es corroborada por los estudios isótopos de ^{13}C en CO_2 realizados por Brouste et. Al. (1997) que indican la existencia de dos orígenes para el carbono inorgánico presente en las aguas subterráneas de la Región Lagunera: uno relacionado al CO_2 de la zona del suelo y otro proveniente de la disolución de carbonatos.

En el acuífero de la Comarca Lagunera existen las condiciones geológicas e hidrogeoquímicas adecuadas para que ocurra el proceso de dedolomitización. En este proceso el incremento en la concentración de calcio debido a la disolución de yeso, ocasiona la precipitación de la calcita por el efecto de ion común; conforme la calcita precipita disminuye la alcalinidad, lo que provoca que el agua subterránea se torne subsaturada con relación a la dolomita, lo que resulta en la disolución de dolomita y el consiguiente incremento de magnesio. El resultado final de estas reacciones es que la disolución de yeso induce la transformación de dolomita en calcita en el material geológico, y se genera agua subterránea con concentraciones de magnesio, calcio y sulfato incrementadas y con la alcalinidad disminuida, tal como ocurre en la zona de estudio.

En zonas que corresponden geológicamente a sedimentos lacustres y planicies de inundación que se caracterizan por ser altamente arcillosas, localizadas en la porción norte de la zona de estudio entre los poblados de Finisterre y El Lucero y al sureste de Matamoros, ocurre el proceso de intercambio catiónico, que tiende a disminuir las

concentraciones de calcio y magnesio y a incrementar las de sodio, como se observa principalmente en el agua subterránea de los grupos 2 y 7. Las reacciones de intercambio catiónico, aunadas a la disolución de carbonatos tienen gran importancia en ciertas porciones del acuífero, debido a que favorecen el incremento del pH. En la medida de que el calcio, magnesio y estroncio son removidos de la solución y reemplazados por sodio y potasio de las arcillas debido al proceso de intercambio catiónico, la solución se toma subsaturada con relación a la calcita y dolomita. Esto permite que se disuelvan nuevamente los carbonatos, produciendo más calcio y magnesio; lo que ocasiona un nuevo intercambio con sodio y como resultado un incremento neto de bicarbonato y por lo tanto un incremento de pH.

Las mayores concentraciones de arsénico se localizan en la zona norte, donde alcanzan valores de hasta 718 ppb en la zona de Finisterre, 470 ppb en las cercanías de Tlahualilo y 547 ppb al norte de Bermejillo; al oriente de San Pedro de las Colonias las concentraciones alcanzan valores de 260 ppb. En la porción sur de la zona de estudio, al oriente de Matamoros el arsénico disuelto es de hasta 288 ppb, y al norte de la exlaguna de Viesca es de 240 ppb. Las menores concentraciones de arsénico se localizan al norte de la zona conurbada, adyacente al Río Nazas, donde las concentraciones varían de 4.7 a 33 ppb. No existe un patrón geográfico en la concentración del arsénico que se relacione directamente con alguno de los parámetros analizados, por lo que se infiere que el comportamiento geoquímico del arsénico en la zona de estudio es complicado y sus altas concentraciones en el agua subterránea se deben a diversos procesos y controles hidrogeoquímicos y posiblemente a diferentes fuentes.

Las elevadas concentraciones de arsénico en el agua subterránea no se asocian directamente a alta salinidad, alta temperatura, elevadas concentraciones de litio o fluoruro, ni a la composición química del agua subterránea. Estudios previos han generalizado las características y el comportamiento hidrogeoquímico del arsénico de unas pocas muestras o casos particulares para toda la zona de estudio. En la Comarca Lagunera existen diferentes procesos geoquímicos que controlan y movilizan al arsénico desde la fase sólida hacia el agua subterránea.

Los índices de saturación calculados para las fases minerales que contienen arsénico indican subsaturación, por lo que no se considera factible que la precipitación de minerales de arsénico constituya un factor de importancia que controle los valores de arsénico medidos en el agua subterránea de la zona de estudio.

En la zona de Bermejillo, al noroeste de la zona de estudio, las muestras con mayores concentraciones de arsénico están asociadas con agua que circula por rocas sedimentarias calcáreas. El arsénico en esta zona tiene mayor concentración en el agua subterránea de mayor salinidad y mayor contenido de sulfato, lo que indica una relación directa con la intensidad de interacción agua-roca calcárea, producida por un mayor tiempo de residencia en el subsuelo, por lo que un mayor recorrido a lo largo de la

dirección de flujo se traduce en mayores concentraciones de arsénico. De aquí se deduce que el arsénico en esta zona se deriva de fuentes naturales presentes en las rocas calcáreas. Existe la posibilidad de que una fuente de arsénico sea la oxidación de los sulfuros diseminados en las rocas calcáreas. Esta reacción además permitiría explicar en parte las elevadas concentraciones de sulfato. En la Sierra de Bermejillo y Tlahualilo existen diversas minas con presencia de sulfuros; además las rocas calcáreas podrían presentar cantidades subordinadas de pirita, sin embargo como se mencionó previamente no se cuenta con la información suficiente para establecer la importancia relativa de la disolución de yeso o la oxidación de sulfuros en relación con el origen del sulfato en el agua subterránea, por lo que no es posible cuantificar hasta que punto la oxidación de sulfuros justifica la presencia de arsénico en la Región Lagunera.

Al sur de Tlahualilo y en la zona de Finisterre y en la zona de Matamoros las concentraciones de arsénico son muy elevadas, pero las características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas en estas zonas son muy diferentes a las observadas en las zonas marginales de la cuenca asociadas a las Sierras calcáreas. En las zonas de Finisterre, Matamoros y al sur de Tlahualilo la salinidad del agua subterránea es muy baja, y se capta a partir de un medio granular. Geológicamente estas zonas se caracterizan por tener un alto contenido de arcillas, debido al proceso sedimentario que les dio origen, ya que se trata de ambientes lacustres y planicies de inundación. Ambas zonas coinciden con conos de abatimiento del nivel de saturación de agua subterránea en la zona, lo que es consecuencia de su carácter altamente arcilloso. La adsorción-desorción del arsénico a partir de los materiales arcillosos en esta porción del acuífero puede ser uno de los factores más importantes que controlan la concentración de arsénico en el agua subterránea.

Los alcances del presente estudio impidieron tomar muestras de sedimentos entre los 100 y 200 m de profundidad, por lo que se carece de elementos suficientes para demostrar este proceso, aunque el análisis de la información sugiere que es el proceso más probable para explicar la movilización del arsénico a partir del material geológico, en el acuífero granular.

La relación entre el pH y la concentración de arsénico disuelto en el agua subterránea, permite observar claramente que para las muestras de salinidad menor a 1500 mg/l, el aumento del pH se relaciona directamente con concentraciones de arsénico cada vez mayores. Específicamente el agua del grupo 2 es el que mayor relación muestra entre el aumento del pH y el incremento de la concentración de arsénico. Ello confirma que ocurre el proceso de desorción y que se incrementa conforme el pH del agua subterránea se eleva. Es importante hacer notar que para los grupos 5 y 6, caracterizados por tener alta salinidad, pH menor a 7.5 y asociación a calizas, el efecto del pH en la concentración de arsénico no tiene importancia. Ello comprueba que las reacciones y procesos que condicionan la presencia de arsénico en el agua subterránea de estos grupos son diferentes a la desorción. Por supuesto que dadas las condiciones anaeróbicas en la

parte norte de la zona de interés, se considera factible que los valores de arsénico detectados, sean producidos por una combinación de reacciones de disolución de óxidos de Fe y Mn y desorción debido al pH del agua subterránea.

Del análisis anterior se desprende que las altas concentraciones de arsénico disuelto en el agua subterránea del grupo 2, sin duda están condicionadas por el pH elevado de estas muestras, ya que el alto pH favorece la desorción del arsénico a partir de los minerales arcillosos o de los óxidos de hierro y manganeso presentes en los sedimentos lacustres de baja granulometría localizados al sur de Tlahualilo, y en las zonas de Finisterre y Matamoros.

Todas las muestras del grupo 2 presentan elevadas concentraciones de fosfatos, en comparación con el resto de las muestras, ya que éste varía de 0.10 a 0.65 mg/l. Este hecho apoya la idea de que el proceso de desorción ocurre en esa porción del acuífero, puesto que la concentración de fosfato en el agua subterránea es controlada por el proceso de adsorción, y además los iones de arsénico y fosfato compiten por los sitios de adsorción en el material geológico.

La comprobación de las hipótesis planteadas para explicar el origen del arsénico a partir de los procesos de desorción a causa del pH del agua subterránea, requeriría de al menos: *i*) el análisis petrográfico de los sedimentos que componen el acuífero en esta parte del área de estudio y a la profundidad de la que es extraída el agua subterránea, a más de 100 m de profundidad, *ii*) analizar el contenido de arsénico en los óxidos y minerales arcillosos presentes en los sedimentos, *iii*) realizar experimentos de extracción del arsénico a partir de los minerales identificados en los sedimentos, conceptos que están fuera del alcance del presente trabajo pero que se recomienda se lleven a cabo en el marco de investigaciones posteriores.

Los resultados de la modelación hidrogeoquímica inversa efectuada para el grupo 2, característico de la zona arcillosa localizada tanto en la zona de Matamoros al sur como en la zona de Finisterre al norte, confirman las reacciones que se habían previsto con el análisis hidrogeoquímico: el intercambio catiónico entre el calcio y el sodio es el proceso dominante, ya que cerca de 3 mmol/L de sodio son incorporadas al agua subterránea a partir del intercambio por calcio con el material geológico. También ocurre a lo largo de la línea de flujo, aunque en menor proporción la disolución de yeso, y se verificó la existencia de reacciones de disolución de calcita y dolomita, lo que genera un incremento en la alcalinidad y elevación del pH.

6. REFERENCIAS

- Albores, A., Cebrián, M.E., Téllez, I., Valdez, B. 1979. Estudio comparativo de hidroarsenicismo crónico en dos comunidades rurales de la Región Lagunera de México, Bol. Of Sanit. Panam., 86 (3), pp. 196-205.
- Armienta, M.A., Villaseñor G., Rodríguez R., Ongley L.K., Mango H. 2001. The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, México. Environmental Geology 40 (4-5) Springer-Verlag, pp 571-580.
- Appelo, C. A. J., Postma, 1993. Geochemistry Groundwater and Pollution. A Balkema Rotterdam. Netherlands.
- Ayote, J. D., Nielsen, M. G., Robinson, G. R. y Moore, R. (1999). Relation of arsenic, iron and manganese in groundwater to aquifer type, bedrock lithochemistry and land use in the New England Coastal Basins, USGS, Water Resources Investigations Report 99-4162.
- Back, W. y Hanshaw, B. B. (1970). Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsula of Florida and Yucatan, Journal of Hydrology, v. 10, 330-368.
- Brouste, L, Marlin, C. y Dever, L. (1997). Geochemistry and residence time estimation of groundwater from the upper aquifer of the Chihuahua desert (Comarca Lagunera, northern Mexico). Applied Geochemistry, v. 12, 775-786.
- Catellano, A.L., Viniegra, G., Eslava, G.R. y Alvarez A. J., 1964. El arsenicismo en la Comarca Lagunera, Salud Pública de México, Época V, V. VI, No. 3, pp. 375-385.
- Carrillo, A., Drever J. (1998) Adsorption of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio-El Triunfo mining area, Baja California, Mexico. Environmental Geology. Vol. 35, No. 4, pp. 251-257
- Cebrián, M. E., Albores, A., Aguilar, M., Blakely, E. 1983. Chronic arsenic poisoning in the North of México, Human Toxicology, 2, pp. 121-133.
- Cebrián, M.E. 1987. Some potential problems in assessing the effects of chronic arsenic exposure in north Mexico, Preprints of papers presented at the American Chemical Society, Division of Environmental Chemistry, 194 Meeting, v. 27, No. 2, pp. 114-116.
- Chávez, A., Bogrand, R., Ramírez J., Pérez, H.C., Hernández, M., Rojas A. 1964. Estudio en una comunidad con arsenicismo crónico endémico. Salud Pública de México, Época V, v. VI, No. 3, pp. 421-449.

- CINVESTAV, 1986. Estudio de calidad del agua para la identificación de compuestos arsenicales en la Comarca Lagunera. Informe Técnico, Dirección de Calidad del Agua. Comisión Nacional del Agua, México.
- CNA, 1992. Actualización del Estudio Geohidrológico de la Comarca Lagunera. Coahuila – Durango. Comisión Nacional del Agua. México.
- CNA, 1992 b. Revisión Geológica e Interpretación de la Geometría del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera, en los Estados de Coahuila y Durango, México. Reporte Interno Comisión Nacional del Agua.
- CNA, 1999. Estudio de Simulación Hidrodinámica de los Acuíferos de la Comarca Lagunera, Coahuila y Durango y de la Cuenca Alta del Río Aguanaval, Zacatecas. Comisión Nacional del Agua. México.
- Davies, J. A. y Kent, D. B. (1990). Surface complexation modeling in aqueous geochemistry: In Mineral-Water interface geochemistry, M. F. Hochella y A. F. White, eds., Reviews in Mineralogy, v. 23, 177-260.
- Del Razo L. M., Arellano, M. A. y Cebrián M.E. 1990. The oxidation states of arsenic in well water from a chronic arsenicism area of northern Mexico, Environ. Pollution, 64, pp. 143-153.
- Del Razo L.M., Corona J.C., García Vargas G., Albores A. Cebrián M.E. 1993. Fluoride levels in well-water from a chronic arsenicism area of northern México, Environmental Pollution, 80, 91-94
- Edmunds W.M. y Smedley P.L. 1996. Groundwater geochemistry and health: an overview. Appleton, J.D. Fuge R. And Mc.Call G.J.H. Environmental Geochemistry and Health. Geological Society Special Publication No. 113, pp. 91-105.
- EPA, 2000. Safewater. United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/safewater>.
- Escobar, M.R., Borja, E.M., Viniestra, G., Catellano a.L., Antopia O.L. y Silvia R.F. 1964. Estudio epidemiológico de la Metalurgia Peñoles, Salud Pública de México, Época V, v. VI, No. 3, p 387-403.
- Espinosa, G. E. 1963. Intoxicación colectiva por arsénico en Torreón, Coah., México. Boletín Epidemiológico, tomo XXVII, No. 4, pp. 213-220.
- Fagundo S. J. Modelagua. Modelación del origen de la composición química de las aguas naturales. Centro Nacional de Termalismo Víctor Santamaría, La Habana, Cuba.
- Fagundo S, J. 2000. Modelo para la determinación del origen de la composición química de las aguas naturales. Tesis de Diploma Universitario, Facultad de Química, Universidad de La Habana, Cuba.

- Freeze, A. and J. A. Cherry, 1979. Ground Water. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., U.S.A., 604 p.
- Garcia, E. (1973). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía-UNAM, México.
- García V.G., García R.A. , Aguilar R. M., García S.J., Del Razo, L.M, Otrosky W. P., Cortinas N.C. y Cebrián M.E. 1991. A pilot study on the urinary excretion of prophyryns in human populations chronically exposed to arsenic in México. Human and Experimental Toxicology, 10, pp. 189-193.
- Gorby, M.S. 1994. arsenic in human medicine. In J.O. Nriagu (ed) Arsenic in the Environmental, Part II. Human and Ecosystem Effects J. Wiley and Sons. Inc. New York
- Gutiérrez, O.C. 1995. Origin of arsenic in the alluvial aquifer of the Region Lagunera, States of Coahuila and Durango, México. Tesis presentada para obtener el grado de Maestro en Ciencias en la Universidad de Arizona, pp 244.
- INEGI, 2000. XII Censo General de Población y Vivienda Estadísticas Sociodemográficas por Entidad Federativa. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
<http://www.inegi.gob.mx/estadística/espanol/sociodem/asentamientos>
- IMTA, 1991 (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). Estudio hidrogeoquímico e isotópico del Acuífero Granular de la Comarca Lagunera. México.
- Jenne, E.A., Ball, J.W., Burchard, J.M., Vivit, D.V. y Barks, J.H., 1980. Geochemical modeling: apparent solubility controls on Ba, Zn, Cd, Pb and F in waters of the Missouri Tri-State mining area. En Hemphill, D.D. Trace Substances in environment health. XIV. University of Missouri, Columbia, pp. 353-361.
- Langmuir, D. (1997). Aqueous environmental geochemistry. Prentice Hall, New Jersey.
- Lloyd, D. W., Heatcote. 1985. Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater. St. Edmundsbury Press. Great Britain.
- National Academy of Sciences (1999). Arsenic in drinking water: Washington, D. C., National Academy Press, 273 pp.
- National Institute of Health (1998). Risk/exposure assessment research highlights; 1997-1999: National Institute of Environmental Health Sciences, Superfund Basic Research Program.
- URL: <http://www.niehs.nih.gov/sbrp/newweb/sbrpdyhigh9596/ra-exp.html/>.

- Ortíz, M.C., Olivera T.R. y Verduzco, G. E. 1963. Intoxicación colectiva por arsénico en Torreón Coahuila, México. Boletín Epidemiológico, Tomo XXVII, No. 4, pp. 221-252.
- Ostrosky, W.P., Gonsebatt. M.E., Montero R., Vega L., Barba H., Espinosa J., Palao A., Cortinas C., García V.G., Del Razo L.M., Cebrián M. 1991. Lymphocyte proliferation kinetics and genotoxic findings in a pilot study on individuals chronically exposed to arsenic in Mexico, Mutation Research, 250, pp. 477-482.
- Payne, B.R. (1988). The status of isotope hydrology today. Journal of Hydrology, 100, 207-237.
- Plummer, L. N., Busby, J. F., Lee, R. W., y Hanshaw, B. B. (1990). Geochemical modeling in the Madison aquifer in parts of Montana, Water Resources Research, v. 26, 1981-2014.
- Quiñones, A., Gosset, I. G., Carboney, A., Cortinas de Nava C. e Ito, F. 1979. Arsénico y Salud, Salud Pública de México, XXI, p. 187-197.
- Rosas I., Belmont R., Armienta A., Baez A. 1997. Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, Mexico.
- Sánchez de la Fuente E. 1976. Arsenicismo crónico en la zona rural de la Comarca Lagunera, Trabajo presentado en la XXXIV Reunión Anual de la Asociación Fronteriza Mexicana-Estadounidense de Salubridad.
- Simo, J. A., Freiberg, P. G. y Freiburg, K. S. (1996). Geologic constraints on arsenic in groundwater with applications to groundwater modeling: Groundwater Research Rept. WRC GRR 96-01, University of Wisconsin.
- SSA (Secretaría de Salubridad y Asistencia). 1986. Evaluación del contenido de arsénico en el agua para consumo humano en la Comarca Lagunera, Informe Técnico, México.
- SSA (Secretaría de Salubridad y Asistencia). 2002. Modificación a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA-1994 Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
www.ssa.gob.mx/unidades/cdi/nom/m/27ssa14.html
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1989).
- Viniegra, G. Escobar, M.R., Borja E.M. y Caballero, P.J. 1964. La polución atmosférica e hídrica de Torreón, Coah. Salud Pública de México, Época V, v. VI, No. 3, pp. 405-414.

- Welch, A. H.; Lico, M. S.; Hughes J.L. (1988). Arsenic in Groundwater of the Western United States. Vol. 26, No. 3, Groundwater, pp. 333-347.
- Welch, A. H., Helsel, D. R., Focazio, M. J. y Watkins, S. A. (1999). Arsenic in groundwater supplies of the United States in: Arsenic exposure and health effects, W. R. Chappell, C. O. Abernathy y R. L. Calderon, Eds., Elsevier Science, New York, 9-17.
- Welch, A. H.; Westjohn D.B.; Helsef D.R.; Wanty R.B. (2000) Arsenic in Groundwater of the United States: Ocurrence and Geochemistry. Groundwater Vol. 38, No. 4, July-August 2000, pp 589-604.
- WHO (World Health Organization) 2001. WHO guidelines for drinking water quality. www.who.int