

7.  
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO,  
FLÚOR Y FIERRO EN LOS ACUÍFEROS DE  
DELICIAS-MEOQUI Y JIMÉNEZ-CAMARGO  
EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
QUÍMICA DE ALIMENTOS  
P R E S E N T A

MARIANA BOLÍVAR GÓMEZ



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

MEXICO, D.F.,

1999.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

271538



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

Jurado Asignado

Presidente: Profesor Hidalgo Torres Miguel Angel

Vocal: Profesora Cornejo Barrera Lucía

Secretario: Profesora Gil Vieyra Leticia

1er. Suplente Profesora Calderón Villagómez Hilda Elizabeth

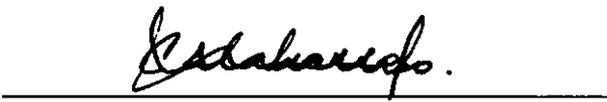
2do. Suplente Profesor Pérez Enríquez Luis Antonio

Sitio donde se desarrolló el tema: Comisión Nacional del Agua  
Av. Insurgentes Sur 1960, Planta Baja  
México, D.F.

Nombre completo y firma del asesor del tema

  
M. en C. Lucía Cornejo Barrera

Nombre completo y firma del supervisor técnico

  
M. en C. Patricia Calahorra Fuertes

Nombre completo y firma del sustentante

  
Mariana Bolívar Gómez

*Dos fuertes árboles decidieron unir sus vidas y entretrajieron sus ramas creando un fuerte roble capaz de soportarlo todo. Un buen día decidieron dar frutos y se dieron a la tarea de cuidarlos con mucho amor, los regaban a diario, agitaban sus ramas para divertirlos y darles libertad; finalmente los frutos maduraron. El roble se agitó permitiendo que sus frutos fueran libres, al caer sintieron un gran orgullo y una gran seguridad de vivir. En ramas del árbol aprendieron el verdadero sentido de la vida. Desde ese momento los frutos iniciaron su camino siempre con el regocijo de poder regresar a esa mágica fronda a escuchar consejo.*

*A ese, mi roble, Chipi y José María dedico no solo este trabajo sino el compromiso de ser feliz, de vivir siempre con honestidad, integridad, dignidad y responsabilidad. Llevaré siempre todo el amor que me dieron y siguen dando en todas mis acciones.*

*A mis cinco frutos compañeros Andre, Adri, José, Kike y Fer, gracias por ser partícipes de mi vida.*

*A mis cinco flores, Andre, Nonín, Fer, Tiago y Sofi, gracias por llenar mi vida de ternura.*

*A Patricia Calahorra por su valiosa ayuda y consejo en la realización de este trabajo. Muchas gracias.*

*A todos mis maestros por enseñarme que no existe mayor tesoro que el conocimiento, que es este último el que alimenta y engrandece el alma.*

*Con todo mi amor dedico a Wicha, Mer, Ale, Caro, Cynthia, Angel y Bryan este trabajo y les doy las gracias por todo lo que significan para mí.*

*A Erick por llenar mi vida de alegría, paz y amor.*

---

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>1.1. OBJETIVO GENERAL</b>	9
1.1.1. Objetivos particulares	9
<b>2. ANTECEDENTES</b>	10
<b>2.1. AGUA</b>	10
2.1.1. Propiedades del agua	12
2.1.2. ESTADO FÍSICO DEL AGUA	16
<b>2.2. CICLO HIDROGEOLOGICO</b>	17
<b>2.3. VALORES QUIMICOS GUIA</b>	23
2.3.1. Naturaleza de los valores químicos guía	23
2.3.2. OBTENCIÓN DE LOS VALORES GUIA PARA SUSTANCIAS QUIMICAS TOXICAS	24
2.3.3. ASPECTOS FISICOQUÍMICOS	25
<b>2.4. Componentes inorgánicos que afectan a la salud</b>	29
<b>2.5. ELEMENTOS TOXICOS PRESENTES EN EL AGUA</b>	30
2.5.1. Arsénico	30
2.5.2. Flúor (F)	38
2.5.3. Hierro (Fe)	39
<b>2.6. GENERALIDADES DE HIDROGEOQUÍMICA</b>	40
<b>2.7. EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DEL AGUA</b>	43
2.7.1. Técnicas de estudio	44
2.7.2. Métodos gráficos	48
2.7.3. Mapas Geohidroquímicos	55
<b>3. ZONA DE ESTUDIO</b>	57
<b>3.1. Antecedentes</b>	57
<b>3.2. Características físicas</b>	57
<b>3.3. Climatología</b>	58
<b>3.4. Determinación de la población y su distribución</b>	59
<b>3.5. Acuíferos de la zona de estudio</b>	62
<b>3.6. Fisiografía, geomorfología, y geología estructural de la zona de estudio</b>	62
3.6.1. Fisiografía	62
3.6.2. Geomorfología	63

3.6.3.	Geología Histórica _____	64
3.6.4.	Geología Estructural _____	65
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍA _____</b>	<b>67</b>
4.1.	REALIZACION DE LA CAMPAÑA DE MUESTREO _____	67
4.1.1.	Definición de los puntos de muestreo _____	67
4.1.2.	Análisis de muestras _____	68
4.2.	REALIZACION DE UNA SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO _____	68
	4.3.COMPROBACIÓN DE LA FIABILIDAD DE LOS RESULTADOS DE LA SEGUNDA CAMPAÑA _____	69
4.4.	Clasificación de la zona de estudio _____	69
4.4.1.	Zona Norte _____	70
4.4.2.	Zona sur _____	70
4.5.	Interpretación, tratamiento y análisis de resultados mediante el uso del ICB, Diagramas de Stiff, y diagramas de Piper _____	70
4.6.	Análisis de resultados _____	71
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS _____</b>	<b>72</b>
5.1.	Primera campaña de muestreo _____	72
5.2.	Segunda campaña de muestro _____	80
5.3.	Zona norte _____	84
5.3.1.	Configuración $rSO_4/rHCO_3$ _____	87
5.4.	Zona Sur _____	93
5.4.1.	Configuración $rNa/rCa$ _____	98
5.5.	Interpretación gráfica. _____	103
5.5.1.	Gráficas de arsénico vs. otros parámetros. _____	104
<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS _____</b>	<b>121</b>
6.1.	ANÁLISIS DE IONES MINORITARIOS Y ELEMENTOS TRAZA (As, F, Fe) EN LAS DOS CAMPAÑAS DE MUESTREO _____	121
6.1.1.	Distribución espacial de los iones minoritarios y elementos traza (As, F, Fe). _____	122
6.2.	DIAGNÓSTICO GENERAL PRELIMINAR. _____	141
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____</b>	<b>143</b>

---

<b>7.1. CONCLUSIONES.</b>	<b>143</b>
<b>7.2. RECOMENDACIONES.</b>	<b>146</b>

<i>Figura 1: Representación de un diagrama de Collins.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2: Representación de un diagrama de Piper.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3 : Identificación de relaciones en un diagrama de Piper.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4: Representación de diagramas de Stiff.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5 : Localización de la zona de estudio.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6: Diagrama de Stiff Modificado, Delicias, Chihuahua.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 7 : Configuración de <math>rSO_4 / rCO_3</math> en Delicias, Chihuahua.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 8 : Diagrama de Piper-Hill-Langelier, para las aguas subterráneas de la zona acuífera de Delicias - Meoqui.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 9 : Configuración de <math>rNa / rCa</math> en Delicias, Chihuahua.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 10 : Diagramas de Stiff Modificado, Camargo.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 11 : Diagramas de Stiff Modificado, Jiménez.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 12 : Configuración de <math>rNa / rCa</math>, Camargo.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 13 : Configuración de <math>rNa / rCa</math>, Jiménez.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 14 : Diagrama de Piper-Hill-Langelier, para las aguas subterráneas de la zona acuífera Jiménez Camargo.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 15 : Evolución de los iones predominantes en toda la zona de estudio.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 16 : Configuración de la temperatura en Delicias, Chihuahua.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 17 : Configuración de la temperatura en Camargo.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 18 : Configuración de la temperatura en Jiménez.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 19 : Configuración de <math>SO_4</math> en Delicias, Chihuahua.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 20 : Configuración de <math>SO_4</math> en Camargo.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 21 : Configuración de <math>SO_4</math> en Jiménez.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 22 : Representación Gráfica de As, Camargo.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 23 : Representación Gráfica de As, Jiménez.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 24 : Representación Gráfica de As, Delicias.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 25 : Representación Gráfica de As, Camargo.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 26 : Representación Gráfica de As, Jiménez.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 27 : Representación Gráfica de As, Delicias.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 28 : Esquematzación de la dirección preferente de las fallas de As, Fe, y F, Delicias.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 29 : Esquematzación de la dirección preferente de las fallas de As, Fe, y F, Camargo.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 30 : Esquematzación de la dirección preferente de las fallas de As, Fe, y F, Jiménez.....</i>	<i>133</i>

*Figura 31 : Configuración de Flúor en Delicias, Chihuahua..... 136*  
*Figura 32 : Configuración de Flúor en Camargo..... 137*  
*Figura 33 : Configuración de Flúor en Jiménez..... 138*

<i>Gráfica 1 : Relación entre los contenidos (ppm) de <math>SO_4^{2-}</math> y <math>HCO_3^-</math> .....</i>	90
<i>Gráfica 2 : Relación entre el contenido de As (mg/l) y la T (°C).....</i>	104
<i>Gráfica 3 : Relación entre el contenido de As (mg /L) y el contenido de <math>SO_4</math> (mg /L).....</i>	110
<i>Gráfica 4 : Relación entre el contenido de As (mg/L) y el contenido de Fe (mg/L).....</i>	115
<i>Gráfica 5 : Relación entre el contenido de As / mg/L) y la C.E. (mS/cm).....</i>	116
<i>Gráfica 6 : Relación entre el contenido de As (mg / L) y el contenido de F (mg/L).....</i>	117
<i>Gráfica 7 : Relación de la Temperatura (°C) y el Flúor (mg / L) .....</i>	119
<i>Gráfica 8 : Relación de la Temperatura (°C) y <math>SO_4</math> (mg/L).....</i>	119
<i>Gráfica 9 : Relación de la Temperatura (°C) y Fe (mg/L).....</i>	120

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua tiene infinidad de usos y aplicaciones, su consumo aumenta cada día, de tal manera que las reservas acuíferas están disminuyendo continuamente. Muchos países, preocupados por este problema, así como por la aplicación de técnicas para tratar las aguas residuales, están desarrollando nuevas tecnologías para ayudar a aprovechar más eficientemente este líquido.

Durante los últimos años se ha venido manifestando en diversas localidades de la República Mexicana la presencia de elementos naturales en el agua de abastecimiento, de procedencia subterránea, que en concentraciones superiores a las normas vigentes causan trastornos de salud en las personas que tienen la necesidad de consumirla.

Debido a que se trata de elementos que generalmente se encuentran en concentraciones traza, no era común que se realizaran los análisis de los mismos de forma rutinaria para determinar la potabilidad del agua, de hecho, la mayor parte de las veces ni siquiera se sospechaba su presencia por lo que no se pensaba en analizarlos. A últimas fechas y gracias a los avances tecnológicos en materia de equipos analíticos ha sido más sencillo y común el buscar estos elementos en el agua.<sup>1</sup>

La incidencia de diversas afecciones de forma crónica en distintas localidades, ha obligado a la búsqueda del origen de dichas enfermedades, y así se ha llegado a encontrar que es el agua potable la principal causante de estas complicaciones.

El presente trabajo surge como respuesta a la problemática observada en los últimos años debida a la presencia de varios elementos tóxicos en concentraciones superiores a las máximas permisibles para uso de agua potable, en las aguas subterráneas del país, lo que se ha manifestado en problemas de salud.<sup>2</sup>

Los elementos a que se refiere a continuación, y que es necesario eliminar del agua para poder volverla a niveles de potabilidad, no provienen del exterior, no han sido introducidos por errores humanos o por falta de higiene, sino que se encuentran en forma natural, son intrínsecos de las formaciones geológicas por las cuales el agua circula. A esta diferenciación entre haber sido introducidos de forma antropogénica o de que se encuentren de forma natural, se debe la diferencia entre hablar de contaminación (antropogénica) o mala calidad del agua (natural), por lo que en el presente trabajo se estará hablando de mala calidad del agua subterránea.

En términos generales y sin pretender abarcar en su totalidad todas las zonas en donde se ha presentado este problema, el cual cabe mencionar tiene como eje al arsénico, aunque posteriormente se han presentado otros elementos igualmente indeseables en el agua potable a los que se hará referencia más adelante, incluye en una primera etapa al estado de Chihuahua.

## 1.1. OBJETIVO GENERAL

Buscar las alternativas más adecuadas, tanto técnicas como económicas, que permitan el abastecimiento de agua que cumpla con los requerimientos de potabilidad para poblaciones afectadas por metales pesados en el agua de consumo.

### 1.1.1. Objetivos particulares

- Conocer el origen de estos elementos, el porqué de su presencia en las aguas subterráneas, su incidencia dentro de las zonas estudiadas, su alcance y su relación con otros factores,
- Buscar un método para que a futuro sea posible tener las herramientas necesarias para elegir sitios de abastecimiento y procurar no captar este tipo de aguas.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. AGUA

Debido a que no tiene un valor energético, ya que no sufre cambios químicos durante su utilización biológica, el agua en muchas ocasiones no se considera como nutrimento; sin embargo, sin ella no podrían llevarse a cabo las reacciones bioquímicas; es así que se considera que la vida en nuestro planeta se originó precisamente gracias a la presencia de este compuesto.<sup>3</sup>

Las principales funciones biológicas del agua estriban fundamentalmente en su capacidad para transportar diferentes sustancias a través del cuerpo, disolver otras y mantenerlas tanto en solución como en suspensión coloidal; esto se logra por que puede permanecer líquida en un intervalo de temperatura relativamente amplio y por sus enormes propiedades de disolvente.

Muchas de las macromoléculas con interés bioquímico, como son las proteínas, las enzimas y los ácidos nucleicos, se vuelven activas cuando adquieren sus correspondientes estructuras secundaria, terciaria, etc., gracias a la interacción que establecen con el agua, es decir, las células de los tejidos animal y vegetal, así como los microorganismos, sólo se pueden desarrollar si encuentran un medio adecuado en el que el contenido de agua sea

decisivo; por esta razón algunos sistemas de conservación de alimentos se basan precisamente en la deshidratación.

La mayoría de los organismos y en general, los sistemas biológicamente activos, contienen una gran proporción de agua, que en algunos casos llega a representar hasta 97% del peso total. Cerca de 70% del cuerpo humano es agua aun cuando hay ciertos tejidos como huesos, cabellos y dientes en que es escasa.

El organismo pierde agua continuamente por diferentes vías, tales como el sudor, la orina, la respiración y las heces, y requiere un mínimo aproximado de 2,500 mL diarios para efectuar todas sus funciones adecuadamente.

**Tabla 1: Balace de agua en el ser humano.**

Fuente	Agua ingerida (mL/día)	Fuente	Agua perdida (mL /día)
Alimentos.	850	Orina	1500
Bebidas.	1300	Pulmones	400
Oxidación de		Piel	500
nutrimientos.	350	Heces	100
<b>Total</b>	<b>2500</b>		<b>2500</b>

Para el ser humano, la fuente más importante de agua está en los líquidos que ingiere, pero también la toma de diferentes alimentos, como son

ciertos vegetales que contienen hasta un 95% de este líquido; de la leche, que tiene un 87%, y de los huevos un 75%.<sup>3,4</sup>

### 2.1.1. Propiedades del agua

La molécula del agua esta constituida por dos átomos de hidrógeno unidos en forma covalente a uno de oxígeno, es altamente polar, no es lineal y crea estructuras tridimensionales debido a la hibridación de las órbitas moleculares *s* y *p* del oxígeno; las *1s* del hidrógeno comparten dos electrones con las híbridas  $sp^3$  del oxígeno. A su vez, este elemento tiene un par de electrones libres considerados como dos fuerzas separadas, que junto con los dos enlaces covalentes, establece una molécula con forma de tetraedro.

En el agua existe una diferencia de electronegatividades que se debe precisamente a que el oxígeno tiene un gran poder de atracción por los electrones de los dos hidrógenos, lo que ocasiona que estos desarrollen una carga parcial positiva  $\delta (+)$ , y el átomo de oxígeno una carga parcial doble negativa  $2 \delta (-)$ ; esto hace que se produzca un momento dipolar muy fuerte. Es decir la molécula de agua no tiene una carga determinada, pero si un dipolo eléctrico potente que le permite crear puentes de hidrógeno estables con otras iguales o diferentes, pero de naturaleza polar.

El puente de hidrógeno es el resultado de una atracción electrostática y se produce cuando dos átomos cargados negativamente se unen mediante uno de hidrógeno, de tal manera que solamente pueden participar los elementos

más electronegativos, como es el caso del nitrógeno, el flúor y el oxígeno. No es propiamente un enlace químico, sino solamente una fuerza de unión electrostática entre átomos provenientes de compuestos polares. Pese a que este enlace es muy débil, dado que lo establecen todas las moléculas del agua en determinado momento, en conjunto representa una gran fuerza

Debido a sus cargas parciales, cada molécula de agua tiene dos sitios que actúan como receptores y dos como donadores de electrones, por lo que la interacción de ellas puede crear estructuras tridimensionales estables, responsables de sus propiedades físicas tan peculiares.

Las temperaturas bajas lo favorecen mientras que las altas los inhiben ; se considera que en el hielo 100% de las moléculas establecen puentes de hidrógeno, y que en el vapor este porcentaje es de cero.

Las funciones biológicas del hombre se efectúan normalmente en un intervalo muy corto de temperatura, alrededor de 37°C, que es la del cuerpo humano; debe existir, pues, alguna relación entre la estructura del agua en estas condiciones y la facilidad para que se lleven a cabo las reacciones que sustentan la vida. Cabe mencionar que a 37°C, el agua establece de 35 a 47% de puentes de hidrógeno .

Estas propiedades del agua se deben a la gran fuerza de atracción que se establece entre sus moléculas por medio de los puentes de hidrógeno que producen una cohesión interna muy importante; por esta razón permanece líquida en condiciones en que debería existir como gas.

Además tiene otras características peculiares como es el alto valor de su calor específico ( 1.0 cal/g °C, a 20°C), que es uno de los más elevados entre un gran número de sustancias; cuando se suministra energía térmica a los líquidos en los que no existen puentes de hidrógeno, la cinética de las moléculas aumenta, y por tanto, la temperatura; en el caso del agua, parte de esta energía se usa principalmente para romper dichas uniones, de allí que se requiera una mayor cantidad de calor para incrementar la temperatura.<sup>4, 5</sup>

Esto es importante en la regulación de la temperatura del cuerpo humano, ya que el alto calor específico provoca que el agua absorba el calor cuando hay cambios bruscos en la temperatura externa sin afectar la interna, En forma semejante, también hace que los mares y los océanos actúen como reguladores térmicos de nuestro planeta.

Otra propiedad interesante del agua es su elevado calor de vaporización, es decir se requiere de mucha energía para vaporizar poca agua o que la vaporización de pequeñas cantidades de agua es suficiente para sustraer mucho calor. Esto explica por que la vaporización del sudor es responsable de la mayor parte del calor perdido por un organismo.

Por otra parte, debido a su elevado momento eléctrico dipolar, el agua es el disolvente universal, con una infinidad de aplicaciones y usos, En la naturaleza existe un gran número de disoluciones, como son los océanos, los mares, los lagos, los ríos etc. Al igual que los alimentos, el plasma sanguíneo y la orina, que desempeñan un papel muy importante en la vida de este planeta.

Muchas sales, e infinidad de compuestos iónicos ,no iónicos etc., sólo se solubilizan en agua y nunca en disolventes apolares o en grasas.

En general, al disolver una sal se crean iones positivos y negativos rodeados de moléculas de agua, e integran especies muy estables cuyo grado de hidratación depende de la intensidad de carga del ion; a ésta también se la conoce con el nombre de poder polarizante, y es igual a la carga total del ion, dividida entre el radio iónico. Para una misma carga, la retención de agua es mayor en los iones pequeños que en los grandes; se puede comprobar que la hidratación del  $K^+$  es menor que la del  $Na^+$ , ya que el radio del primero es mayor y consecuentemente su densidad de carga es menor.

El agua es un buen disolvente debido a su alta constante dieléctrica, que por definición es una medida de la tendencia del disolvente a oponerse a las fuerzas electrostáticas de atracción entre iones con carga opuesta.

El agua también disuelve diversas sustancias no iónicas pero con carácter polar, como azúcares, alcoholes, aldehídos, cetonas, aminoácidos y otros; muchos compuestos polares tienen grupos carbonilos, aminos, hidroxilos o carboxilos que pueden fácilmente interaccionar con ella por medio de puentes de hidrógeno.

Cabe indicar que la disolución se efectúa cuando la concentración del agua es muy superior a la del soluto ; sin embargo cuando ésta es baja las sustancias no se disuelven, solamente se hidratan, y forman fluidos muy

viscosos o incluso geles , en los que el agua queda retenida también por puentes de hidrógeno.<sup>3,6</sup>

### 2.1.2. ESTADO FÍSICO DEL AGUA

De acuerdo a la cantidad y la duración de los puentes de hidrógeno antes mencionados, el agua puede presentar los tres estados físicos conocidos: gas, líquido y sólido. A una atmósfera de presión, estas formas están en función exclusivamente de la temperatura, por lo que a 0°C se presenta como hielo y a 100°C, como vapor; sin embargo, a una presión de 610.4KPa o 4.579 mm de Hg y a 0.0099°C (el llamado punto triple), se considera que dichos estados físicos se encuentran conjuntamente en equilibrio.

Las conversiones de un estado a otro se pueden llevar a cabo modificando la presión y la temperatura, aunque en la mayoría de los casos se produce a presión atmosférica.<sup>5</sup>

#### **Propiedades físicas del agua a nivel del mar:**

- Peso molecular: 18
- Temperatura de fusión °C: 0
- Temperatura de ebullición °C: 100
- Intervalo en estado líquido °C: 0°C < líquido < 100°C

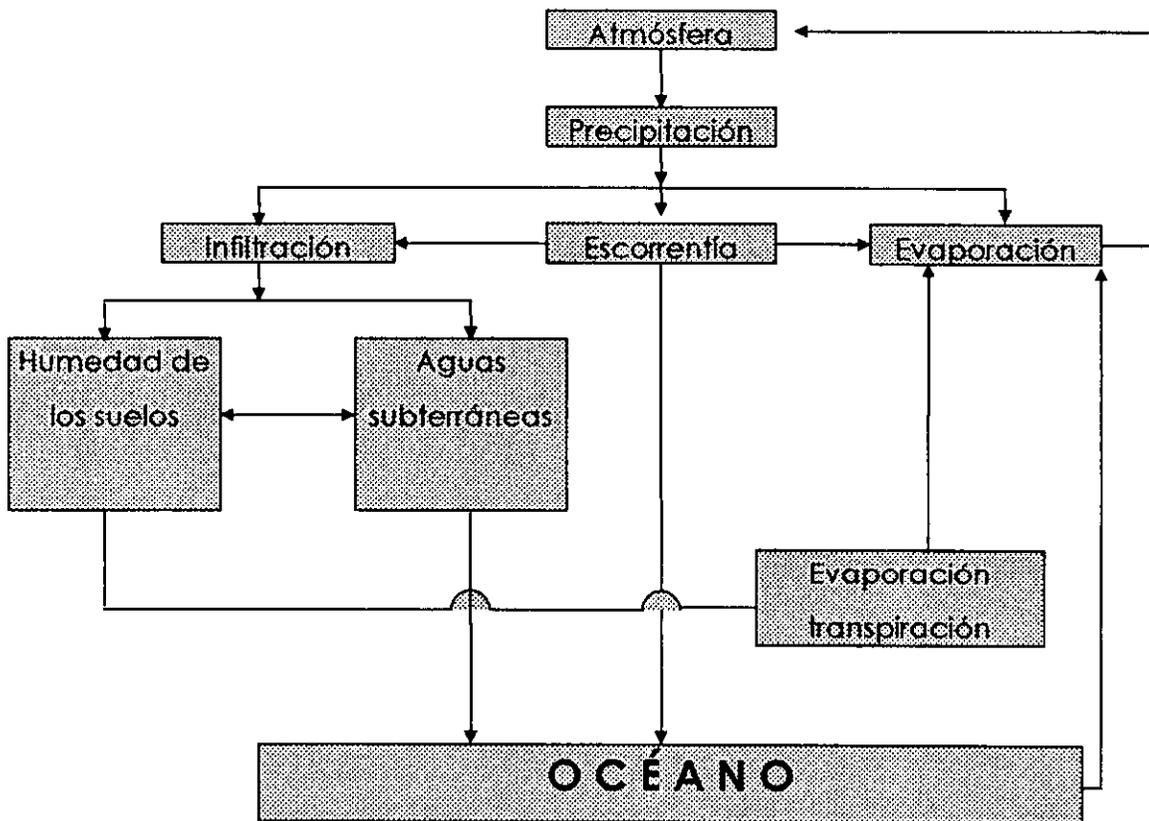
## 2.2. CICLO HIDROGEOLOGICO

Los océanos son los inmensos depósitos de los cuales procede toda el agua del ciclo hidrológico y a los cuales retorna. Esta definición es un tanto simplista, pues no todas las partículas de agua recorren el ciclo hidrológico de una manera completa; éste sería, por ejemplo, el caso de las partículas de agua que se evaporan sobre la superficie de la tierra y vuelven a la tierra en forma de lluvia, desde donde se evaporan de nuevo, y así indefinidamente, sin llegar nunca a alcanzar el océano. En el caso más completo del ciclo hidrológico del agua, ésta se evapora desde el océano, forma las nubes, las cuales son transportadas hacia los continentes donde se condensan y caen en forma de precipitaciones, las cuales, a su vez, son conducidas por medio de los ríos y del flujo subterráneo hasta el océano. Existe una pequeña aportación de agua al ciclo hidrológico que procede de los procesos magmáticos y metamórficos, existe también en contraposición, una sustracción constante de agua al ciclo hidrológico que pasa a incorporarse a la estructura de los minerales y de los depósitos sedimentarios.

Desde un punto de vista práctico el volumen de agua de los océanos ha permanecido aproximadamente constante durante los últimos quinientos millones de años, de donde se deduce que la cantidad total de agua del ciclo hidrológico ha permanecido también constante.

Las aguas que constituyen las reservas mundiales participan en sus diversas formas en el ciclo hidrológico, que permite la circulación de grandes volúmenes en cada año climático.

El ciclo hidrológico puede ser representado esquemáticamente de muchas maneras. Todas estas representan un proceso continuo, simultáneo, e interminable entre dos grandes depósitos, el océano y la atmósfera.<sup>7, 8, 9</sup>



La atmósfera actúa como una esponja y el espacio poroso entre las moléculas de los diversos gases que la forman es susceptible a aumentos o disminuciones de acuerdo a su temperatura y presión. Así, la capacidad absorbente de vapor de agua por la atmósfera está controlada por su grado de

saturación de humedad en un momento dado, por el balance energético de la radiación solar y la disponibilidad de agua libre que pueda evaporarse.<sup>10</sup>

Cuando la atmósfera se sobresatura, ocurre la precipitación en cualquiera de sus formas , nieve, lluvia o rocío.

La precipitación que se puede medir es la que alcanza la superficie de la tierra, ya que en su descenso parte de ella puede ser absorbida por la atmósfera nuevamente en forma de vapor. Ocurre mayoritariamente en ciertas épocas del año y su magnitud es muy variable de un sitio a otro. La intensidad también es muy variable en un mismo sitio. Estas circunstancias hacen necesaria la acumulación de muchas observaciones antes de poseer un promedio confiable.<sup>10</sup>

Una vez que la precipitación toca el terreno se inician varios procesos distintos:<sup>9</sup>

1. El agua moja la superficie y el flujo calórico del suelo provoca una fuerte evaporación.
2. Parte del agua se infiltra llenando los poros del suelo inmediato a la superficie.
3. Se satura la capa de suelo lo que ocasiona dos comportamientos :
  - Formación de una barrera impermeable que obliga al exceso de lluvia a escurrir por la superficie de acuerdo a la pendiente.
  - Drenando hacia capas mas profundas, recargando los acuíferos.

En consecuencia la capacidad de recarga de los acuíferos depende, entre otros, de los siguientes factores :

1. Características de la precipitación ( estado físico del agua : nieve, lluvia o granizo).
2. Intensidad y duración de la precipitación.
3. Pendiente del terreno.
4. Cobertura vegetal.
5. Permeabilidad del terreno.

La escorrentia en su camino, efectúa varios procesos: descompone y disuelve las rocas sobre las cuales se desliza, arrastra y suspende partículas sólidas y en sitios apropiados deposita su carga. Estos procesos esculpen el paisaje determinando en forma mas o menos importante las diversas formas fisiográficas de la superficie.

La vegetación requiere humedad para vivir y las raíces remueven por transpiración el agua peculiar y cualquier otra que se encuentre en la zona donde ellas se desarrollan.

En las regiones áridas la precipitación es inferior a la demanda de agua de la vegetación y el agua de los suelos es totalmente removida por evapotranspiración. Para que el agua infiltrada alcance un acuífero es necesario que después de haber mojado las partículas del suelo quede un excedente (agua gravitacional). Este descenderá por debajo de la zona de raíces, quedando así protegido contra la evapotranspiración.

Las aguas gravitacionales viajan verticalmente hasta encontrar una capa de permeabilidad baja sobre la cual comienza a acumularse hasta saturar el espacio poroso constituyendo así un acuífero. Las aguas de los acuíferos se mueven lateralmente por diferencias de presiones causadas por la inclinación de la capa impermeable que constituye su límite o por la inclinación misma de la superficie de saturación.

Podemos definir como acuífero a una formación geológica que permite la acumulación de agua en su interior y su posterior explotación económica. En consecuencia este concepto ha venido variando en el tiempo y el espacio, de manera que rocas que hoy se consideran acuíferas no lo eran cuando no existían las bombas actuales, y de igual modo una que no considera acuífera un agricultor de maíz, puede serlo para una industrial cervecera.<sup>10</sup>

La humedad acumulada entre los granos de un suelo cerca de la superficie es susceptible a evaporarse y pasar a la atmósfera. La evaporación del agua de los suelos ocurre de igual manera que la de la superficie de aguas libres. Las aguas limpias libres y los suelos oscuros absorben mayor energía que los suelos claros y la nieve.

La evaporación ocurre cuando se dispone de energía solar, y existe el agua necesaria para consumir esa energía durante la evaporación. Por esta sencilla razón es particularmente difícil medir la evaporación directa de una región.

Otro proceso que consume las aguas acumuladas en el suelo es la transpiración de las plantas.

La capacidad de transpirar el agua que circula por la estructura de las plantas varía con cada especie. Existen por ejemplo plantas que poseen raíces muy profundas que suelen alcanzar la mesa de agua y generosamente transpiran el agua, consumiendo grandes volúmenes de las reservas, estas plantas (freatofitas) sirven para detectar acuíferos en los desiertos.

En esta descripción sucinta del ciclo hidrogeológico se ha tratado de puntualizar la complejidad del proceso.

Para cada región es necesario evaluar que partes del ciclo son las importantes y cuáles de ellas figuran en el balance hidrogeológico, el cual puede sintetizarse en la fórmula del balance hidrológico, que en forma simplificada se expresa:<sup>7</sup>

$$P = E_s + E_{vT} + I$$

Donde:

P = Precipitación

E<sub>s</sub> = Escurrimiento

E<sub>vT</sub> = Evapotranspiración

I = Infiltración

El establecimiento de estaciones hidrogeológicas y la exploración geológica son la base fundamental de la correcta interpretación de una zona en la que se desea aprovechar sus recursos de manera racional.

## 2.3. VALORES QUIMICOS GUIA

### 2.3.1. Naturaleza de los valores químicos guía

Un valor guía representa el nivel máximo (concentración o cantidad) de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará un riesgo importante para la salud del consumidor. La calidad de agua definida en las guías para la calidad del agua potable es la adecuada para el consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal. Sin embargo, se puede necesitar agua de mejor calidad para propósitos especiales, como el de diálisis con riñón artificial, o ciertos procesos industriales.<sup>11</sup>

Cuando se sobrepasa un valor guía, esto debe considerarse como una indicación de que es preciso: investigar la causa con vistas a tomar medidas correctivas y consultar a las autoridades responsables de la salud pública para que proporcionen asesoramiento.

Si bien los valores guía describen una calidad del agua que es aceptable para el consumo durante toda la vida, no se debe entender que las guías implican que se pueda degradar la calidad de agua potable para aproximarla a los valores recomendados. En realidad, es necesario un esfuerzo continuo por mantener la mejor calidad posible del agua potable.<sup>12</sup>

Se han establecido los valores guía especificados con el propósito de salvaguardar la salud, teniendo en cuenta su consumo durante toda la vida.

Se pueden tolerar exposiciones breves a concentraciones mas elevadas de componentes químicos, como las que podrían producirse como resultado de una contaminación accidental, pero es preciso evaluar caso por caso tomando en consideración, por ejemplo, la toxicidad aguda de la sustancia en cuestión. Las desviaciones por un período breve durante el cual se exceden los valores guía, no significan necesariamente que el agua no sea apta para el consumo. La proporción en que se sobrepase un valor guía y el período durante el cual se prolongue esa situación sin que resulte afectada la salud pública, dependerán de la sustancia específica en cuestión. Cuando se sobrepasa un valor guía , se recomienda consultar al organismo de vigilancia pertinente para que aconseje sobre las medidas adecuadas, teniendo en cuenta la ingesta de la sustancia proveniente de otras fuentes además del agua potable (cuando se trata de componentes químicos), las probabilidades de efectos negativos, la viabilidad de medidas correctivas y factores similares.<sup>13</sup>

### 2.3.2. OBTENCIÓN DE LOS VALORES GUIA PARA SUSTANCIAS QUIMICAS TOXICAS

Al determinar los valores guía para diversas sustancias presentes en el agua, se toma en consideración en la medida posible según la información con que se cuenta, la absorción total de cada sustancia a partir del aire, los

alimentos y el agua; se parte de la hipótesis de que la ingesta diaria del agua es de 2 litros por individuo.

En el caso de la mayoría de las sustancias para las que se proponen valores guía, se prevé el efecto tóxico en el hombre mediante estudios con animales de laboratorio, la exactitud y confiabilidad de un pronóstico cuantitativo de la toxicidad en el hombre basado en experimentos con animales, depende de una serie de factores, como la elección de las especies animales, el diseño del experimento y no menos importante, los métodos de extrapolación.

Un juicio acerca de la seguridad requiere la participación de toda la sociedad. Cada país debe tomar la decisión final respecto a qué riesgo esta o no justificado por el beneficio que resultará de adoptar cualquiera de los valores guía que se proponen, no son normas estrictas que se deben acatar si no que existe una amplia gama de flexibilidad y con esos valores, se pretende esencialmente proteger la salud pública y permitir que se establezcan criterios acerca del abastecimiento de agua potable de calidad aceptable.<sup>11, 12</sup>

### 2.3.3. ASPECTOS FISICOQUÍMICOS

Los métodos refinados que actualmente se usan en la química analítica, permiten una determinación de los numerosos componentes del agua potable, en especial de los que pertenecen a la fracción orgánica, mucho más específica que la que era posible hace un decenio. Esto tiene particular importancia pues

los progresos de la tecnología moderna han llevado al empleo y eliminación de cantidades cada vez mayores de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, que representan un riesgo de contaminación del agua potable.

Más adelante se mencionan los valores guía para componentes químicos del agua potencialmente peligrosos, y para otras sustancias y características físicas que afectan el sabor y la apariencia del agua potable.<sup>14</sup>

#### 2.3.3.1. Efectos sobre la salud causados por componentes químicos

El riesgo para la salud provocado por las sustancias químicas tóxicas que pueden existir en el agua potable, es distinto del que causan los contaminantes microbiológicos. Es muy poco probable que cualquiera de estas sustancias cause un problema agudo de salud salvo en circunstancias excepcionales, como una contaminación en gran escala del sistema de abastecimiento. Los problemas relacionados con los componentes químicos surgen fundamentalmente por la posibilidad de que esas sustancias causen efectos negativos después de períodos prolongados de exposición; tienen particular importancia los venenos acumulativos y los carcinógenos.

Existen pruebas ya sea directas o indirectas de que todas las sustancias para las cuales se han recomendado valores guía, pueden provocar efectos nocivos. Debe seguir siendo un principio básico de la protección de la salud pública que la exposición a sustancias tóxicas sea tan baja como sea posible.

Los valores guía indican concentraciones tolerables y no se debe interpretar que definen metas en cuanto a la calidad del agua.

Varias de las sustancias inorgánicas para las cuales se han recomendado valores guía, son elementos fundamentales para la nutrición del hombre. No se ha intentado definir una concentración mínima conveniente de esas sustancias en el agua potable. Los valores guía indicados son concentraciones que no deben sobrepasarse durante períodos prolongados a causa de los posibles riesgos que puede producir la ingestión de cantidades excesivas de esos compuestos.<sup>11, 12</sup>

#### **2.3.3.2. Bases para establecer los valores guía**

Cuando se establecen los valores guía, el propósito es definir un tipo de agua de calidad tal que pueda ser consumida por todas las personas durante toda la vida. Esos valores expresan un juicio fundamentado, basado en la consideración de varios factores que incluyen:

- Criterios científicos que definen las relaciones entre dosis y respuesta relativos a cada sustancia.
- Datos analíticos acerca de la frecuencia de la presencia de las sustancias en el agua potable y acerca de las concentraciones en que comúnmente se encuentran.
- La posible aplicación de medidas adecuadas de control para eliminar o reducir las concentraciones de esas sustancias en el agua potable.<sup>11, 12</sup>

#### 2.3.3.3. Inseguridad en la determinación de los valores guía

Hay muchos factores que hacen difícil establecer valores guía para los componentes químicos del agua. Esos factores abarcan:

- Desacuerdo en cuanto a la relevancia, validez y aceptabilidad de los datos científicos.
- Problemas que plantea la extrapolación de datos toxicológicos de los animales al hombre, especialmente en vista de las dosis relativamente elevadas que a menudo se usan en los experimentos y las dosis muy bajas encontradas en el agua potable.
- Incertidumbre en cuando a las proporciones de la ingesta total a partir del aire, el agua, los alimentos y otras fuentes ( por ejemplo, durante la exposición ocupacional).<sup>11, 12</sup>

#### 2.3.3.4. Distribución de la ingesta

El agua potable no es la única fuente de muchos de los componentes químicos a los que está expuesto el hombre y para los cuales se han fijado valores guía. En muchos casos, la ingesta a partir del agua puede ser pequeña en comparación con la proveniente de los alimentos y el aire. Se acordó que , la evaluación de los efectos sobre la salud de componentes inorgánicos, había de considerar todas las formas de exposición (aire, alimentos y agua) al decidir acerca de un valor guía para el agua potable. <sup>11, 12</sup>

## 2.4. Componentes inorgánicos que afectan a la salud

Se han detectado 37 componentes inorgánicos que suelen existir en el agua potable, que pueden presentar efectos sobre la salud, estos elementos son <sup>15</sup>:

**Tabla 2: Componentes Inorgánicos en Agua Potable**

Aluminio	Calcio	Hierro	Nitrito	Titanio
Antimonio	Cianuro	Litio	Plata	Tungsteno
Arsénico	Cobalto	Magnesio	Plomo	Uranio
Asbesto	Cobre	Manganeso	Selenio	Vanadio
Bario	Cromo	Mercurio	Sodio	Zinc
Berilio	Estaño	Molibdeno	Talio	
Boro	Ferrocianuro	Níquel	Telurio	
Cadmio	Fluoruro	Nitrato	Tiocianato	

Sin embargo no se han establecido valores guía para los 37 componentes debido a que sólo se han comprobado al momento efectos dañinos a la salud ocasionados por la ingesta de estos en el caso de los siguientes nueve componentes, a los que ya se les ha asignado un valor guía. Los valores guía planteados en la siguiente tabla se basan en la Norma Oficial Mexicana 127, desarrollada por la Secretaría de Salud. Esta norma constituye la referencia para la calidad del agua potable que rige en nuestro país<sup>16</sup>.

Tabla 3: Valores guía de elementos con efecto dañino a la salud <sup>11, 12</sup>

Componente	Valor guía ( mg / l )
Arsénico	0.05
Cadmio	0.005
Cianuro	0.07
Cromo	0.05
Fluoruro	1.5 <i>puede variar de acuerdo al clima y consumo de agua</i>
Mercurio	0.001
Nitrato ( como N)	10.00
Plomo	0.025
Selenio	0.01

## 2.5. ELEMENTOS TOXICOS PRESENTES EN EL AGUA

### 2.5.1. Arsénico

En la naturaleza el arsénico se encuentra diseminado en diversos minerales (Nicolato (NiAs), Arsenopirita (FeAsS), óxidos y compuestos azufrados, entre otros). Además es subproducto de fundición y calcinación de minerales de cobre plomo, etc. En la industria también se utiliza en diversos procesos.

Por uso se divide en las siguientes proporciones:

70 % como conservador de madera

22% en agricultura (herbicidas, plaguicidas, etc.)

4% para fabricar vidrio

2% en aleaciones no férricas

2% en otros usos

La mayoría de los productos de As orgánico e inorgánico son polvos blancos o incoloros que no se evaporan. Son inodoros e insípidos, por lo que no es posible saber, de manera organoléptica, si se encuentra presente en el aire, agua o alimento.

El arsénico puede penetrar en el ambiente de diversas formas. Aun cuando no se evapora, el As puede estar presente en el aire como polvo. Esto puede suceder al quemar minerales que lo contengan o cualquier material (ej. madera), o bien cuando el viento levanta suelos que contengan arsénico. Una vez en el aire las partículas de As son transportadas con el viento durante algún tiempo, pero posteriormente vuelven a depositarse en el suelo.

La mayoría de los compuestos de As pueden ser disueltos en agua por lo que el As puede penetrar en lagos, ríos y agua subterránea, por disolución en la lluvia o nieve, o bien a través de las descargas de residuos industriales. Parte del As permanecerá en el sedimento en el fondo de lagos o ríos, pero parte será transportada por el agua

El arsénico no es destruido ni degradado ambientalmente, sin embargo puede cambiar de una forma a otra mediante reacciones químicas naturales, e incluso por la acción bacteriana en el suelo o agua.

Al ser el As una parte natural del ambiente, se encuentra presente en niveles bajos en el suelo, agua, alimentos y aire, siendo el suelo donde se presentan los contenidos más altos 5,000 ppb (0.005 ppm). En los alimentos el rango oscila entre 20 y 140 ppb y en el agua aproximadamente 2 ppb. En el aire los niveles son de entre 0.02 a 0.1 microgramos por metro cúbico. Combinando todos estos factores un ser humano puede estar consumiendo alrededor de 50 microgramos por día.

Además de los niveles normales de As en el aire, agua, suelo y alimentos, las personas pueden estar expuestas a niveles mucho mayores en diversas formas, entre ellas el agua. Muchas zonas contienen niveles de As inusualmente altos en las formaciones geológicas, mismo que se transmite por disolución o erosión hacia el suelo y el agua, encontrándose en concentraciones extremadamente altas en los mismos.

Cuando el As se ingiere por medio del agua o el alimento penetra rápidamente al cuerpo. Si es por el aire la mayor parte de las partículas de As se introducen en principio en los pulmones, y posteriormente de los pulmones pasan a todo el cuerpo. Sin embargo si entra en contacto el arsénico por vía cutánea solo una pequeña cantidad penetra al cuerpo, por lo que no es una vía de acceso preocupante.

En agricultura los compuestos de arsénico han sido utilizados para controlar malezas, roedores y hongos, sin embargo en los últimos años su uso ha sido prohibido con lo que, si no ha desaparecido, si ha disminuido considerablemente.

Los compuestos inorgánicos de arsénico pueden ser convertidos biológicamente a compuestos orgánicos, algunos de los cuales son muy tóxicos. Se sabe que el arsénico puede ser penetrante o crónicamente tóxico para el hombre. Una vez que ha sido ingerido, el arsénico es excretado lentamente por los riñones pero la bioacumulación del mismo puede llevar a síntomas típicos de envenenamiento severo. Sin embargo su toxicidad depende en parte del estado de oxidación en que se encuentre ya que la forma trivalente ( $As^{3+}$ ) es retenida preferentemente sobre la forma pentavalente ( $As^{5+}$ ) en los tejidos, lo que lo hace más tóxico.

Algunos de los ejemplos más conocidos sobre los efectos a la salud del arsenicismo endémico son la evidencia de la enfermedad de Bowen (carcinoma dérmico) y la enfermedad del Pie Negro (EPN), (Blackfoot Disease BFD) en Taiwan.<sup>17</sup> Mucho se ha escrito sobre la relación entre ambas enfermedades y el consumo prolongado de agua con altos contenidos de arsénico (As). Las correlaciones realizadas al respecto se han basado en el análisis del contenido de As en la orina de pacientes que presentan la enfermedad de Bowen y pacientes con la EPN, utilizando como control, personas sin ninguna de las enfermedades. En 1985 Lin et.al., del Instituto de Medicina de Kaohisiung, Taiwan, no encontró una relación directa entre la presencia de As en la orina y la EPN, sin embargo la relación entre el contenido de As en la orina y la enfermedad de Bowen fue evidente. Más adelante en 1992 otros investigadores que realizaron sus estudios en la misma zona, encontraron la relación entre el As en orina y la incidencia del EPN.

El As a pesar de ser un elemento esencial en algunos animales presenta importante toxicidad. Las lesiones del tipo dermatoso a que induce pueden incluir erupción, pigmentación o hiperqueratosis leucodérmica, mismas que pueden evolucionar en cáncer de piel y enfermedad de Bowen. Aunque mucho se ha dicho sobre la relación directa entre el hidroarsenicismo endémico y la enfermedad de la EPN, parece ser que esta enfermedad está más asociada a la presencia de compuestos fluorescentes en el agua potable de las regiones con As.

Estos compuestos fluorescentes (del tipo FCs), están fuertemente ligados con el As en los pozos de agua potable que se encuentran en la zona de Taiwan con problemas endémicos de arsenicismo.

La enfermedad de Bowen fue descrita por vez primera en 1912 como una dermatosis precancerosa; por su parte la queratosis arseniosa también ha sido descrita como una lesión precancerosa, por lo que según lo reportado en la literatura ambas enfermedades son prácticamente indistinguibles a nivel general.

También se reporta en la literatura que en pacientes que presentan la enfermedad de la EPN al disminuir la dosis de As suministrada en el agua que utilizan para beber, es decir, se les proporciona agua libre de As, la concentración del mismo en la orina disminuye de forma importante, con lo que tal vez la relación buscada entre esta enfermedad y la alta concentración de As en la orina no sea fácilmente detectable. Sin embargo, el hecho de desaparecer la dosis no significa que las enfermedades ya causadas por el As

desaparezcan, aunque si desaparece la posibilidad de empeoramiento progresivo a cierto nivel y en ciertos casos.

Se ha reportado que los siguientes compuestos de arsénico producen cáncer en animales:

Pentóxido de arsénico ( $As_2O_5$ )

Trióxido de arsénico ( $As_2O_3$ )

Arseniato de Calcio

Arsenito de Calcio

Arseniato ácido disódico

Arseniato de Plomo

Arseniato de Potasio

Arsenito de Potasio

Arseniato de Sodio

Arsenito de Sodio

Existe suficiente evidencia de la carcinogenicidad de los compuestos inorgánicos de As en el ser humano. Muchos casos de cáncer de piel han sido reportados sobre gente que ha estado expuesta al arsénico a través de tratamientos médicos con compuestos inorgánicos de As trivalente. En algunos casos el cáncer de piel ha venido acompañado con otros tipos de cáncer como angiosarcoma de hígado, cáncer intestinal, urinario y meningioma. Sin embargo los estudios epidemiológicos sólo han logrado encontrar relación entre el cáncer de piel y el tratamiento médico con As. No se ha obtenido la relación

entre cáncer de próstata y el tratamiento de la sífilis con productos arsenicales.

Por otro lado se ha demostrado la relación entre el cáncer de piel y el consumo de As en agua potable. Estudios epidemiológicos realizados en lugares donde la concentración de As en el agua potable oscila entre 0.35 y 1.14 mg/l de As han demostrado la incidencia de cáncer de piel, riñón, hígado, vesícula, pulmones y colon, tanto en hombres como en mujeres.

En México el problema de la presencia de arsénico en el agua que se abastece a ciertas comunidades se ha hecho evidente en años recientes. Anteriormente no se acostumbraba realizar análisis de este tipo de elementos en el agua de consumo, simplemente por ignorar que pudiesen encontrarse presentes. Sin embargo, ahora nos encontramos con problemas de salud que son los que han dado la alerta para comenzar a buscar las fuentes de donde provienen dichos elementos.<sup>18 , 19 , 20</sup>

En el caso específico de la región de Zimapán se ha presentado de forma patente y grave el caso de una adolescente (17 años de edad) proveniente de la zona denominada Las Limas, dentro del municipio de Zimapán, que presenta un cuadro clínico severo con problemas graves, principalmente de tipo vascular, renal, neurológico y dérmico, además de hipertensión arterial sistémica como manifestación principal y a quien ha sido necesario realizarle amputación supracondílea en la pierna izquierda como resultado de una trombosis arterial, según datos proporcionados en el Hospital de Cardiología donde ha sido atendida.

En fechas recientes se ha reportado, por parte de médicos de la Secretaría de Salud, que al realizar una visita a Zimapán, han encontrado niños que con tan solo 4 años de edad ya presentan síntomas claros de arsenicismo. Esto contrasta con lo que hasta la fecha se había observado en la literatura mundial, puesto que el tiempo de exposición de que se ha hablado es de no menos de 12 años, sin embargo el caso de Zimapán advierte que esto no es del todo cierto, que por lo visto la gravedad y tiempo en que se manifiestan los efectos del arsenicismo están en función de las dosis de consumo, y tal vez tenga también alguna injerencia el grado de desnutrición, y las concentraciones que pudiese llegar a tener la madre durante el periodo de gestación; pareciera que los factores genéticos también juegan un papel importante en la sintomatología del arsenicismo.

En el caso de Chihuahua aunque hasta el momento se desconoce la amplitud del problema de salud que se presente en la zona, si se conoce la diseminación de los puntos en los que la concentración de arsénico en el agua que se está suministrando a la población, excede, en ocasiones hasta 15 veces, el valor de la norma para agua potable (0.05 ppm).

Con base en la experiencia que se tiene en la región de Zimapán y de forma gruesa puede hablarse de una población de aproximadamente 170,000 habitantes que potencialmente podrían estar siendo suministrados con agua de mala calidad.

El problema en Chihuahua se complica debido a la presencia también de concentraciones altas de fluoruro, otro elemento que en dosis bajas resulta

benéfico para el ser humano, pero que excediendo las 3 ppm presenta graves daños a la salud. El hierro, también aparece en concentraciones altas en algunas áreas.

### 2.5.2. Flúor (F)

La procedencia del flúor puede estar asociada a la disolución de rocas ígneas silícicas, alcalinas y sedimentarias, aunque también a emanaciones volcánicas. Incluso las precipitaciones atmosféricas pueden llegar a contener hasta 1 ppm de fluoruros.

Como es bien sabido, pequeñas cantidades de fluoruros han probado ser beneficiosas para reducir la incidencia de caries dental, incluso en algunas especies mejora los índices de fertilidad, sin embargo en los seres humanos dosis excesivas pueden dar como resultado, en el mejor de los casos, el manchado del esmalte de los dientes. La concentración permisible de flúor en el agua potable es de 1.5 ppm, aunque esta concentración debería estar relacionada con la temperatura ambiental, a menor temperatura la concentración máxima aceptable puede aumentar, sin embargo en zonas con temperaturas elevadas debe disminuir.

El consumo prolongado de agua que contiene 1 ppm de flúor puede dar lugar a manchas, en niños de entre 0 a 7 años, periodo en el cual los dientes están en proceso de mineralización. Cuando el agua contiene más de 3 ppm se

han observado casos de fluorosis esquelética en algunas personas, dependiendo también de la ingestión proveniente de otras fuentes.

A niveles de exceso de flúor de 10 ppm en el agua, durante el consumo por periodos prolongados se han reportado casos de fluorosis esquelética invalidante.

En dosis elevadas el flúor es altamente tóxico, provocando en el ser humano cambios patológicos que comprenden gastroenteritis hemorrágica, nefritis aguda tóxica, y grados diversos de lesión al hígado y al músculo cardiaco. La dosis letal aguda es de menos de 2 gramos de fluoruro. Se han presentado otros problemas menos comunes que incluyen efectos sobre la tiroides, vómitos, dolor abdominal, náuseas, diarrea e incluso convulsiones.

Sin embargo estudios epidemiológicos realizados en áreas donde la concentración de fluoruro en el agua es naturalmente alta, han dado como resultado que tan solo en casos contados se han reportado efectos adversos, entre los que comúnmente están el moteado de los dientes y la fluorosis esquelética.<sup>21</sup>

### 2.5.3. Hierro (Fe)

La procedencia natural del hierro se debe a la acción del intemperismo sobre rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas (como pirita,  $FeS_2$ ). La solubilidad del mismo se incrementa con la disminución del pH. Bajo

condiciones reducidas en el agua el ion ferroso ( $Fe^{+2}$ ) es el que está presente, pero en cuanto se expone al aire se oxida y precipita como ion férrico ( $Fe^{+3}$ ). Este hierro precipitado en el agua produce manchas café rojizo en la ropa, esmaltes, porcelanas, lo que lo hace indeseable en la misma. Además produce incrustaciones en tuberías que pueden significar un serio problema en los sistemas de distribución de agua.

En el agua subterránea las concentraciones de hierro son substancialmente mayores que en las superficiales, pudiendo alcanzar hasta las 100 ppm. La norma para agua potable lo ubica en 0.3 ppm, aunque lo recomendable para evitar tener un sabor agridulce y efectos astringentes son concentraciones de menos de 0.05 ppm. Los efectos adversos en la salud que se le pueden atribuir al hierro, no son peligrosos, pero registra toxicidad en concentraciones del orden de 20 ppm.

## 2.6. GENERALIDADES DE HIDROGEOQUÍMICA

En las formaciones geológicas la composición química del agua subterránea depende de la composición de la lluvia, del clima, del tipo de roca, de la agresividad del agua, del periodo de contacto agua-roca, de la división de la roca, de la temperatura, la presión, etc.<sup>7</sup>

El agua de lluvia es el origen esencial del agua subterránea, y aunque por sí misma no tenga grandes cantidades de sales disueltas, a excepción de zonas con influencia marina, resulta ser un vehículo muy importante en el aporte de

sales solubles. Estas sales pasan al terreno con el agua de infiltración, ocupando parcial o totalmente los poros del suelo, teniendo así la oportunidad de disolver  $CO_2$  y ácidos húmicos, procedentes de la descomposición de la materia orgánica.<sup>22</sup>

La capacidad de disolución de los gases en el suelo es importante ya que en rocas carbonatadas la composición química del agua subterránea es controlada por la presión parcial de  $CO_2$ , el pH, la temperatura, el grado de saturación y el tipo de sistema, abierto o cerrado, en el cual se lleva a cabo la disolución de carbonatos, predominando los iones en solución,  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ , y  $SO_4^{=}$ , dependiendo de la existencia o no de evaporitas.

En medios fisurados y sin cobertura vegetal, el agua de lluvia penetra fácilmente hasta grandes profundidades, evitando en parte la evaporación y por lo tanto la concentración de sales. Una vez el agua ha penetrado al suelo con cierta composición química, entra a formar parte de los acuíferos, circulando por el terreno y adquiriendo otras características químicas.

Dependiendo de esto, la composición de las diferentes aguas variará, ya que las más profundas serán generalmente más salinas que aquellas que se hallen cercanas a la superficie, puesto que han permanecido más tiempo en contacto con las rocas, teniendo mayor oportunidad para disolver más sales.

En el caso de flujos de circulación local las aguas tendrán por lo general poco contacto con la roca y mantendrán la composición adquirida durante la infiltración, siempre y cuando no se produzcan fuertes fenómenos de

evaporación que conduzcan a una mayor concentración, (como en el caso de zonas de regadío que se comentan más adelante), que no se mezclen con aguas más profundas con distinta composición o se encuentren en terrenos fácilmente solubles. El proceso de disolución como ya se ha mencionado es función del pH, de la temperatura del agua y del déficit de saturación. La disolución es más rápida cuando se trata de aguas ácidas y más lenta en aguas alcalinas, siendo el  $\text{CO}_2$  disuelto un agente muy importante para mantener el pH (efecto tampón).

Hay que tomar en cuenta también la zona en la que se está produciendo la infiltración, ya que en las zonas de regadío se presentarán diferencias con respecto a la recarga que habría por agua de lluvia solamente. El agua que se utiliza para regar no necesariamente se toma del acuífero subyacente, sino que puede tener diversos orígenes y por lo general es más salina que el agua de lluvia local; así el agua que se infiltre derivada de estas actividades será el resultado de la concentración del agua de riego más las sales que se hayan añadido tanto en los procesos mismos del suelo, como en forma de abonos.

Si por otro lado el riego se realiza con el agua del acuífero, entonces se entrará en un ciclo del tipo extracción- evaporación- concentración- infiltración- extracción con lo que cada vez el agua subterránea se irá concentrando más y más en sales; solamente puede verse diluido este efecto por los aportes del agua de lluvia, que si no son suficientes para atenuarlo permitirán la formación de zonas donde el agua presentará alta salinidad, elevada dureza y elevado contenido en iones tales como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{=}$ .<sup>1, 23, 24, 25, 7, 26, 27, 28</sup>

## 2.7. EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DEL AGUA

Lo primero que ha de hacerse, es la recopilación de la información relacionada con la calidad del agua existente en la zona que va a ser estudiada ; procediendo a la evaluación de ésta para determinar si es completa y confiable, y en caso de ser necesario, llevar a cabo análisis posteriores.

En el caso de las aguas superficiales, los análisis tienen una validez corta, pues sufren cambios constantes en composición por estar expuestas a cambios climatológicos y a muchos otros factores. No es así en el caso de las aguas subterráneas, donde las condiciones no se ven afectadas por tantos factores, por lo que un análisis relativamente viejo puede representar aun las condiciones actuales del agua.

Es recomendable revisar minuciosamente los análisis, y determinar si la información es confiable. Una primera forma de determinar si el análisis es confiable, es verificar el balance de aniones y cationes mayoritarios ; para hacer esto, es necesario comparar la suma de todos los aniones, expresados en miliequivalentes por litro, con la suma total de cationes, expresada en las mismas unidades, deben ser iguales o valores similares. Para determinar si el análisis está dentro de los límites de tolerancia se puede utilizar el siguiente criterio :

$$\% \text{ Error} = 200 \cdot (\Sigma \text{ cationes} - \Sigma \text{ aniones}) / (\Sigma \text{ cationes} + \Sigma \text{ aniones})$$

Se debe tener en cuenta que para que se cumplan estas condiciones, se ha asumido que el agua no contiene cantidades apreciables de los iones que no

fueron determinados en el análisis, y que en consecuencia no participan en la hidrólisis ; otra suposición es que todos los aniones se pudieron determinar por una titulación que tiene como fin un pH de 4.5. Lo cual es cierto en la mayoría de los casos para las aguas alcalinas, no así para las ácidas, pues en el caso de éstas, es común que las determinaciones reporten iones que en la muestra original no se encontraban disociados, o partículas que se encontraban en estado coloidal.<sup>1, 7, 23, 24, 25, 26, 27, 28</sup>

### 2.7.1. Técnicas de estudio

Se puede determinar semejanzas o diferencias entre distintos análisis por varios métodos: inspección, tratamiento matemático simple y elaboración de gráficos, mapas y diagramas de diversos tipos.

#### 2.7.1.1. Inspección y comparación

Una simple inspección generalmente hace posible la diferenciación en varios grupos, por ejemplo, es fácil agrupar en grupos según el rango de sólidos disueltos. Sin embargo está es una clasificación muy burda, pues no contempla ningún otro parámetro.

Es frecuente encontrar en la literatura clasificaciones como "aguas carbonatadas cálcicas" o "aguas clorurado sódicas", clasificaciones basadas en el anión y catión predominantes; este tipo de clasificaciones no son precisas,

pero si resultan útiles para señalar semejanzas burdas. Un método más efectivo, es el uso de relaciones, que se describe a continuación.

#### 2.7.1.2. Uso de relaciones

El expresar la concentración de un ion con respecto al otro, o con respecto al total permite identificar claramente las semejanzas y diferencias entre varias aguas. Para decidir que iones se deben relacionar, basta observar los análisis que se tienen y seleccionar los principales y los de especial interés por ejemplo, la relación calcio / magnesio ( $rCa/ rMg$ ) resulta útil para comparar aguas que contienen minerales ferromagnésicos con aguas relacionadas con otro tipo de rocas, para diferenciar aguas de rocas dolomíticas de aguas de calizas, e incluso para rastrear el efecto de la intrusión salina. La relación de sodio con respecto al total de cationes ( $Na\%$ ) resulta de gran utilidad para identificar la acción del intercambio iónico. La relación cloruro / sólidos disueltos indica la influencia de la solución de cloruro de sodio en el acuífero, y en algunos casos, de la contaminación de éste.

- **Relación  $rMg/rCa$ :**

En las aguas continentales este valor oscila entre 0.3 y 1.5; los valores próximos a 1 indican la posible influencia de terrenos dolomíticos o con serpentina, y valores superiores están relacionados generalmente con terrenos ricos en silicatos magnésicos como grabas y basaltos. Hay que tener en mente que fenómenos como la precipitación de carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) pueden aumentar la relación, sin que esto indique nada sobre el terreno por el que el

agua circula. La disolución de caliza aumenta esta relación, El agua de mar tiene una relación  $rMg/rCa$  de 5 aproximadamente, las aguas que circulan por terrenos de formación marina, o que se han mezclado con agua de mar tienden a incrementar su relación. La elevación del contenido de cloruros, acompañada de un incremento en la relación  $rMg/rCa$ , puede ser un buen indicio de contaminación marina, también llamada intrusión marina.

- **Relación  $rK / rNa$**

En las aguas dulces varia entre 0.004 y 0.3 mientras que para el agua marina oscila entre 0.02 y 0.025 . Debido a la fijación preferente del potasio ( $K^+$ ) por el terreno, esta relación es menor en el agua que en la roca origen, y tanto menor cuanto más concentrada en sales esté el agua. En general, ésta es una relación de utilidad limitada, pues se ve fácilmente afectada por el terreno.

- **Relaciones  $rNa / rCa$  y  $rNa / r(Ca + Mg)$  .**

Se usan para determinar posible intercambios de bases, se pueden usar en conjunto con el icb ( índice de intercambio iónico).

- **Relación  $rCl / rHCO_3$  .**

En las aguas subterráneas, el contenido de bicarbonato se mantiene prácticamente constante, por lo que el uso de esta relación nos permite determinar el incremento en salinidad del agua en el sentido de flujo del

acuífero. Aunque la concentración de sales hace crecer al denominador, un aumento en la relación indica un avance en el proceso de concentración, siempre y cuando existan fenómenos de reducción de sulfatos, o aportes exteriores de  $CO_2$ , que pueden aumentar el contenido de  $HCO_3^-$ . La relación también se ve incrementada cuando hay precipitación de  $CaCO_3$ , sin que esto signifique un aumento en la salinidad del agua.

La relación  $rCl/rHCO_3$  resulta muy útil para la identificación y caracterización de la intrusión marina, un incremento en el índice es un buen indicio de que existe contaminación por agua de mar, ya que el índice en aguas continentales oscila normalmente entre 0.1 y 5, mientras que en las aguas marinas varía entre 20 y 50. En las zonas de riego, el índice también se eleva, pues en éstas suelen concentrarse sales solubles; pero puede distinguirse de la intrusión marina por que el incremento en el índice es mucho menor para un incremento igual de cloruros en la intrusión marina.

- **Relación  $rSO_4 / rCl$ .**

En las aguas algo salinas, el contenido del ion  $SO_4^{2-}$  tiende a hacerse constante, y puede usarse de manera similar a la relación  $rCl/rHCO_3$  cuando no existe reducción de sulfatos, En el caso de que se presente reducción de sulfatos, esta relación se puede utilizar para la caracterización de ésta.

En las aguas de baja salinidad, la relación  $rSO_4/rCl$  suele ser similar a la de la roca acuífera, y su valor se mantiene constante al irse concentrando el

agua. Esto no se cumple cuando se ha saturado el  $\text{SO}_4^{2-}$ , pero esto sólo ocurre a muy elevadas concentraciones.

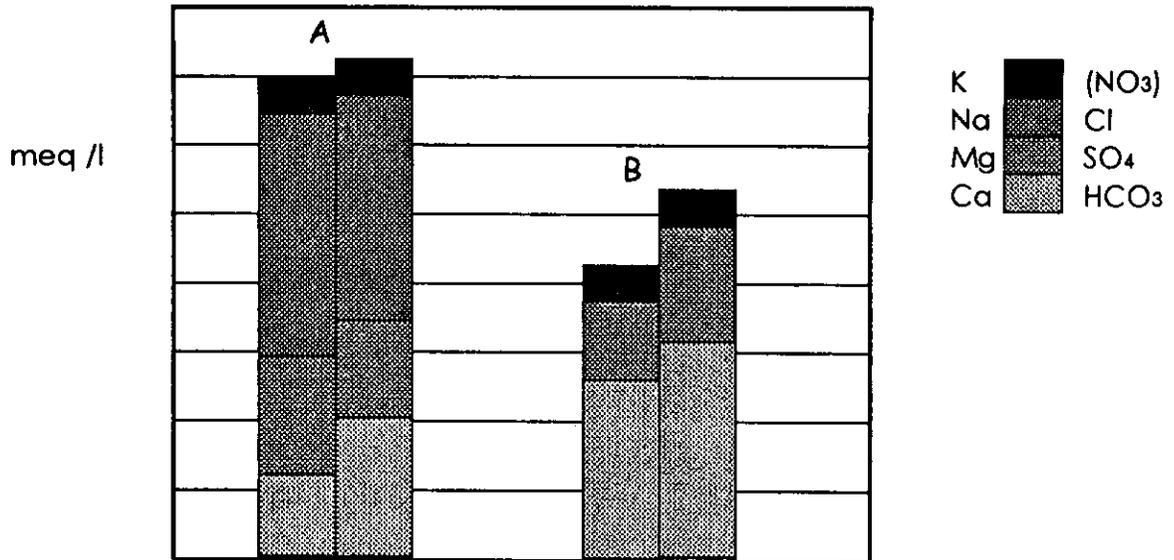
### 2.7.2. Métodos gráficos

Para simplificar el estudio y manejo de análisis químicos de aguas de un mismo lugar en diferentes épocas, o para comparar y correlacionar análisis de distintos lugares se pueden usar gráficas y diagramas. Éstos manifiestan claramente variaciones temporales, variaciones espaciales, y permiten además comparar las relaciones existentes entre los iones de una misma agua con otras, permitiendo identificar grupos o familias de aguas de composición química semejante.

#### 2.7.2.1. Diagrama de columnas, diagramas de Collins

En dos columnas paralelas se disponen a partir de una base común los iones. En una columna se representan los cationes, en el orden Ca, Mg, Na, K. En otra columna se ponen los aniones en el orden  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3, \text{SO}_4, \text{Cl}, (\text{NO}_3)$ . Se pueden representar en ppm, meq/l y %meq. Se llama diagrama de Collins cuando se usan meq/l, en estas condiciones, las columnas deben de tener aproximadamente la misma altura, la diferencia es causada por errores en el análisis, o la presencia en concentraciones altas de iones poco comunes .

Figura 1: Representación de un diagrama de Collins



A: Agua clorurada sódica

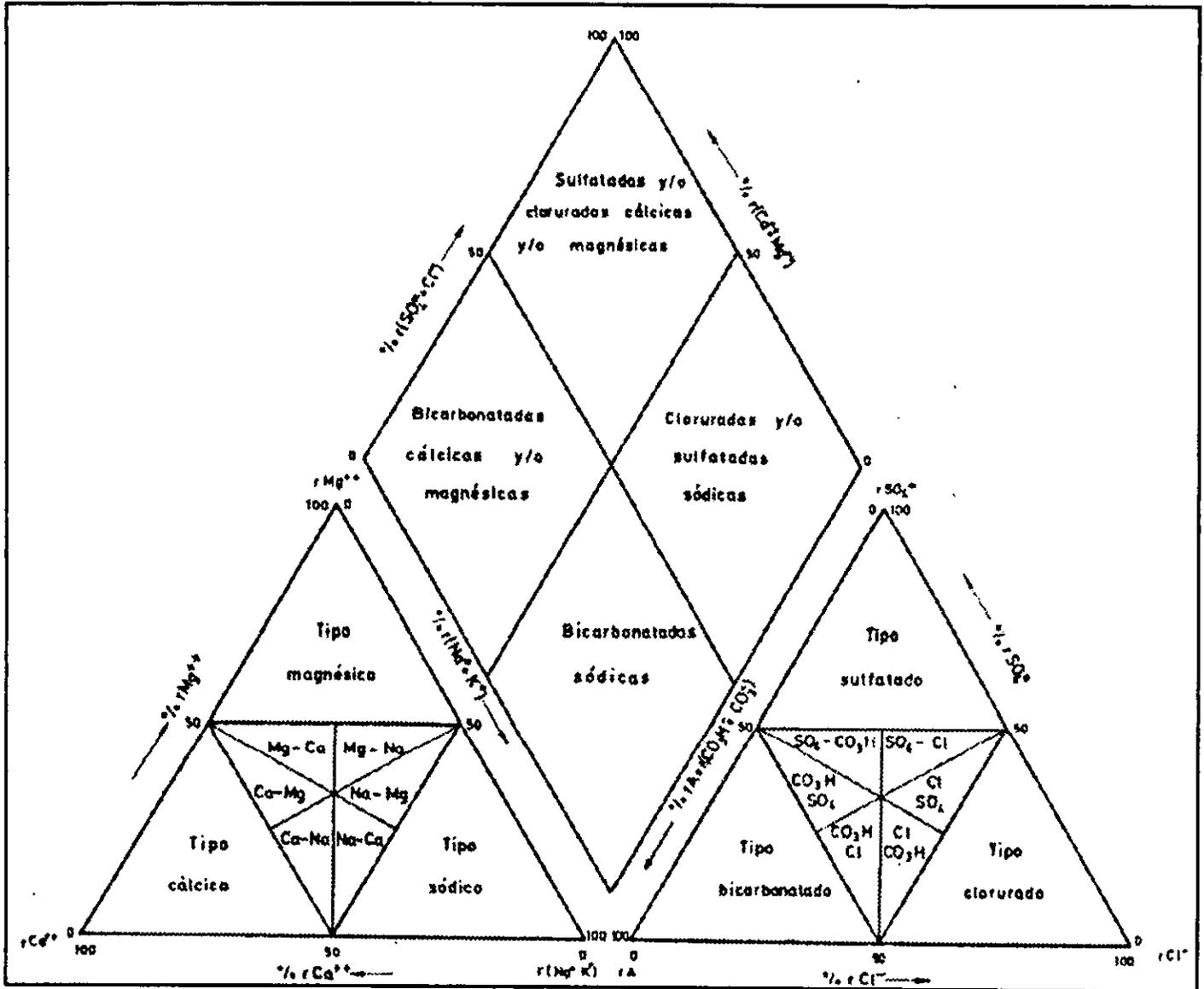
B: Agua bicarbonatada cálcica

### 2.7.2.2. Diagramas Triangulares y de Piper

Los diagramas triangulares permiten representar tres componentes. Cada uno de los vértices de un triángulo equilátero representa uno de los componentes. Lo más usual es representar como aniones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (+CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> (+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y como cationes Na<sup>+</sup> (+ K<sup>+</sup>), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>. En casos especiales se pueden tomar otros iones. Preferentemente se usan dos triángulos equiláteros, uno para los aniones y otro para los cationes, con un campo central de forma romboidal (Piper) o cuadrada de (Durov) donde se representa un tercer punto deducido a partir de los triángulos en los que se representaron aniones y

cationes. El más usual es de Piper, o el de Durov en los países de influencia soviética. A continuación se muestra el de Piper.

Figura 2: Representación de un diagrama de Piper



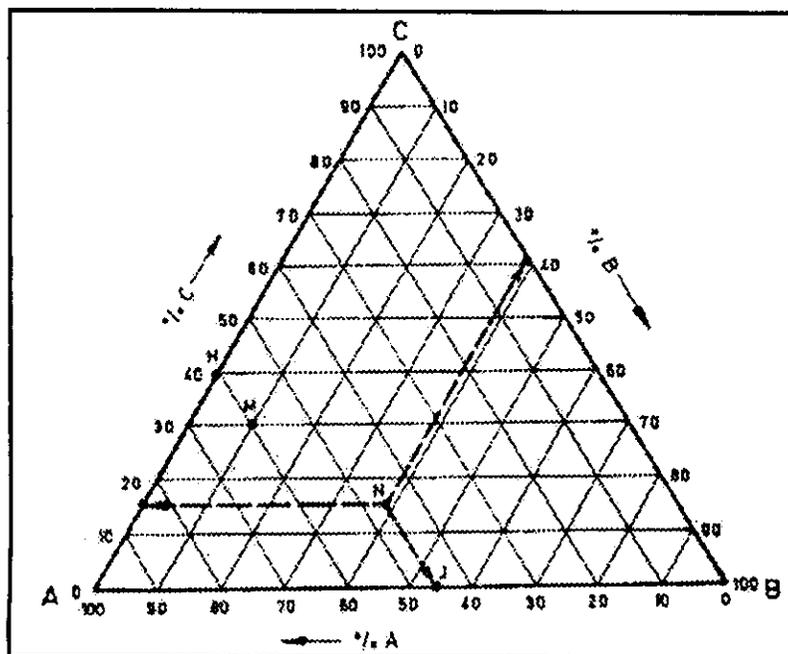
En estos diagramas no se tiene una representación de las concentraciones absolutas dado que se utilizan valores reducidos a porcentaje. En caso de ser necesario, se puede asociar a cada uno de los puntos

representativos una cifra que indique el valor de la conductividad, sólidos totales, etc., o bien un círculo de radio proporcional a esas magnitudes.

Una de las principales ventajas de estos diagramas, es que se pueden representar muchos análisis sin dar origen a confusiones, las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas: sin embargo no es posible representar más que tres características por triángulo, y en algunos casos puede resultar insuficiente, en esos casos puede recurrirse a la introducción de una cifra junto a cada punto representado y / o a un listado de propiedades para cada punto.

Las mezclas de aguas, precipitaciones, diluciones, modificaciones, etc., son claramente identificables haciendo uso de estos diagramas. Sea el siguiente diagrama de Piper.

Figura 3 : Identificación de relaciones en un diagrama de Piper



El análisis C, que se encuentra sobre el segmento AB, podría ser el resultado de la mezcla de A y B, no se puede asegurar, pues no se tienen valores absolutos, en caso de que esto fuera cierto, la concentración de C se encontraría entre las concentraciones de A y B. Si a es la concentración del análisis A y b la de B, x la proporción volumétrica de A y (1-x) la de B, debe cumplirse el siguiente balance:

$$C = A \cdot x + B \cdot (1-x)$$

Y en el diagrama:

$$\left(\frac{x}{1-x}\right) = \left(\frac{BC \cdot b}{AC \cdot a}\right)$$

Donde BC y AC indican las longitudes de los segmentos indicados medidos en el diagrama. Si se obtienen valores de x mayores que 1 o menores que 0, quiere decir que el agua C no es producto de la mezcla de A y B.

Si se produce la disolución o precipitación de una sal, los diferentes puntos se encontrarán sobre rectas que pasan por el vértice que corresponde al 100% del anión y catión afectados. En el diagrama anterior, el paso de A a F representa la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y el paso de A a G representa la disolución del mismo.

Si se produce un cambio de bases, no debe producirse ningún cambio en el diagrama de aniones (siempre que no existan reacciones secundarias), y los puntos respectivos en el diagrama de cationes deben moverse sobre una paralela al lado que une los vértices representativos de los dos cationes en juego, por ejemplo, en el diagrama, el paso de A a D.

Si se produce una reducción de sulfatos, en ausencia de reacciones secundarias, el diagrama de cationes permanece sin cambios, mientras que en el de aniones, los puntos se moverán a lo largo de una paralela al lado que une los vértices representativos del 100% de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  ya que cada meq de  $\text{SO}_4^{2-}$  se cambia por aproximadamente un meq de  $\text{HCO}_3^-$ .

Las rectas que concurren en un vértice representan aguas de igual relación entre los iones que representan los otros dos vértices.

### 2.7.2.3. Diagramas poligonales y radiantes. Diagramas de Stiff modificado

Consisten en tomar sobre semirrectas convergentes o paralelas segmentos proporcionales a cada ion y unir los extremos dando así un polígono. Sobre cada semirrecta se toma un solo ion o bien un catión y un anión simultáneamente. La forma de la figura resultante da idea del tipo de agua. Se prestan bien a comparaciones y a ser utilizados en mapas geohidroquímicos (Custodio 1966,1967b).

- Diagramas radiantes: sobre 4, 6 o 12 semirrectas concurrentes uniformemente espaciadas se colocan valores proporcionales a los meq / l o a los % de los meq / l de cada ion y se unen los extremos formando un polígono estelar. Son poco usados.
- Diagramas poligonales paralelos: El más conocido es el diagrama de Stiff (1951). En este diagrama se tienen cuatro rectas paralelas igualmente espaciadas cortadas por una normal dando así cuatro semirrectas

izquierdas (campo de cationes) y cuatro semirrectas derechas (campo de aniones). Sobre cada recta se toma un segmento proporcional a los meq/l del ion correspondiente y se unen los extremos dando un polígono representativo. De arriba abajo se disponen Na + K, Ca, Mg, Fe; Cl, CO<sub>3</sub>H, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>; esta es la disposición de Stiff, para aguas de yacimientos de petróleo. Para aguas subterráneas es mejor utilizar la siguiente disposición utilizando tres o cuatro rectas base (Custodio, 1965)

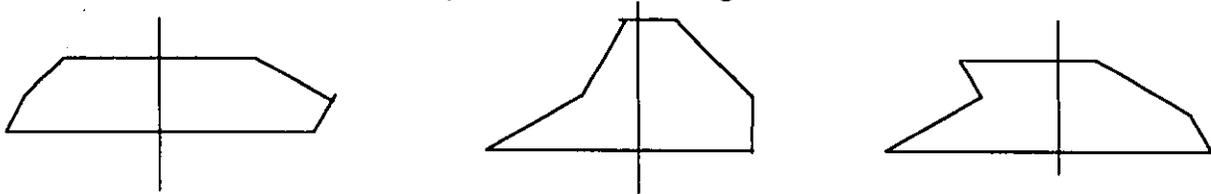
Na + K, Mg, Ca ; Cl + NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>H + CO<sub>3</sub>

o bien:

K, Na, Mg, Ca ; NO<sub>3</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>H + CO<sub>3</sub>

Disposición que es similar a la empleada en los diagramas columnares de Collins. Estos diagramas se presentan a continuación:

Figura 4: Representación de diagramas de Stiff



Escala: 2 mm = 1 meq/l

Clave:

Na	Cl
Mg	SO <sub>4</sub>
Ca	HCO <sub>3</sub>

Esta última disposición indicada parece más apta para las aguas subterráneas normales y además permite apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes o entre aniones ; además se adapta muy bien a ser utilizado en mapas geohidroquímicos y las comparaciones se pueden hacer con rapidez.

Para aguas muy concentradas o muy diluidas el diagrama es muy alargado y entonces es conveniente reducir o ampliar la escala, indicándolo con un rayado especial del diagrama, El empleo de valores en % de meq/l evita diferencias de tamaño entre figuras, pero no permite apreciar concentraciones absolutas. La adopción de escalas logarítmicas permite representar aguas muy diferentes en contenido salino manteniendo tamaños aceptables pero su uso no es habitual y además se pierde parte de la semejanza.

### 2.7.3. Mapas Geohidroquímicos

Estos mapas consisten en colocar sobre un plano de la región que se estudia cifras, símbolos o figuras representativas que representen la composición química del agua de cada pozo o fuente del que se tengan datos.

Las cifras que suelen usarse son las concentraciones de algunos iones, el residuo seco, la conductividad, alguna relación, o alguna designación de la clasificación geoquímica del agua.

A veces se puede asociar a cada punto del mapa un diagrama, siendo los más comunes los de Collins, los de Stiff, o los circulares. Los más útiles en este tipo de mapas resultan ser los de Stiff.

A partir de estos mapas, algunas veces es posible deducir directamente la existencia de uno o varios acuíferos, ciertas condiciones geológicas, las zonas de recarga de los acuíferos, etc.<sup>1, 7, 23, 24, 25, 26, 27, 28</sup>

### **3. ZONA DE ESTUDIO**

Se seleccionó el Estado de Chihuahua como la zona de estudio, debido a la problemática histórica presentada de casos de arsenicismo

#### **3.1. Antecedentes**

En 1709 Antonio Deza y Ulloa fundó la ciudad de Chihuahua con el nombre de San Felipe del Real de Chihuahua, en las márgenes del río Chuvíscar, que aseguraba el suministro a la población de esa época. Para 1750 la villa tenía ya 4,755 habitantes y en virtud de las necesidades del vital líquido se inició la construcción del acueducto colonial y de una presa. Hoy en día el suministro de la ciudad, así como de muchas otras comunidades del estado, depende en gran medida del agua subterránea.

#### **3.2. Características físicas**

La superficie del estado de Chihuahua es de 244,938 km<sup>2</sup>, que lo colocan como el estado más extenso de la República Mexicana, representando el 12 % del territorio nacional.

Se localiza entre los paralelos 25° 36' y 31° 47' de latitud norte y entre los meridianos 103° 11' y 109° 07' de longitud oeste.

Durante millones de años esas tierras estuvieron cubiertas por mares que se retiraron debido al levantamiento de la corteza terrestre, formando la Sierra Madre Occidental. Nuevos plegamientos fracturaron la corteza, provocando fallas y salidas de magma, cuyos depósitos conformaron las mesetas de la sierra Tarahumara. Este fenómeno impidió la salida de corrientes de agua hacia el mar, y así los ríos atrapados formaron cuencas cerradas que al desecarse dieron lugar a llanuras lacustres.

El territorio está dividido en dos regiones: la meseta y la sierra, en las cuales están emplazados los 67 Municipios que integran el estado.

### 3.3. Climatología

La precipitación promedio anual de lluvias es de 421 mm, que resulta baja al compararse con el promedio para la República Mexicana que es de 717 mm, y tan sólo adquiere valores altos en la sierra. Se presenta de junio a octubre generalmente y solo en la zona montañosa hay precipitaciones en invierno en forma de nieve.

Las temperaturas máximas en el área de estudio son de 33 a 40°C en las partes bajas y en las altas del orden de 22°C. En invierno se registran las mínimas con valores de hasta -24°C en la sierra y -12°C en los valles hacia el oriente del área, con estas variaciones tan fuertes la temperatura media anual es del orden de 18°C. Las heladas ocurren durante los meses de diciembre y enero y los calores más intensos durante junio y julio.

Las características anteriores denotan que el clima señalado es una transición entre el desértico y el estepario por lo que puede decirse que en general es semi-desértico templado con temporada de lluvias en verano y meses secos generalmente en febrero, marzo y ocasionalmente en abril.

El coeficiente de escorrentía es del orden del 6 %, con los problemas adicionales que conllevan las altas evaporaciones. Cabe mencionar que el estado se encuentra a los 30° de latitud norte, donde a nivel mundial persisten las condiciones más desfavorables para la ocurrencia del agua. A esta misma latitud se encuentran grandes desiertos como el Gobi y el Sahara. Dada la escasez relativa de recursos hídricos superficiales, el agua subterránea ha sido utilizada para abastecer a los centros urbanos con sus crecientes demandas.

#### **3.4. Determinación de la población y su distribución**

El estado de Chihuahua cuenta con un poco más del 3% de la población del país, existiendo más de diez mil asentamientos humanos. Al final de la década de los sesenta y principio de los setenta, prevalecía la emigración del estado. Este fenómeno se empezó a revertir a mediados de los setenta y ya para el año de 1980 se observó un crecimiento social significativo.

Se ha calculado que para el año 2000 la tasa de crecimiento natural será por encima del 2% lo que producirá un aumento poblacional mínimo del 3.5 % anual. Al igual que el resto de la República el estado sufre una disminución

constante de la población rural y un incremento acelerado de la población urbana, lo que produce fuertes presiones en las demandas de servicios.

En 1980 el 45 % de los habitantes del estado se encontraban en sólo dos localidades (Cd. Juárez y Chihuahua), estando el 65 % concentrado en 15 centros urbanos. Para 1990 el 62 % se encontraba asentado en las dos principales ciudades. Si esta tendencia continúa de la misma forma, se prevé que para el 2000 el 75 % de la población vivirá en Ciudad Juárez y Chihuahua y casi el 93 % en tan solo 10 localidades.

Se ha calculado que para el año 2000 en la ciudad de Chihuahua se tendrá que abastecer a más de 1,000,000 de habitantes. Al estar totalmente aprovechados los recursos superficiales es obligado recurrir a los subterráneos, pero el constante bombeo ha provocado el abatimiento de los niveles y el agotamiento de varios pozos. Esta creciente demanda ha obligado a llevar el agua de fuentes externas cada vez más lejanas, por lo que el esquema de suministro del agua potable en la ciudad es de importación.

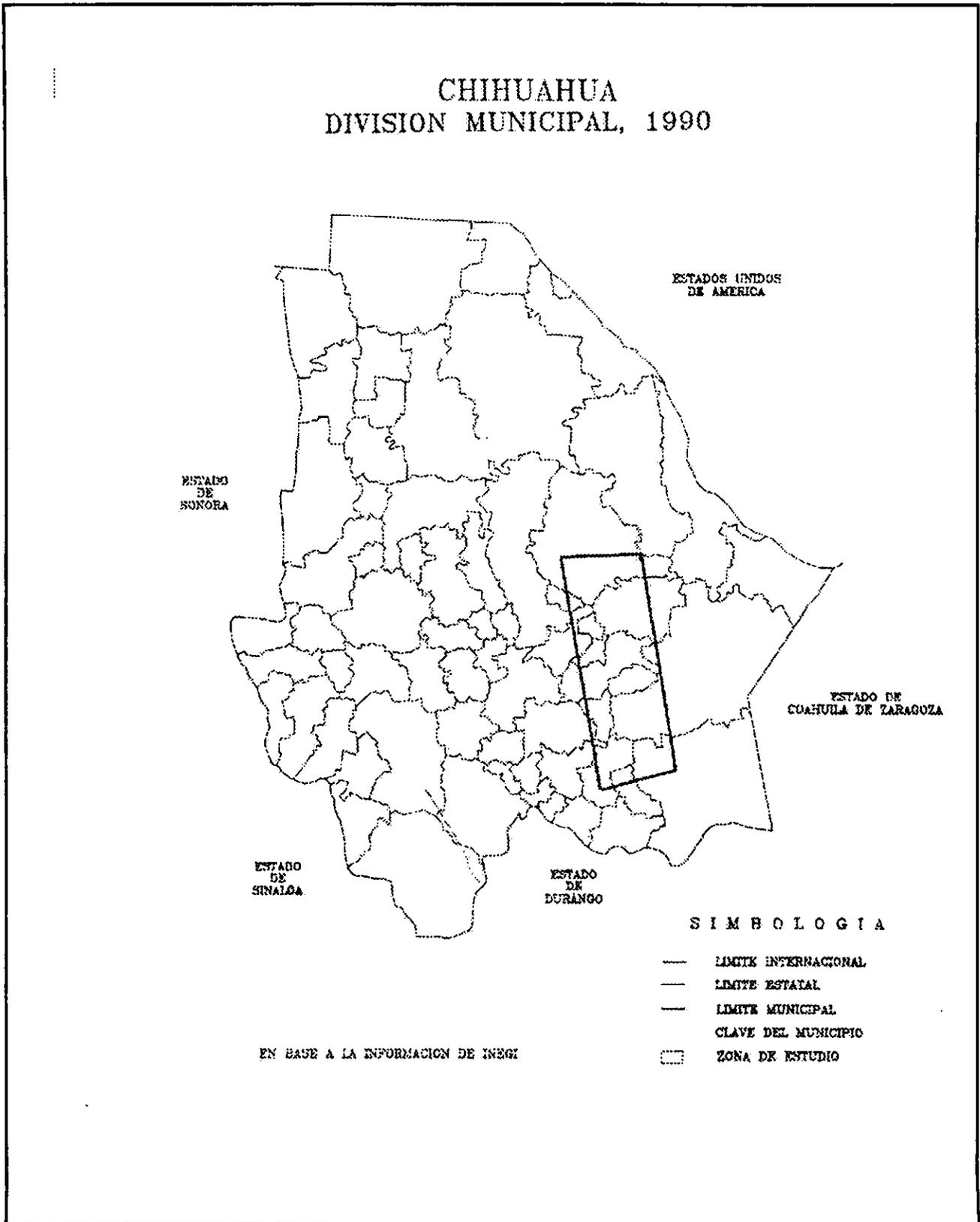


Figura 5 : Localización de la zona de estudio

### 3.5. Acuíferos de la zona de estudio

El río Conchos, el principal de la región, nace en la sierra Tarahumara. Durante su recorrido recibe las aguas de varios afluentes, como el río Florido, San Pedro, Santa Isabel, Parral y Chuvíscar. Después de recorrer 588 km. y extender su cuenca en una amplitud de 86,050 km<sup>2</sup>, termina de verter sus aguas en el Río Bravo al norte del estado.

La zona estudiada comprende el acuífero Delicias-Meoqui, entre el paralelo 28°36' y el 27°50' de latitud norte, limitado al occidente por la Sierra Santo Domingo y al oriente por el Río Conchos. Además del acuífero Jiménez-Camargo, entre los paralelos 27°50' y el 27°00' , al oeste por el meridiano 105°20' de longitud oeste y al oriente por la Sierra de Los Acebuches.

En conjunto la zona de estudio se extiende unos 180 Km. de NW a SE y en promedio de oriente a occidente unos 40 Km., lo que representa un área de unos 7,200 Km<sup>2</sup>.

### 3.6. Fisiografía, geomorfología, y geología estructural de la zona de estudio

#### 3.6.1. Fisiografía

La zona de estudio se ubica en la provincia geológica de Chihuahua y pertenece a la provincia fisiográfica de la Mesa Central del Norte de México

que consiste en una altiplanicie inclinada con grandes llanuras y bolsones rodeados de grandes elevaciones (Ordoñez, 1936).

Según las provincias fisiográficas de Raisz la zona de estudio se encuentra dentro de la provincia de Cuencas y Sierras (sierras y valles) que se caracteriza por presentar amplias llanuras separadas por unidades orográficas de rumbo NNW-SSE. Tanto los valles como las sierras representan bloques estructurales que corresponden a sinclinales y anticlinales respectivamente.

### 3.6.2. Geomorfología

La porción central del estado de Chihuahua, se caracteriza por presentar amplias llanuras de drenaje endorréico denominadas bolsones y que son típicas de esta provincia de la Mesa Central del Norte, así como de altas y escarpadas sierras en la parte occidental que se levantan sobre el piso de los bolsones que las separan.

Las sierras de esta región, producto de fallamiento normal, son espinazos escabrosos y alargados. En general presentan un flanco de pendiente fuerte y el otro casi siempre formado por un escarpe inaccesible.

Los bolsones ocupan actualmente cuencas estructurales formadas a finales del Mesozoico en las que se depositaron sedimentos en medios ambientes lacustres durante el Terciario. Estos sedimentos están constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas provenientes de la erosión de rocas

preexistentes. Una de las características de los bolsones es su poco declive y la presencia en su parte central de una laguna estacional a la que se le denomina "barrial".

Los bolsones en los que se encuentran actualmente los valles de Jiménez, Ciudad Camargo y Delicias, fueron integrados durante el Pleistoceno al sistema hidrográfico del río Conchos hasta el río Bravo y su origen es el siguiente:

### 3.6.3. Geología Histórica

Durante el Jurásico Superior la región de Chihuahua era una cuenca marina conocida como Cuenca de Chihuahua. En esta etapa hubo una transgresión marina que dio lugar al depósito de materiales evaporíticos como sal y yeso.

A principios del Cretácico continuó la sedimentación marina con el depósito de calizas, lutitas y areniscas que incluyen a las formaciones Aurora e Indidura.

Durante el Cretácico Superior la sedimentación terrígena en la región de Chihuahua marca el levantamiento y la actividad volcánica de la porción occidental de México.

El final de la era Mesozoica está marcado por el plegamiento de la carpeta sedimentaria. En la era Cenozoica la región evolucionó como una zona

emergida que fue parcialmente cubierta sobre todo en la parte occidental por emisiones ignimbríticas del Oligoceno-Mioceno, es decir se formó la Sierra Madre Occidental como una extensa meseta volcánica afectada por grabens y fallas normales que la privan en sus flancos de su apariencia homogénea.

La tectónica de distensión del Terciario Superior origina la formación de grabens así como el depósito de importantes espesores de sedimentos continentales que constituyen la característica principal del área estudiada.

#### 3.6.4. Geología Estructural

Como consecuencia de la orogenia Laramide que ocurrió al final del Cretácico Superior y principios del Terciario Inferior, las rocas sedimentarias del Cretácico Superior se plegaron y fueron fuertemente falladas como producto de un sistema de fuerzas unilaterales del suroeste dando como resultado una serie de anticlinales y sinclinales paralelos.

Posterior a la orogenia Laramide se iniciaron movimientos posiblemente asociados a fenómenos de isostacia dando como resultado una etapa de basculamiento de bloques del basamento ocasionando que la columna sedimentaria se fallara de manera normal originando variadas estructuras

Otro sistema de esfuerzos post-origénicos es el originado por gravedad dando lugar a la formación de una serie de fallas de tensión o asentamiento

representadas por fallas normales de reducido desplazamiento, paralelas, transversales y diagonales a los ejes estructurales.

Los tipos de estructuras que se observan en la zona son plegamientos, fallas y estructuras ígneas. Las primeras se observan fácilmente en casi todas las sierras calcáreas de la región como las que se sitúan al oriente de Jiménez: sierra Barraza, sierra Los Remedios, Chupaderos, Almoloya etc.

## **4. METODOLOGÍA**

La metodología seguida en este estudio ha sido la que comúnmente se lleva a cabo en estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos.

### **4.1. REALIZACION DE LA CAMPAÑA DE MUESTREO**

Se realizó la primera campaña de muestreo en el mes de Mayo de 1996. Durante la misma no fueron analizados los iones mayoritarios y solo se realizaron análisis de metales pesados con la finalidad de determinar si había un comportamiento localizado de su presencia en la zona de estudio. Para la realización de esta se efectuaron reuniones de trabajo con el personal de la zona que participaría tanto en el trabajo de campo como en el de laboratorio.

#### **4.1.1. Definición de los puntos de muestreo**

Para realizar la campaña se definieron los puntos a ser muestreados considerando los factores de accesibilidad, información histórica, ubicación dentro de los centros de población o comunidades afectadas, y la posición geográfica.

#### 4.1.2. Análisis de muestras

Las muestras tomadas se enviaron al laboratorio de la Comisión Nacional del Agua (CNA) de la Gerencia Regional Norte en Torreón Coahuila. El método analítico utilizado fue la espectrometría de absorción atómica, con base en la NOM-117-SSA1-1994, la cual establece los métodos de prueba para determinar cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio<sup>29</sup>.

#### 4.2. REALIZACION DE UNA SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO

Se realizó una segunda campaña de muestreo para analizar los iones mayoritarios, se tomaron 139 muestras distintas en el mes de octubre; la finalidad del muestreo era tener herramientas para la caracterización hidrogeoquímica de la zona, además de corroborar los resultados de algunos elementos analizados en la primera campaña como son el arsénico y hierro. Al igual que en el caso anterior, se definieron las zonas de muestreo, y los parámetros de medición "In situ". De igual manera las muestras se enviaron al laboratorio de la CNA de la Gerencia Regional Norte, sólo que en este caso no se recibieron resultados de los nitratos por no encontrarse el equipo a punto, por lo que en el caso de este ion, los resultados utilizados fueron los reportados por la Gerencia Estatal, por lo anterior, al presentarse esta diferencia de laboratorios, los nitratos se tomaron solo como orientadores, es decir para conocer si existen o no problemas de contaminación por este ion en

cada pozo, no se tomaron en cuenta para su tratamiento integral con el resto de los iones mayoritarios.

### 4.3. COMPROBACIÓN DE LA FIABILIDAD DE LOS RESULTADOS DE LA SEGUNDA CAMPAÑA

Para comprobar la fiabilidad de los resultados se les aplicó el balance iónico a cada uno de ellos, encontrándose que en los resultados de la Gerencia Regional el 90% de las muestras se encontraba dentro de la tolerancia.

La metodología para calcular el % de error en el balance iónico es la siguiente:

$$\% \text{ error} = 200 * [ (\Sigma \text{ cationes} - \Sigma \text{ aniones}) / (\Sigma \text{ cationes} + \Sigma \text{ aniones}) ]$$

La tolerancia del error ha sido determinada en función de la conductividad eléctrica de cada muestra, según el siguiente esquema:

% error permitido	30	10	8	4	<4
C.E. (ms/cm)	50	200	500	2000	>2000

### 4.4. Clasificación de la zona de estudio

Para facilidad de tratamiento de los resultados se hizo referencia en este trabajo como zona norte a la que comprende desde el municipio de Aldama

hasta el de La Cruz, también mencionado como zona acuífera de Delicias-Meoqui, y como zona sur a la que tiene como límite norte el municipio de La Cruz y llega hasta Villa López y Pueblito de Allende, al sur de Jiménez, conocido como acuífero de Jiménez-Camargo.

#### 4.4.1. Zona Norte

La zona norte comprende los municipios de Aldama, Julimes, Meoqui, Delicias, Rosales, Saucillo y La Cruz.

#### 4.4.2. Zona sur

La zona sur, denominada Jiménez-Camargo, comprende los municipios de San Francisco de Conchos, Camargo, Jiménez, Valle de Allende y Villa López. Con una extensión entre La Cruz y Valle de Allende de aproximadamente 100 km.

### **4.5. Interpretación, tratamiento y análisis de resultados mediante el uso del ICB, Diagramas de Stiff, y diagramas de Piper**

Para una correcta interpretación de los resultados de las características químicas de las muestras tomadas, se realizó el tratamiento adecuado de los datos a fin de poderlos representar en diagramas de Stiff modificados (Custodio, 1963).

#### 4.6. Análisis de resultados

Se llevó a cabo el análisis de los resultados obtenidos en ambas campañas, utilizándose los mapas geológicos como herramienta de caracterización en la segunda campaña para buscar si existía una relación entre la presencia de iones mayoritarios y metales pesados.

Debido a la naturaleza del estudio no es posible ni deseable realizar un análisis estadístico de los resultados, debido a que se busca desarrollar una representación geográfica de los niveles de contaminantes en el agua del subsuelo, lo cual está sujeto a un criterio puntual y específico para cada punto de muestreo.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Primera campaña de muestreo

A continuación se muestran los resultados obtenidos para determinar la calidad del agua en los municipios de Delicias-Meoqui y Jiménez-Camargo, en los que se determinó exclusivamente el contenido de As y Fe en los puntos de muestreo seleccionados por su accesibilidad, posición geográfica y grado de afectación.

Resultados de la campaña del mes de Mayo de 1996

	No de pozo	Localidad	Municipio	Uso	Arsénico (mg/L)	Hierro (mg / L)
1.	1-B	San Diego de Alcalá	Aldama	P	0.2005	
2.		Manantial de San Diego de Alcalá	Aldama	P		
3.		Río Conchos	Camargo			
4.	41	Los Reyes	Camargo	P	0.0273	0.0360
5.	36	La Cruz	Camargo	P	0.1073	0.0330
6.	67	Allesoca 1199	Camargo	A	0.0680	0.1130
7.	51	Las Adelas	Camargo	A	0.1002	0.6270
8.	42	Las Cuevas	Camargo	M	0.0710	0.0100
9.	57	Pozo 940, Las Virginias	Camargo	P	0.0318	0.0600
10.		San Pedro	Camargo	A		
11.		Pozo 1120	Camargo	A		
12.		San Miguel Huarache	Camargo	A		
13.		Pozo 1118	Camargo			
14.	45	El Tecuán	Camargo	P	0.0081	0.0100
15.		Chavira	Camargo			
16.		Gal Filtrante Chavira	Camargo	P		
17.		Ojo Caliente	Camargo			0.0130
18.	43	Camargo	Camargo	P	0.0170	0.0380
19.		Agua residual	Camargo			

	No de pozo	Localidad	Municipio	Uso	Arsénico (mg/L)	Hierro ( mg / L)
20.	40	Orteguero	Camargo	P	0.0447	0.0160
21.	48	Empacadora y ganadora	Camargo	A	0.0551	0.0110
22.	49	Las Acacias	Camargo	A	0.0673	0.0240
23.	50	San Martín	Camargo	A	0.1165	0.0100
24.	52	Santa Catalina	Camargo	A	0.0875	0.0160
25.	52	Santa Clara	Camargo	A	0.0566	0.0810
26.	54	San Antonio	Camargo	A	0.0615	0.0140
27.	55	Santa Rosalía	Camargo	A	0.0397	0.0100
28.	56	La Enramada	Camargo	P	0.0487	0.0190
29.	58	El Molino	Camargo	P	0.0564	0.0260
30.	59	Gustavo D Ordáz	Camargo	P	0.0918	0.0450
31.	60	El Porvenir	Camargo	A	0.0747	0.0520
32.	61	Los Gemelos	Camargo	A	0.0638	0.0470
33.	62	El Vergel	Camargo	A	0.0913	0.9560
34.	63	La Candelaria	Camargo	A	0.0212	0.0270
35.	64	El Cimarrón	Camargo	A	0.0604	0.0230
36.	68	El Nogal	Camargo	A	0.5830	0.0390
37.	73	San Miguel	Camargo	A	0.0380	0.0980
38.	74	La Ladera	Camargo	A	0.0353	0.0180
39.	44	Chavira	Camargo	P	0.0111	0.0260
40.		Horcasitas, Ciénega de los padres	Chihuahua			
41.		Pozo 21 Monteverde	Chihuahua			
42.		Rancho El Nido	Chihuahua	A		
43.		3 Horcasitas	Chihuahua	P		
44.		Ex Hac. Bachimba	Chihuahua	A		
45.	10-A	Ej. Armendariz	Delicias	P	0.0906	0.0100
46.	10-A	Rancho San Antonio	Delicias	A	0.0111	
47.	12-A	Col. Nicolás Bravo Ejido el 92	Delicias	P	0.012	0.0100
48.	11-A	El 86	Delicias	M	0.0205	0.0130
49.	3-A	Delicias 6	Delicias	P	0.0537	0.0100

	No de pozo	Localidad	Municipio	Uso	Arsénico (mg/L)	Hierro ( mg / L)
50.		Drén Laguna Seca Agua residual.	Delicias			
51.	19-A	Abraham González	Delicias	P	0.0100	0.0500
52.	20-A	El Alamito	Delicias	P	0.0273	0.3560
53.	5-A	Col. Miguel Hidalgo	Delicias	P	0.0136	0.1260
54.	22-A	Col.Terrazas	Delicias	P	0.0350	0.0190
55.		Pozo 22 junto al manantial	Delicias	P		
56.	23	Col. Cuauhtémoc	Delicias	P	0.0248	0.0140
57.	1-A	Delicias 18	Delicias	P	0.0043	0.0770
58.	21-A	Cuatro Vientos	Delicias	P	0.0139	0.2830
59.	4-A	Delicias 8	Delicias	P	0.0189	0.0120
60.	2-A	Delicias 9	Delicias	P	0.0128	0.0150
61.		Pzo.926 San Blas	Jiménez	P		
62.		Ejido Miramontes	Jiménez	A		
63.	81	El refugio	Jiménez	A	0.0351	0.0100
64.	82	Jacales	Jiménez	P	0.0356	0.0810
65.		Amores Secos	Jiménez	A		
66.	83	Nogales 492	Jiménez	A	0.0045	0.0580
67.		Pozo. 418 Aquiles Serdán	Jiménez			
68.	31-A	Ejido San Felipe	Jiménez	P	0.0137	0.0210
69.		Rancho El Piloto 308	Jiménez	A		
70.	51-A	Rancho. La Mota Pozo 66	Jiménez	M	0.0905	0.0590
71.	50-A	Rancho. El fresco 132	Jiménez	A	0.1695	0.0130
72.	34-A	Ejido las Delicias	Jiménez	P	0.0199	0.0210
73.	46-A	Ejido Tierra Blanca	Jiménez	P	0.0542	0.0350
74.	65	La Parra	Jiménez	A	0.1082	0.2080
75.	23-A	Rancho. San Miguel	Jiménez	M	0.0883	0.0100
76.		Las Amapolas	Jiménez	P		
77.		Manantial Rosetilla	Jiménez			
78.		Rcho. El Alemán, Pozo Agrícola	Jiménez	A		
79.		Agua residual Cd. Jiménez	Jiménez			

	No de pozo	Localidad	Municipio	Uso	Arsénico (mg/L)	Hierro ( mg / L)
80.		Los Juanes	Jiménez			
81.	66	El Aguila	Jiménez	P	0.1640	0.0130
82.	69	San Diego	Jiménez	A	0.0299	0.0100
83.	70	San Luis	Jiménez	A	0.0169	0.0660
84.	71	El Chamizal	Jiménez	A	0.0167	0.0100
85.	72	Estación Díaz	Jiménez	P	0.0417	0.0570
86.	75	Santa Elena	Jiménez	A	0.0158	0.0260
87.	76	Miramontes	Jiménez	A	0.0482	0.0100
88.	77	Bellavista	Jiménez	A	0.0264	0.0440
89.	78	Madero	Jiménez	A	0.0304	0.0300
90.	79	San Carlos	Jiménez	A	0.1213	0.0280
91.	80	Tres Hermanos	Jiménez	A	0.0280	0.0230
92.	84	Nuevo Tampico	Jiménez	A	0.0117	0.0330
93.	85	Cieneguita	Jiménez	A	0.0129	0.0420
94.	86	Santa Rita de Abajo	Jiménez	A	0.0133	0.0270
95.	87	Santa Rita	Jiménez	A	0.0048	0.0160
96.	88	Nuevo Saucillo	Jiménez	P	0.0052	3.3300
97.	89	El Mimbres	Jiménez	P	0.0102	0.0120
98.	90	San Luis	Jiménez	A	0.0940	0.0520
99.	91	La Trinidad	Jiménez	A	0.0168	0.0140
100.	92	El Ciprés	Jiménez	A	0.0364	0.0760
101.	93	El Sauz	Jiménez	P	0.0953	0.3050
102.	12-B	Ejido Miguel Hidalgo	Jiménez	P	0.1079	
103.	13-B	Ej. Héros de la Revolución	Jiménez	P	0.4140	
104.	14-B	Ejido las Playas	Jiménez	P	0.0706	
105.	24-A	Rancho Zacatecas	Jiménez	M	0.0233	0.0120
106.	25-A	Ejido Tierra Blanca	Jiménez	M	0.0226	0.0230
107.	26-A	Rancho San Gerardo	Jiménez	M	0.0421	0.0100
108.	27-A	Rancho. Casa Blanca	Jiménez	M	0.0302	0.0130
109.	28-A	Rancho El Nopal	Jiménez	M	0.0580	0.0100
110.	29-A	Rancho San Luis	Jiménez	P	0.0174	0.0210

	No de pozo	Localidad	Municipio	Uso	Arsénico (mg/L)	Hierro ( mg / L)
111.	30-A	Ejido Zaragoza	Jiménez	P	0.0163	0.0820
112.	32-A	Rancho. La Fortuna	Jiménez	M	0.0186	0.0120
113.	33-A	Rancho. San José	Jiménez	M	0.0260	0.0170
114.	35-A	Ojo de Dolores	Jiménez	P	0.0873	0.0130
115.	36-A	Ejido las Playas	Jiménez	P	0.0621	0.0490
116.	37-A	Rancho. El Paraíso	Jiménez	P	0.0460	0.0140
117.	38-A	Ejido Libertad	Jiménez	P	0.0252	0.0360
118.	39-A	Rancho Jacobo	Jiménez	P	0.0110	0.0780
119.	40-A	Rancho Maravillas	Jiménez	P	0.0179	0.0290
120.	41-A	Rancho Los Angeles	Jiménez	M	0.0860	0.1830
121.	42-A	Rancho San Carlos	Jiménez	P	0.1505	0.0140
122.	43-A	Ejido San Isidro	Jiménez	M	0.0717	0.0770
123.	44-A	Rancho El Chacate	Jiménez	M	0.0550	0.0300
124.	45-A	Rancho La Esmeralda	Jiménez	M	0.0808	0.0400
125.	47-A	Rancho El moro	Jiménez	M	0.0254	0.0430
126.	48-A	Rancho Los Reyes	Jiménez	P	0.0229	0.0120
127.	49-A	Rancho El Pilar	Jiménez	M	0.0905	0.0590
128.	52-A	Rancho Las Glorias	Jiménez	A	0.0365	0.0270
129.	53-A	Rancho San Luis	Jiménez	M	0.1651	0.0650
130.	54-A	Jiménez 2	Jiménez	P	0.0137	0.1070
131.	55-A	Jiménez 6	Jiménez	P	0.4045	0.0100
132.	17	Progreso	Julimes	P	0.1450	0.1600
133.	2-B	Col. Felipe Angeles	Julimes	P	0.5545	0.0100
134.	7	Las Carolinas	Julimes	P	0.0438	0.0200
135.	13	Julimes Humboldt	Julimes	P	0.1017	0.0100
136.	8	San José	Julimes	P	0.2500	0.0100
137.	10	Julimes T.D.	Julimes	P	0.1210	0.0640
138.		Manantial Balneario	Julimes	R		
139.		Río Conchos	Julimes		0.5475	
140.	12	Labor Nueva Toma	Julimes	P		0.0100
141.		Labor nueva cerca río Conchos	Julimes	P	0.1423	

	No de pozo	Localidad	Municipio	Uso	Arsénico (mg/L)	Hierro ( mg / L)
142.	4	Salón de actos	Julimes	P		0.0160
143.		Pozo 407	Julimes	A		
144.		Pozo 433	Julimes	A		
145.		Rancho María Isabel	Julimes	P		
146.	9	La Regina	Julimes	P	0.1474	0.0100
147.	11	La Esperanza	Julimes	P	0.1740	0.0100
148.	10-B	Estación de la Cruz	La Cruz	P	0.0614	0.0590
149.	39	Corraleño	La Cruz	P	0.0537	0.0100
150.		Río Conchos cerca 10 B	La Cruz			
151.	9-B	Col. Panamericana	La Cruz	P	0.1174	
152.		La Colorada	La Cruz	P		
153.	35	Puerto de Pinta Canal	La Cruz		0.3000	0.0580
154.	37	San Rafael	La Cruz	P	0.0186	0.0140
155.	38	Morrieleño	La Cruz	P	0.0478	0.0100
156.	7-B	Meoqui 2	Meoqui	P	0.1479	
157.		Meoqui A. Residual cerca 7-B	Meoqui			
158.		Estación Consuelo	Meoqui			
159.	19	Nuevo San Lucas	Meoqui	P	0.0184	0.0100
160.	18	10 de Mayo	Meoqui	P	0.0096	0.1600
161.	6	Col.Loma del Consuelo	Meoqui	P	0.3990	0.0100
162.	3-B	Loreto	Meoqui	P	0.1322	
163.	4-B	Guadalupe Victoria	Meoqui	P	0.0736	
164.	14	Presa Rosetilla	Meoqui	P	0.0541	0.0100
165.		Potrero del Llano	Meoqui			
166.	6	El Torreón	Meoqui	P	0.2310	0.0780
167.	15	Las Puentes	Meoqui	P	0.0314	0.5570
168.	16	Ortíz	Meoqui	P	0.0478	0.0120
169.	21	Los Jaquez	Meoqui	P	0.0147	0.0100
170.	22	Meoqui 4	Meowui	P	0.0125	0.0120
171.	5-B	Meoqui Pozo No 1	Meoqui	P	0.0387	
172.	6-B	20 NP Orinda	Meoqui	P	0.0697	

	No de pozo	Localidad	Municipio	Uso	Arsénico (mg/L)	Hierro ( mg / L)
173.	20	20 NP Orinda	Meoqui-Rosales	P	0.1630	0.0100
174.	13A	El 99	Rosales	P	0.0409	0.0100
175.	17-A	El Molino	Rosales	P	0.0384	0.0100
176.		Presa Fco. I Madero	Rosales	A		
177.	16-A	Población Rosales 3	Rosales	P	0.0423	0.0100
178.	18-A	Loma Linda	Rosales	P	0.0119	0.0100
179.	1	L. Cárdenas 1	Rosales	P	0.0058	0.0100
180.	3	Barranco Blanco	Rosales	P	0.0267	0.0490
181.	2	L. Cárdenas 2	Rosales	P	0.0047	
182.	14-A	Población Rosales 1	Rosales	P	0.0195	0.0100
183.	5-A	Población Rosales 2	Rosales	P	0.0233	0.0100
184.		Ojo de Agua 1254	San Fco. De Conchos			
185.		El Tigre Depósito agua potable	San Fco. De Conchos	P		
186.		Río Conchos	San Fco. De Conchos			
187.	11-B	Ejido El tigre Manantial boquilla Conchos	San Fco. de Conchos	P	0.4506	
188.	7	San Fco. De Conchos	San Fco. De Conchos	P	0.0707	0.0100
189.	6	La Laguna	San Fco. De Conchos	P	0.0146	0.4800
190.	28	Col. Benito Juárez Río Conchos cerca 8B	Saucillo		0.0520	0.0100
191.	-	Ejido el 59	Saucillo	P	0.297	0.0100
192.	5	Gomeño	Saucillo	P	0.0215	0.1730
193.		Los Olmos p.53	Saucillo	P		
194.		Pozo Hector Durán	Saucillo	A		
195.		Rancho El 7	Saucillo	A		
196.		Rancho La prieta 64	Saucillo	P		

	No de pozo	Localidad	Municipio	Uso	Arsénico (mg/L)	Hierro ( mg / L)
197.		Rancho El rincón de Guadalupe	Saucillo	P		
198.		Rancho la Chiripa	Saucillo	A		
199.		Huerta Maritere	Saucillo	A		
200.		Pozo agrícola.	Saucillo	A		
201.		Mezquital, toma domiciliaria.	Saucillo	P	0.0441	0.0980
202.	6-A	Pozo Ejido la carbonera	Saucillo	A		
203.	8-A	El Orranteño	Saucillo	M	0.0920	0.0100
204.		Altamirano 1	Saucillo	P	0.1222	0.0140
205.		Naica agua desagüe mina	Saucillo			
206.		559 Los pozos	Saucillo	P		
207.	30	Estación Conchos	Saucillo	P	0.0585	0.0100
208.	8-B	Col.- Vicente Guerrero	Saucillo	P	0.0878	
209.	24	El Prosperoño	Saucillo	P	0.0169	0.0100
210.	26	La Cuadra	Saucillo	P	0.0353	0.0160
211.	27	San Bernardino	Saucillo	P	0.0629	0.0350
212.	29	Saucillo	Saucillo	P	0.0567	0.0100
213.	32	Estación Saucillo	Saucillo	P	0.0913	0.0230
214.	33	Parritas	Saucillo	P	0.0104	0.0100
215.	34	Valle del Toro	Saucillo	P	0.0287	0.0140
216.	7-A	Las Varas	Saucillo	P	0.0213	0.0100
217.		Pueblito Allende	Valle de Allende	P		
218.		Pozo 699 Rancho San Agustín	Valle de Allende	P		
219.		Pozo 659	Valle de Allende	P		
220.		Pozo 881	Valle de Allende	P		
221.		Pozo 848	Valle de Allende	P		
222.		827 Sta. Mónica	Valle de Allende	P		
223.		Pozo 874 El Canelo	Valle de Allende	A		
224.		Pozo 722 Rancho Los Sauces Sta. Lucía	Valle de Allende	A		
225.		Pozo 1116	Valle de Allende	P		
226.		Pozo 972 El álamo	Valle de Allende	A		

No de pozo	Localidad	Municipio	Uso	Arsénico (mg/L)	Hierro ( mg / L)
227.	Pozo 1001 El Norteño	Valle de Allende	A		
228.	Pozo 1104	Valle de Allende	A		
229.	Porvenir Villa López	Villa López	P		
230.	Santa Ana Toma	Villa López	P		
231.	Rancho Fronteras	Villa López	M		
232.	Pozo. 141 Rancho el 40	Villa López	M		
233.	Pozo 416 Rancho el palenque Palmolayo.	Villa López	M		
234.	Salaices	Villa López	M		0.0100
235.	Pozo. 296 Rancho Los Sauces.	Villa López	A		
236.	Ojo de Agua de Almoloya.	Villa López	p		

Claves: P Potable  
M Municipal  
A Agrícola

## 5.2. Segunda campaña de muestro

En la siguiente tabla se pueden observar los resultados obtenidos de la segunda campaña de muestreo, la explicación a detalle se realizó dividiendo la zona de estudios y se explica a continuación.

No. Muestra	T (°C)	CE (μS/cm)	HCO <sub>3</sub> (ppm)	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub> (ppm)	Cl (ppm)	NO <sub>3</sub> (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Error (%)	Tolerancia	As (ppm)	F (ppm)	Fe (ppm)
2	19.9	1100	268.45	0	341.31	25	1.2	64.2	8.72	139.47	13.2	10.04	F	0.0155	1.4	0.301
3	25.9	1550	170.83	7.2	589.55	51	3	196.2	6.55	128.25	17.5	1.57	OK	0.0359	1.4	0.019
4	28.1	1630	139.1	2.4	645.38	44	3.9	179.9	7.91	148.29	17.99	1.15	OK	0.0165	1.3	0.065
5	39	3690	109.82	2.4	2077.78	29	0.17	159.2	22.09	551.1	130.06	0.59	OK	0.0391	3.3	0.639
6	24.9	610	150.09	2.4	98.02	24	4.2	75.9	5.11	20.04	9.23	2.57	OK	0.0436	1.9	0.011
7	24.1	1700	290.41	19.2	433.23	105	4.5	278.5	3.77	84.96	15.55	1.97	OK	0.0936	2.7	0.161
8	25.4	1210	224.05	2.4	324.39	88	4.2	162.6	4.86	89.77	17.5	2.03	OK	0.0464	1.6	0.026
9	24.7	760	200.18	7.2	172.66	22	3.6	116.4	4.1	34.86	8.5	2.46	OK	0.0682	1	0.029
10	18.4	1660	327.02	0	545.14	53	2.6	124.4	11.24	89.77	30.14	0.82	OK	0.0201	1.5	0.115

Cap. 5. Resultados.

No. Muestra	T (°C)	CE (μS/cm)	HCO <sub>3</sub> (ppm)	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub> (ppm)	Cl (ppm)	NO <sub>3</sub> (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Error (%)	Tolerancia	As (ppm)	P (ppm)	Fe (ppm)
11	22.8	2910	253.81	4.8	941.04	240	6.4	412.6	3.02	34.86	46.18	1.86	OK	0.0318	0.9	<0.01
12	22.8	1460	336.7	0	365.06	79	3.9	158.9	4.76	198.79	21.39	1.96	OK	0.02	1.6	0.04
14	22.4	1200	351.43	9.6	221.7	33	7.5	210.9	10.26	168.34	8.75	1.33	OK	0.028	3.5	0.013
16	21.3	1900	397.74	7.2	489.6	148	5.2	279.5	7.21	126.65	19.44	0.59	OK	0.0018	1.5	<0.01
17	26	1110	241.8	7.2	226.8	61	7.8	123.1	7.14	28.85	17.5	2.59	OK	0.0139	2	0.01
18	24.7	1110	165.95	2.4	344.57	33	3.3	121	5.68	110.61	15.55	1.77	OK	0.0209	1.4	<0.01
19	24.9	710	213.54	3	156.87	10	0.76	77.3	3.69	70.5	8.75	2.02	OK	0.0298	1.4	<0.01
20	22.8	310	151.31	0	23.88	4	0.58	15.9	9.73	81.75	7.78	2.61	OK	0.0183	0.7	0.501
21	28.1	520	192.8	2.4	75.39	14	0.56	75.7	2.97	56.94	4.86	2.43	OK	0.0268	1.4	0.032
22	26.6	550	270.89	3.6	39.26	5.5	3.7	30.8	10.25	58.55	13.82	0.18	OK	0.0209	0.9	<0.1
23	29.5	690	126.9	0	148.19	31.5	3.15	123.7	<1.0	18.43	3.88	8.45	F	0.0513	3.4	<0.01
25	27.3	2200	366.07	0	712.36	103	0	2965.6	16.74	160.32	29.37	0.23	OK	0.0098	2.1	0.28
26	24.8	3180	175.72	3.6	114.3	156	8.5	332.6	8.4	268.54	34.63	1.61	OK	0.021	1.3	0.017
27	25.4	1260	414.88	7.2	199.69	24	8.15	182.4	4.52	65.52	13.12	1.4	OK	0.022	1.2	0.029
28	24.2	1010	361.19	8.4	131.74	34	7.16	153.6	3.09	40.07	11.66	3.05	OK	0.0554	1.8	0.014
29	26.4	1310	283.1	7.2	387.13	42	6.3	182.19	6.13	96.18	12.64	1.96	OK	0.0029	1.2	<0.01
30	24.7	950	305.06	3.6	150.24	2	7.5	157.6	2.54	30.08	6.56	3.41	OK	0.0806	3.4	<0.01
31	28.8	1240	219.64	4.8	369.11	44	4.1	176.9	3.56	70.52	14.09	2.3	OK	0.0087	1.3	<0.01
32	24	1090	190.35	4.8	292.41	42	4.2	137.1	3.34	67.33	11.66	2.42	OK	0.013	1.1	0.011-
34	23.6	1860	248.93	2.4	619.44	94	4	239.7	4.89	149.09	17.5	1.76	OK	0.013	1.4	0.03
35	37.3	590	136.66	2	116.13	25.5	2.8	97.8	1.01	12.82	4.37	4.16	OK	0.0705	3.9	<0.01
36	24.8	1120	444.11	0	<24.0	79	0	223.3	21.1	56.11	8.75	31.64	F	0.0025	2	0.193
37	21.1	1960	336.78	2.4	644.08	76	3.9	207.7	13.27	177.95	34.03	0.78	OK	0.0192	2.7	0.027
38	22.7	380	211.1	1.2	<24.0	9.5	2.6	41.3	6.44	32.06	15.53	11.58	F	0.0114	0.6	0.194
39	24.4	730	294.08	6	70.64	20.5	4.2	93.8	<1.0	29.65	13.55	3.92	OK	0.0424	1.6	0.012
41	25.2	390	222.08	2.4	<24.0	9	2.9	35	5.13	41.68	11.66	198.73	F	0.0244	0.4	<0.01
42	22.9	740	295.3	1.2	72.06	21.5	4	5-Jul	5.66	66.53	26:55.7	2.14	OK	0.0101	1.4	0.018
43	28.7	940	309.94	3.6	125.72	56	1.5	193.2	1.58	8.82	3.64	2.59	OK	0.196	8.8	<0.01
44	23.1	740	295.3	1.2	10.65	21.5	3.9	77.3	0.58	66.53	11.66	9.87	F	0.0161	1.2	<0.01
45	24.4	870	263.52	0	55.72	30.5	4	57	5.6	72.94	10.69	10.88	F	0.0158	1.5	0.015
46	23.1	680	258.69	0	71.29	43	4	58.9	5.75	60.1	11.18	5.49	OK	0.0114	1.8	0.817
47	24.7	760	290.41	0	24	30.5	2.6	104.2	1.75	66.53	12.15	19.31	F	0.0254	1.6	0.01
48	26.5	1060	229.4	4.1	123	80	2.7	172.7	<1.0	8.1	6.8	3.37	OK	0.2673	8.8	0.019
49	26	1110	244.05	2.4	279.8	5.1	3.9	168.8	2.14	54.5	11.66	2.96	OK	0.561	4.3	0.054
50	27.1	1000	19.58	0	283.25	37	7.8	153.6	1.66	32.08	4.37	3.89	OK	0.138	3.2	<0.01
51	26.3	1170	180.6	4.8	3	40	5.5	179.4	2.73	46.49	10.69	2.7	OK	0.0119	5.5	<0.01
52	23.5	1640	3	9.6	513.69	69	2.65	222.2	10.94	137.87	26.25	37.02	F	0.0394	3.2	0.014
53	27.7	1860	283.1	9.6	405.56	173	5.6	356.3	1.43	32.06	9.72	2.45	OK	0.0372	6.7	0.081
56	37.8	1550	141.54	0	495.34	81	2	177.1	19.38	100.2	21.88	0.32	OK	0.0343	4.1	<0.01
57	22.5	1850	317.26	0	604.45	7.8	2.2	238.3	15.3	139.47	27.22	0.34	OK	0.019	-3.7	0.075
58	19.2	860	97.92	0	228.8	13.8	0.25	65.6	11.73	8.17	15.55	26.55	F	0.02	1.3	0.149
59	21.1	1370	207.44	2.4	427.02	6.8	2.85	189.3	11.75	88.17	16.04	0.58	OK	0.0348	3.5	0.011

Cap. 5. Resultados.

No. Muestra	T (°C)	CE (µS/cm)	HCO <sub>3</sub> (ppm)	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub> (ppm)	Cl (ppm)	NO <sub>3</sub> (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Error (%)	Tolerancia	As (ppm)	F (ppm)	Fe (ppm)
60	23.3	720	242.82	9	82.46	17	1.6	132	<1.0	4.8	3.4	3.41	OK	0.14	13.3	<0.01
61	23	1800	297.74	7.2	507.84	50	3.9	337.9	<1.0	38.47	8.75	1.11	OK	0.0247	7.7	0.12.5
62	25.4	760	173.27	2.4	130.74	37	3.6	87.2	2.43	43.28	6.32	3.16	OK	0.016	1.2	3.62
63	25.7	1120	395.36	7.2	140.84	34	0.6	215.3	1.24	6.41	7.77	2.52	OK	0.0239	21.6	22.82
64	26.9	1480	522.26	26.4	233.51	36	0.4	325.7	4.47	4.8	6.8	1.63	OK	0.776	10.6	3.222
65	26.3	950	360.48	1.2	138.93	28	24	141.9	1.82	57.71	9.72	6.01	OK	0.2266	3.4	0.078
66	38	1560	344.11	0	254.01	176	0.34	276.2	16.09	40.08	18.47	0.27	OK	0.0718	6	<0.01
67	25.5	1900	207.44	12	835.46	62	3.3	174.8	11.97	205.98	55.89	0.93	OK	0.0936	1.7	0.023
68	19.3	820	336.79	10.8	126.76	7	9.8	67.6	5.25	89.82	12.88	2.97	OK	0.0145	0.49	0.015
69	22.5	530	261.13	9.6	40.95	9	1.9	34.7	8.58	63.36	10.21	0.13	OK	0.0431	1.42	<0.01
70	23	670	976.99	4.2	82.39	10	5.18	29.9	4.51	86.62	10.21	2.75	OK	0.0189	0.83	<0.01
71	23.6	1120	263.57	12	351.12	30	4.85	52	6.15	165.11	25.27	1.7	OK	0.0208	1.15	0.208
72	28.8	650	302.62	0	61.59	22	1.4	30.1	4.84	71.38	21.63	1.64	OK	0.0242	1.3	<0.01
73	23	1670	436.85	0	455.57	62	0	187.7	23.59	150.68	28.19	1.13	OK	0.0074	0.85	0.399
74	25.6	940	366.79	0	182.24	23.5	3.5	48.5	6.49	120.3	19.44	6.35	OK	0.0157	0.6	0.042
75	23.6	2920	161.07	8.4	1314.79	194	6.2	237.8	13.92	304.61	116.69	1.03	OK	<0.0019	1.8	0.049
76	26.3	500	217.2	0	67.78	7.5	1.16	38.9	3.64	52.93	2	2.25	OK	0.0121	0.6	<0.01
78	25.9	540	183.04	1.2	95.46	14.5	1.55	41.4	4.27	52.93	9.72	2.06	OK	0.0096	0.6	0.01
79	23.8	1010	244.05	6	251.77	50	3.7	77.5	8.29	94.98	30.18	0.99	OK	0.0081	1.1	0.455
50	25.4	2210	158.63	3.6	1162.01	35	0.8	100.3	13.67	320.64	85.08	0.72	OK	<0.0019	1.18	0.239
51	28.3	700	246.49	0	108.26	24.5	4.45	17.5	4.8	97.44	13.85	2.65	OK	10.0026	0.6	0.387
82	27.3	2280	178.16	2.4	1184.67	20	2.34	364.1	8.21	380.76	94.79	41	F	0.0016	1.8	0.184
83	25.2	1950	124.46	0	823.75	122	2.3	147.2	8.98	233.24	53.95	0.18	OK	<0.0014	1.2	8.99
84	36.3	3550	161.07	2.4	2929.66	5	0.17	89.5	11.53	581.12	153.12	35.11	F	0.0071	2.2	0.611
85	24.5	1880	200.12	4.8	960.19	18	3.8	72.2	7.99	287.74	72.41	1.43	OK	0.0053	1.3	0.393
86	24.4	1210	170.83	4.8	341.06	86	4.65	153.2	6.92	115.42	33.53	20.03	F	0.0021	1.1	8.985
87	21.2	1670	178.16	4.8	809.36	20	9.14	68.8	10.99	216.4	76.3	1.43	OK	0.0022	1.31	0.027
88	24.7	3620	156.19	2.4	1903.47	72	2.14	20.5	14.61	611.22	166.49	2.51	OK	0.0091	1.8	2.197
89	23.9	1120	163.51	0	361.82	20	2.3	178.9	8.23	28.85	11.06	4.48	OK	0.0502	4.3	0.046
90	24.9	750	246.49	6	183.41	1.1	1.2	35.4	6.6	99.05	20.17	0.94	OK	0.0397	2.16	0.021
91	20.6	1510	180.6	6	479.8	75	8.5	138	9.56	133.85	27.22	1.55	OK	0.032	2.08	0.053
92	17.6	420	147.65	1.2	71.87	9	1.15	22.1	5.24	47.32	8.75	1.25	OK	0.0241	1.03	0.057
93	23.9	610	178.16	0	149.71	10	0.17	30.1	5.98	70.59	15.55	0.93	OK	0.0171	1.2	0.307
95	23.9	1160	273.34	4.8	348.49	15	0.5	40.7	6.45	163.51	25.27	1.25	OK	0.0133	1.2	<0.01
96	24.2	940	219.64	1.2	285.67	15.5	0.96	54.3	7.33	119.5	17.5	0.89	OK	0.0096	1.3	0.365
96A	22.3	1150	263.57	4.8	366.91	26	2.1	87.9	8.17	140.28	20.9	1.05	OK	0.011	1.3	0.016
97	39.7	3575	205	2.4	1971.33	36	0	102.8	24.41	583.1	113.12	2.8	OK	0.27	3.4	0.013
98	22.5	1440	297.74	8.4	532.55	27	5.1	78	6.21	198.77	40.34	1.79	OK	10.0165	1.2	<0.01
99	29	1700	654.05	0	304.4	10	0	128.7	22.61	161.9	40.82	1.06	OK	<0.0014	1	0.277
100	26.6	1070	258.69	0	330.4	22	0.63	53.4	8.79	139.46	26.4	0.62	OK	0.0077	1.3	0.097
101	25	940	217.2	0	291.56	15.5	1.16	55	6.67	120.3	17.25	1.01	OK	0.011	1.4	0.344
102	27.4	2000	273.34	0	546.73	112	5.67	190.7	4.15	166.71	24.3	2.09	OK	0.0211	1	0.02

Cap. 5. Resultados.

No. Muestra	T (°C)	CE (μS/cm)	HCO <sub>3</sub> (ppm)	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub> (ppm)	Cl (ppm)	NO <sub>3</sub> (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Error (%)	Tolerancia	As (ppm)	F (ppm)	Fe (ppm)
103	29	1120	151.31	2.4	335.08	28	1.12	109.3	4.07	65.72	11.66	12.84	F	0.087	1.4	0.577
104	20.2	4860	195.24	7.2	2023.41	272	21	253	15.77	545.09	171.38	1.64	OK	0.0035	1.62	0.045
106	28.2	3180	190.36	2.4	2131.5	16	0.9	91.3	12.66	545.09	194.48	1.15	OK	0.0188	1.64	1.989
107	24	2430	244.05	7.2	1132.82	79	14.9	123.7	12.86	378.76	63.21	1.61	OK	0.0036	0.89	0.021
108	25	3450	200.12	4.8	1666.41	200	7.7	319.2	19.57	376.75	125.2	0.96	OK	0.0495	1.69	0.022
109	29	1610	183.04	7.2	565.17	104	6.5	88.3	9.29	223.62	31.1	1.39	OK	0.0238	1.73	<0.01
111	27	650	158.83	3	166.2	14.5	2	72.9	5.1	52.13	7.29	1.53	OK	0.0593	1.75	<0.01
112	20.2	1310	168.39	7.2	416.83	88	5	54.28	7.15	174.73	33.53	1.55	OK	0.0159	0.7	0.094
115	24.4	1050	234.28	2.4	237.86	49	3.6	104.3	1.78	84.96	14.58	2.88	OK	0.052	2.2	2.351
116	20.7	1400	341.671	12	456.38	33	2.4	94.53	5.49	201.98	22.84	1.61	OK	0.0122	0.83	<0.01
126	25.7	780	319.7	3.6	75.67	30	2.4	157.8	<1.0	6.41	4.37	3.3	OK	0.2016	8.8	<0.01
129	2503	380	202.56	4.8	24	11	1.4	57.8	2.45	36.47	7.05	14.28	F	0.015	1.4	0.01
130	18.5	570	275.77	10.8	35.67	11.5	2	102.6	3.22	16.03	5.83	2.65	OK	0.1526	2.1	0.01
131	28.2	430	183.03	1.2	35.85	15.3	3.2	49.9	9.8	28.85	5.34	198.8	F	0.0237	3.1	0.027
132	25.8	1040	170.83	7.2	320.08	38	3.7	121	5.72	72.13	19.93	1.76	OK	0.0317	1.59	0.13
133	27.1	1180	136.67	2.4	454.82	25	2.4	119.6	7.49	102.59	25.27	1.19	OK	0.0291	1.66	0.017
134	21.9	930	297.74	3.6	226.84	14	2.9	47.61	6.93	131.13	15.07	1.32	OK	0.0053	0.64	0.623
135	22.4	950	302.62	3.6	222.92	16	3.85	48.99	4.01	131.53	14.82	2.16	OK	0.0162	0.84	0.01
137	23.8	830	245.27	3.6	178.15	27.5	5.3	26.22	5.37	121.9	14.09	2.21	OK	0.0185	0.45	0.098
138	27	540	174.5	3.6	71.19	26	4.5	43.47	5.06	50.53	7.29	2.45	OK	0.1064		0.171
140	20.3	1770	312.38	7.2	661.23	31	3.86	115.2	9.43	324.42	40.82	194.43	F	0.0136	2	0.104
141	21.4	2400	219.64	0	1069.78	44	6.5	27.1	14.16	336.67	104.51	1.03	OK	0.137	3	0.105
142	24	1130	214.76	9.6	383.32	36	9.15	51.75	5.71	163.51	25.76	2.2	OK	0.0127	0.6	0.017
143	19.9	820	236.73	1.2	208.55	17.5	9.14	55.89	7.69	99.45	13.61	2.21	OK	0.0363	0.6	0.334
144	23.9	2040	224.53	7.2	368.19	11.2	7.8	135.9	6.95	204.41	29.17	14.32	F	0.0053	1.4	0.01
145	28.2	1000	119.58	2.4	279.99	46	7.16	124	3.81	58.55	4.86	5.21	OK	0.0134	1.8	0.01
146	35.9	1600	43.93	0	560.84	58	5	204.5	5.65	83.36	7.78	2.37	OK	0.0177	4.1	0.871
147	31.6	750	165.95	1.2	159.99	27	7	96.4	6.28	38.9	5.1	2.4	OK	0.0527	2.7	0.123
148	28.4	1360	151.31	2.4	329.1	122	6.5	168.8	5.72	88.16	9.72	2.12	OK	0.0087	1.3	0.874
149	25.3	2800	292.86	10.8	891.76	202	8.5	314	8.1	196.39	41.32	8.83	F	0.0064	2	0.76
150	20.9	640	257.41	3.6	96.63	11	1.09	81.2	2.82	43.31	9.23	2.36	OK	0.0692	2.1	0.307
151	24.1	1430	278.22	8.4	451.51	11	6.8	111.8	6.8	147.48	24.3	1.83	OK	0.1274	2.1	1.035
152	26.4	1820	312.38	9.6	603.18	14	0.23	232.3	3.3	138.66	11.66	1.82	OK	0.011	3.6	1.479
153	22.1	6390	344.11	7.2	3072.27	386	17.9	980.7	18.03	430.86	184.76	1.51	OK	0.193	1.55	1.342
154	20.6	5690	195.24	0	2228.19	79	6.5	216.2	16.47	517.03	184.76	2.14	OK	0.0019	1.88	0.416
155	27	1640	175.72	4.8	727.17	46	32	115.9	7.22	202.78	47.14	3.93	OK	0.0087	1.63	0.458
156	22.2	600	170.83	2.4	141.8	9	4.4	36.3	6.22	57.54	17.25	1.96	OK	0.1084	0	1.923

### 5.3. Zona norte

Mayoritariamente se trata de aguas del tipo sulfatado-sódico ( $\text{Na-SO}_4$ ), encontrándose porciones con aguas mixtas, entre sulfatadas y bicarbonatadas, y una pequeña zona con agua del tipo bicarbonatado-cálcico.

Esta predominancia del sulfato sobre el bicarbonato puede manifestar la presencia de importantes horizontes evaporíticos, mismos que al ser más solubles que las calizas aportan más sulfatos. También merece ser tomado en cuenta el hecho que se trata de una zona agrícola (D-05), por lo que parte del aporte de sulfatos puede relacionarse a esta actividad. Aunque los contenidos encontrados no permiten indicar el origen, parece ser que es natural.

En términos generales se trata de aguas poco mineralizadas, es decir, la cantidad de sales disueltas es baja, por lo que puede considerarse desde el punto de vista meramente hidrogeoquímico, de buena calidad.

Se observa en la distribución espacial que hacia el norte, en el municipio de Aldama y en el municipio de Chihuahua, el agua es bicarbonatada cálcica, sin embargo a pocos kilómetros y siempre en dirección NW-SE, comienza una evolución importante pasando a aguas del tipo mixto, bicarbonatado-sulfatado y cálcico-sódico, a la altura de Meoqui, a aguas francamente sulfatadas-sódicas. En esta zona parece que el proceso de intercambio catiónico es predominante, y el aporte de sulfatos es muy importante.

Hacia la ciudad de Delicias la mezcla de diversos tipos de aguas es mucho mayor, es decir, se encuentran, dentro de las aguas ya mencionadas, todos los tipos, aunque siempre con predominio de los iones sulfato y sodio.

Como ya se ha mencionado, y a reserva de que esta interpretación sea corroborada con datos de piezometría, parece tratarse de agua bicarbonatada cálcica que fluye en dirección S-SE de Aldama hacia Julimes, y que va ganando sulfatos, posiblemente precipitando carbonatos como  $\text{CaCO}_3$ , con la consiguiente disminución de calcio en disolución, e intercambiando calcio por sodio en las formaciones arcillosas.

En la zona de Meoqui-Delicias, la evolución de bicarbonatada a sulfatada se da en dirección E-SE, encontrándose mezcla de ambas pero como siempre con amplio predominio de sodio. Como se puede observar en la zona de Rosales (Figura 6) al W de Meoqui, el agua es bicarbonatada cálcica, lo que corrobora lo anterior.

En dirección sur, hacia Saucillo, y La Cruz, ésta evolución no se ve tan clara, y la mayoría de las aguas son sulfatadas-sódicas con algunas zonas de mezcla. No resulta tan evidente la dirección del flujo preferente, aunque la tendencia es hacia el N-NE, hacia Delicias, invirtiéndose en relación que se ha venido comentando.

En esta zona se observa que predomina el ion  $\text{SO}_4^{*}$  sobre el  $\text{HCO}_3^{-}$ , encontrándose los menores valores de la relación en la parte occidental,

cercana a la sierra (Figura 6). Estas zonas se encuentran asociadas a depósitos lacustres y fluviales de gravas, arenas, arcillas, limos, calizas y areniscas.

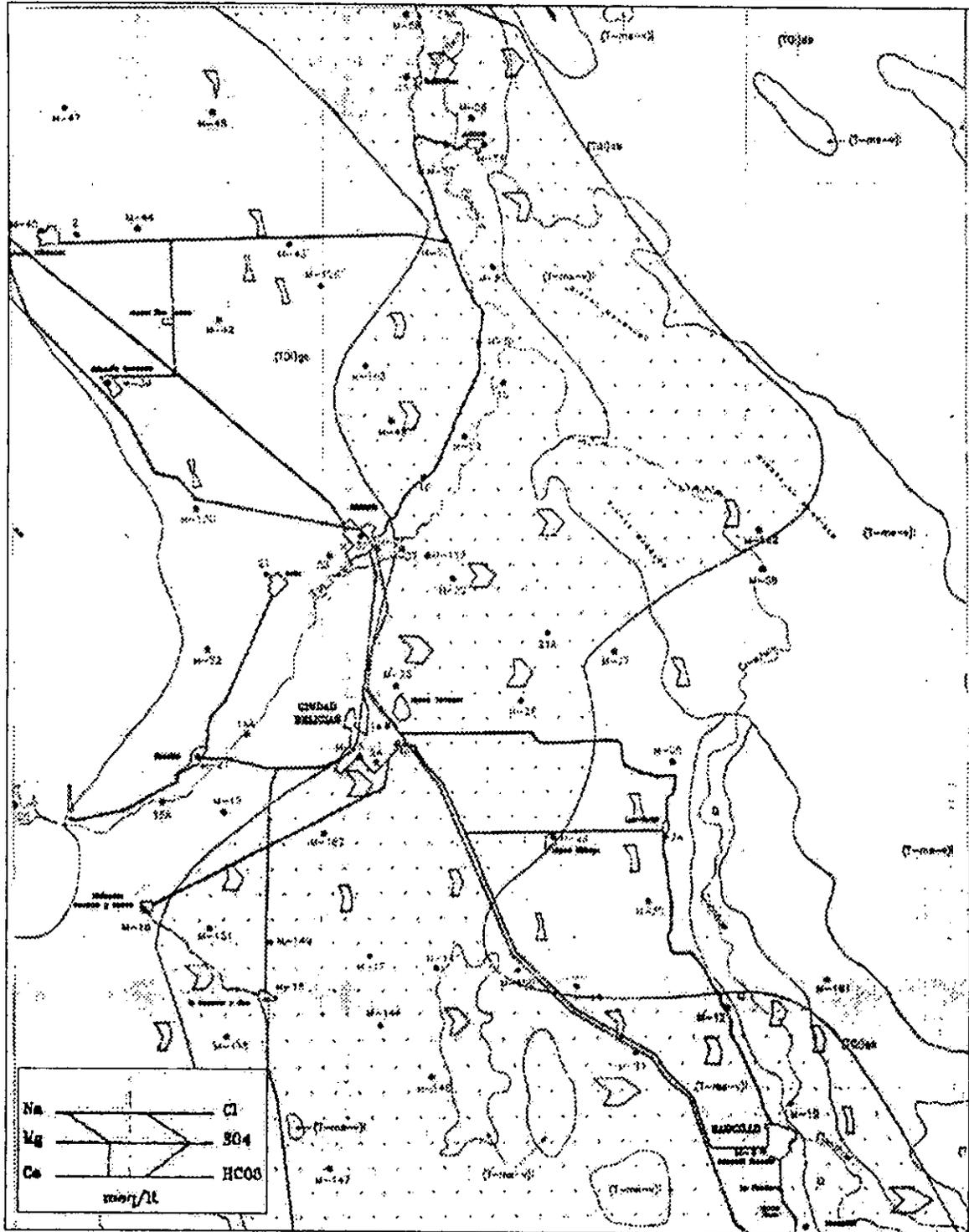


Figura 6: Diagrama de Stiff Modificado, Delicias, Chihuahua

5.3.1. Configuración  $rSO_4/rHCO_3$

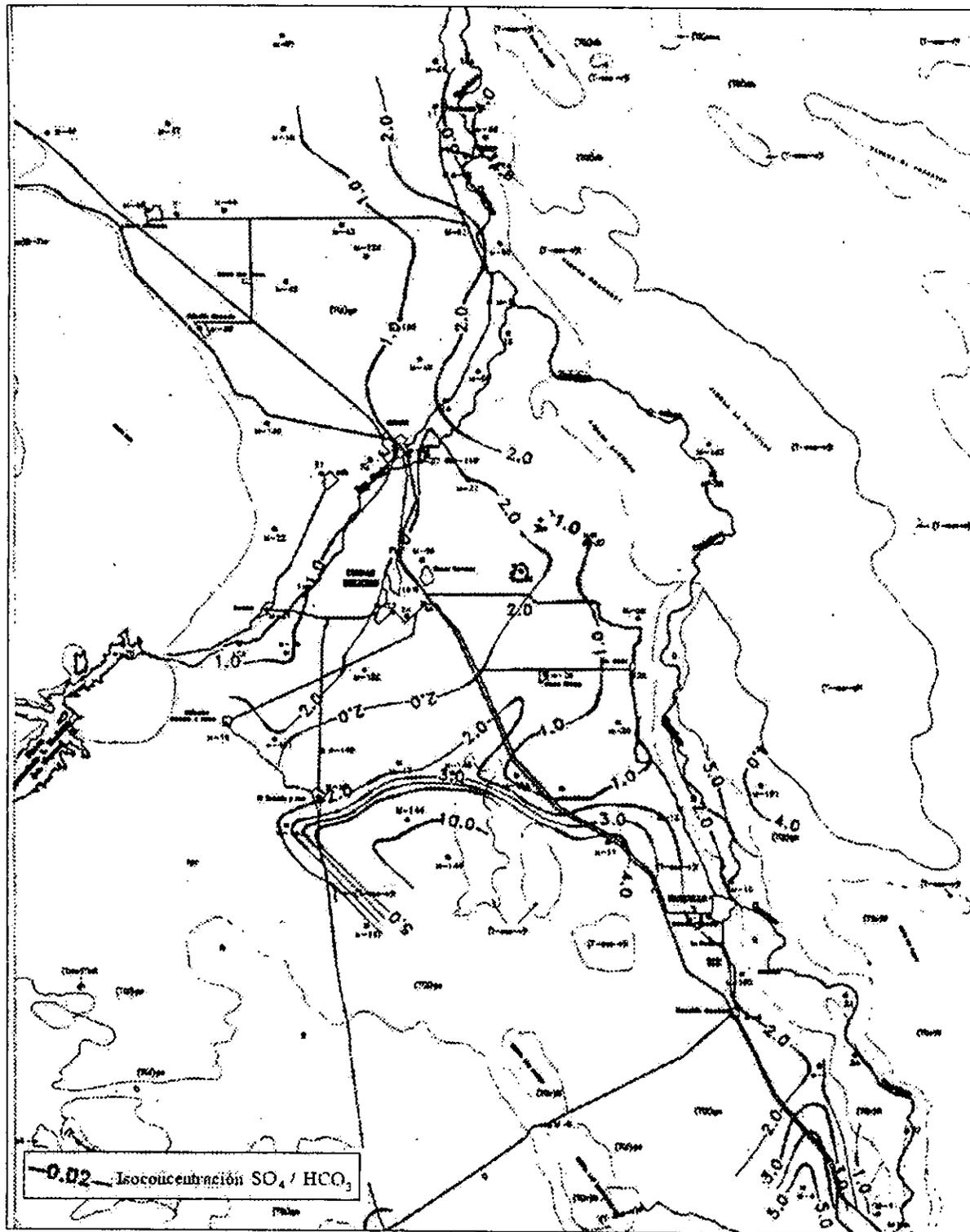


Figura 7 : Configuración de  $rSO_4 / rCO_3$  en Delicias, Chihuahua

El aumento de  $SO_4^{2-}$  posiblemente conlleve la precipitación de  $HCO_3^-$ . Esta evolución se aprecia bastante bien en el diagrama de Piper (Figura 8) en el que se observa la evolución de los iones en los diferentes puntos. En este diagrama se ve como todos los pozos ubicados en la margen izquierda del plano presentan características de aguas bicarbonatadas cálcicas y/o bicarbonatadas sódicas y conforme se avanza hacia el valle en dirección E-SE claramente se enriquece el agua de iones  $SO_4^{2-}$ .

En términos generales el 70 % de las aguas de la zona son sódicas de las que casi el 50 % son sulfatadas. El 30% restante de las aguas es del tipo cálcico y se dividen en un 70 % de ellas sulfatadas y 30 % bicarbonatadas.

Como ya se ha mencionado esta pequeña porción se ubica en la margen izquierda, en las estribaciones de la sierra occidental.

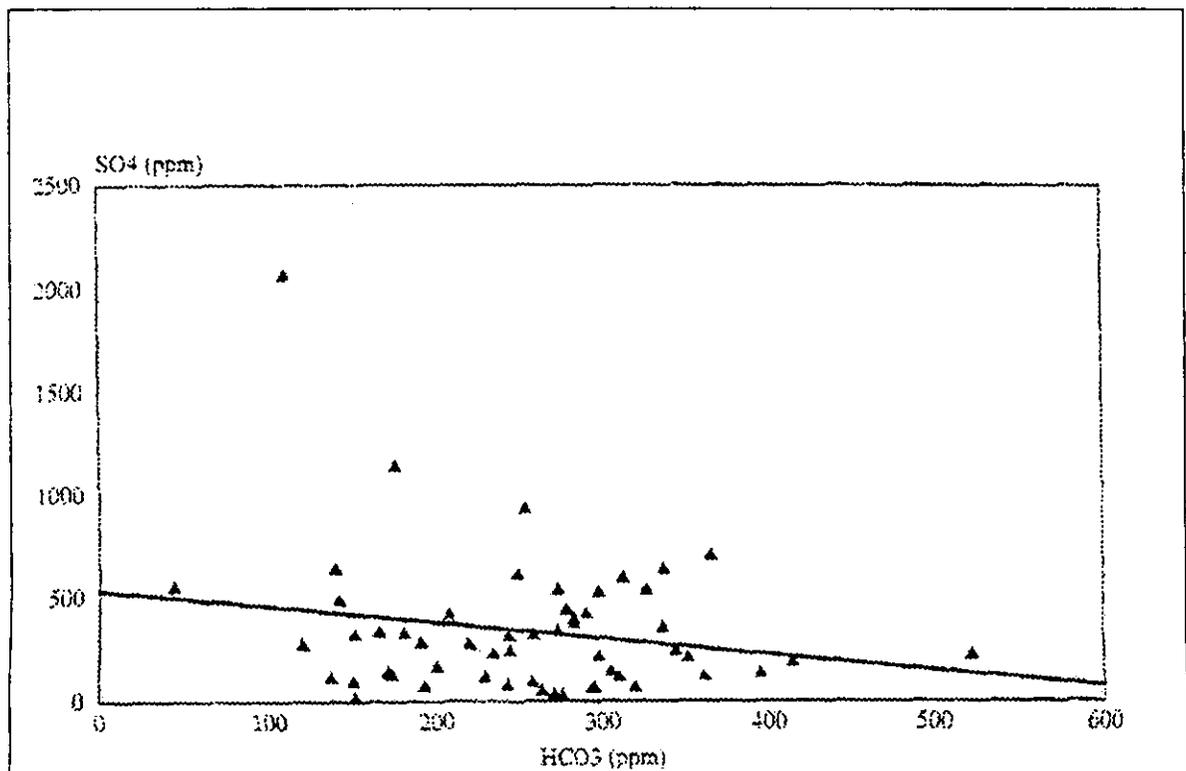
Al NW de Delicias, W y NW de Meoqui las aguas encontradas son bicarbonatadas, poco mineralizadas, por lo que podría considerarse una zona de recarga al sistema. La relación va aumentando considerablemente en dirección E-S-SE, aumentando además la carga iónica y la conductividad eléctrica.



Las aguas del tipo bicarbonatado, tanto cálcico como sódico, se encuentran, como ya se ha mencionado en la zona W, además de en la parte N, en San Diego de Alcalá y alrededores, donde por otra parte también se encuentran las concentraciones de As y F más altas. También se encuentran formando una "cuña" que podría considerarse como "entrada" al sistema al SE de la ciudad de Delicias, en dirección hacia Camargo.

Al graficar las variaciones de sulfatos y bicarbonatos (Gráfica 1) se ha observado una ligera tendencia a disminuir estos últimos conforme aumentan los primeros, aunque esta relación no es muy clara, más bien parece apreciarse que el contenido de  $\text{HCO}_3^-$  se mantiene constante, independientemente del aumento de  $\text{SO}_4$ , esto conlleva un apreciable aumento de sales en disolución.

**Gráfica 1 : Relación entre los contenidos (ppm) de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$**



No ha sido posible realizar el cálculo del estado de saturación de los diferentes minerales que pudiesen tomarse en consideración en este sistema, sin embargo, según Hanshaw, Back y Rubin, 1965, la evolución del grado de saturación de un agua con respecto a la calcita es un buen indicador del movimiento de las aguas en terrenos carbonatados, donde las áreas con menor saturación corresponden a zonas de recarga preferente. Sin embargo algo similar sucede con la relación  $r_{Na}/r_{Ca}$ , encontrándose normalmente los menores valores en las áreas de recarga. En este estudio se ha intentado configurar esta relación pero no ha quedado del todo clara por lo que se ha prescindido de la misma.

Curiosamente se ha observado que existe la tendencia al incremento de iones diversos en dirección S-SE en el caso de Delicias-Meoqui y N-NE en el caso de Jiménez-Camargo. Ello, como ya se ha mencionado podría significar que el flujo subterráneo es preferentemente en estas direcciones, sin embargo contrario a lo que podría pensarse de cierta recarga por las sierras y cerros orientales de la zona de estudio, específicamente a la altura de la población de Saucillo y posiblemente un poco más al NE de la misma, es tal el aumento en las concentraciones de los diferentes iones que pareciera existir algún tipo de barrera semipermeable que retuviese en esa zona el flujo, propiciando el incremento considerable en iones disueltos. Esto no es posible corroborarlo por el momento, pero basta observar los diversos planos esquemáticos de las diversas configuraciones presentadas para observar éste fenómeno de incremento en contenidos.

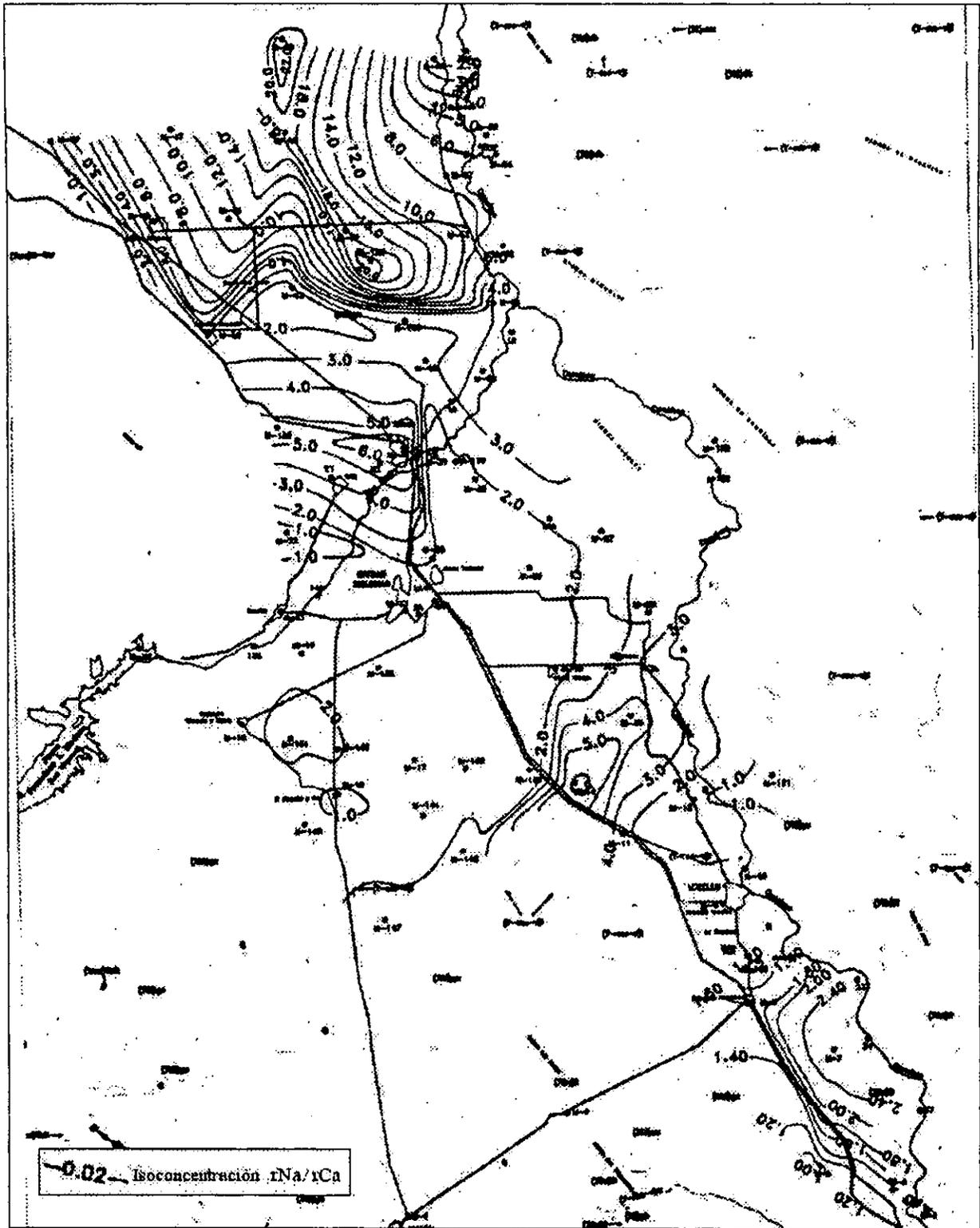


Figura 9 : Configuración de  $rNa / rCa$  en Delicias, Chihuahua

#### 5.4. Zona Sur

Al norte se ha encontrado agua muy similar a la descrita en La Cruz, es decir, francamente sulfatada, aunque aquí se observa un aumento en el contenido de iones sulfato. Este ion presenta los mayores valores al S-SE de Camargo, encontrándose concentraciones francamente altas, muy por encima de los 250 ppm permitidos por la NOM-127. A pesar de ello podría hablarse de un mismo tipo de aguas en ambas zonas, ya que no se aprecian variaciones importantes.

La evolución parece manifestarse en dirección W-E. Sin embargo se observa que la dirección de flujo se invierte, en relación a la descrita en la zona norte. En la zona de Valle de Allende y Villa López, al sur de la ciudad de Jiménez, el agua presenta características bicarbonatadas-cálcicas, predominando sobre las sulfatadas. El ion sodio parece no encontrarse en esta zona, en las proporciones anteriores. Así pues podría decirse que aquí el flujo va en dirección N-NE, invirtiéndose la tendencia que se había venido comentando en la zona norte.

La evolución se presenta similar a la que se comentó con anterioridad, en dirección hacia Jiménez y posteriormente hacia Camargo. Sin embargo en esta zona el catión predominante es el Ca, y el Na se encuentra en mucho menor proporción. De hecho como característica mayoritaria se trata de aguas sulfatadas-cálcicas. Este hecho refleja la casi ausencia de horizontes arcillosos por lo que no se propicia el intercambio catiónico. Además se encuentra de acuerdo con la circulación de agua por las arenas y gravas

terciarias de la zona, que presentan formaciones yesíferas, que aportan los iones sulfato y calcio.

En la zona de San Francisco de Conchos, al W de Camargo, existe agua mixta, aunque mayoritariamente bicarbonatada, que va cambiando a sulfatada, siempre cálcica, en dirección E, seguramente por atravesar el mismo tipo de horizonte evaporítico, y sin presencia de arcillas.

Como resumen y en función exclusivamente de los datos geoquímicos puede suponerse que las zonas que podrían denominarse como de entrada de agua al sistema, además del agua de lluvia, son al norte, por el lado de Aldama y posiblemente desde Tabalaopa, en dirección hacia Julimes y Meoqui. Así mismo desde Rosales desde la sierra, que se encuentra al W de Meoqui hacia el E, Meoqui-Delicias.

En la zona sur el aporte parece provenir por el lado de Villa López y Valle de Allende, hacia el N-NE, Jiménez-Camargo, continuando hacia La Cruz en dirección hacia Delicias, donde aparentemente la mezcla de aguas es bastante importante. A partir de ahí el flujo se dirige en dirección E aunque probablemente se presente un cono de abatimiento en la zona de Delicias, por exceso de bombeo localizado, por lo que el flujo de toda la región estudiada tendería hacia esa zona.

Sin embargo, como ya se ha mencionado, es necesario corroborar todas estas apreciaciones con datos piezométricos que no ha sido posible establecer debido a la carencia de los datos de niveles topográficos reales en los brocales,

lo que provoca que los datos de niveles piezométricos no sean congruentes en el momento de configurarlos.

No se observan diferencias importantes en las aguas que se han muestreado, por lo que no es posible establecer que se trate de aguas de diferentes orígenes, más bien puede decirse que, como familia, se trata de agua de origen meteórico, entrando por la sierra como zona principal de recarga y que evoluciona en el valle al atravesar diversos horizontes evaporíticos y arcillosos.

En la Figura 9, Figura 10 y Figura 11 , además de la representación de los diagramas de Stiff modificados, se esquematiza la distribución de las aguas sulfatadas y bicarbonatadas en toda la zona de estudio. En ellos se aprecia claramente la predominancia de aguas sulfatadas en las zonas centrales de los valles y la presencia de aguas bicarbonatadas tan solo en las estribaciones de las sierras y cerros. Se reporta en la estratigrafía la presencia de yesos en formaciones del Cretácico Superior que afloran en la zona de Camargo y La Boquilla. Además de encontrarse también asociadas en zonas con afloramiento de derrames andesíticos del Terciario Inferior, también reportados en la zona de Camargo y La Laguna. De hecho en esta zona de Camargo es donde se tiene las aguas con contenidos de sulfatos más altos, superando los 3000 ppm, siendo aguas muy mineralizadas.

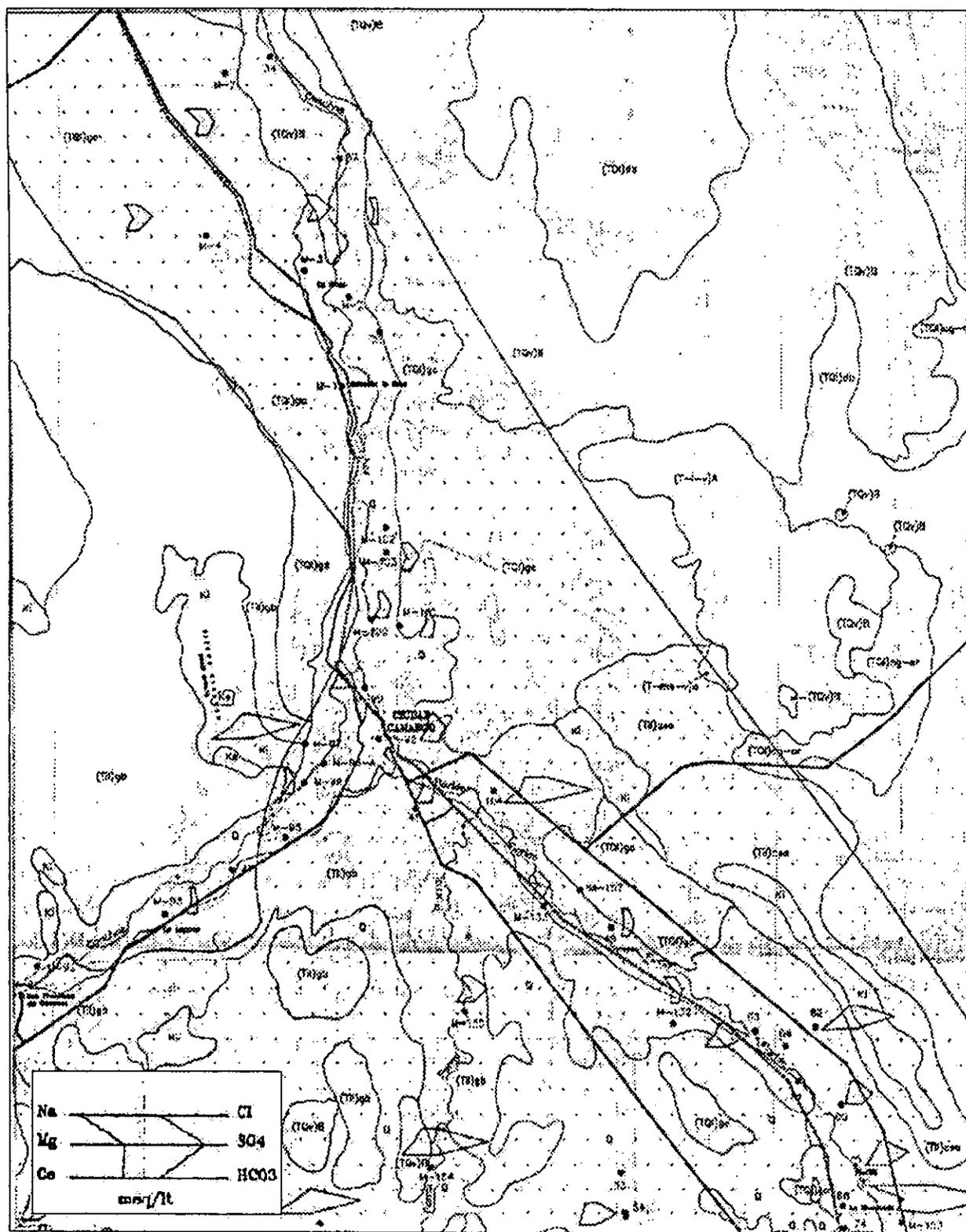


Figura 10 : Diagramas de Stiff Modificado, Camargo

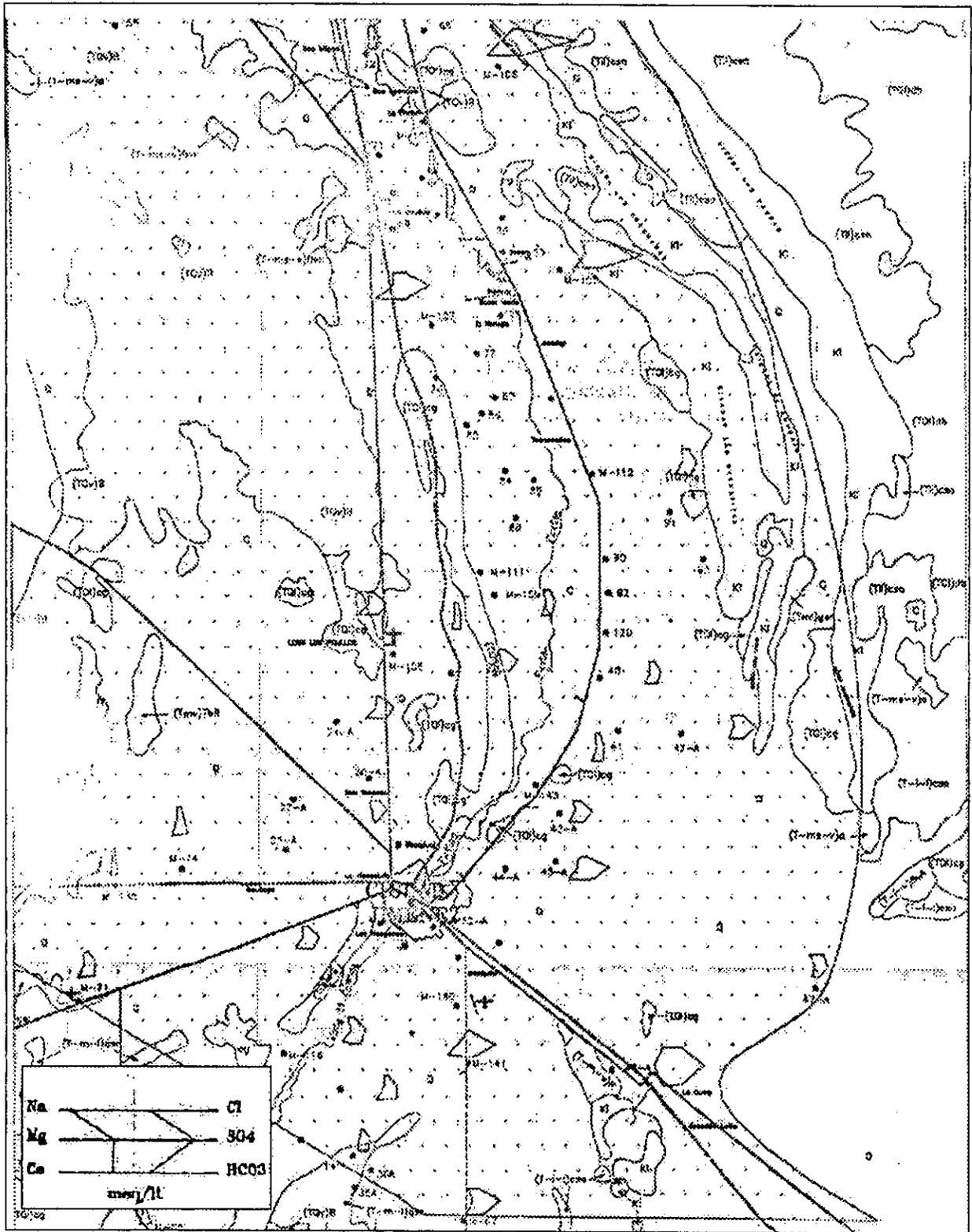


Figura 11 : Diagramas de Stiff Modificado, Jiménez

5.4.1. Configuración  $rNa/rCa$

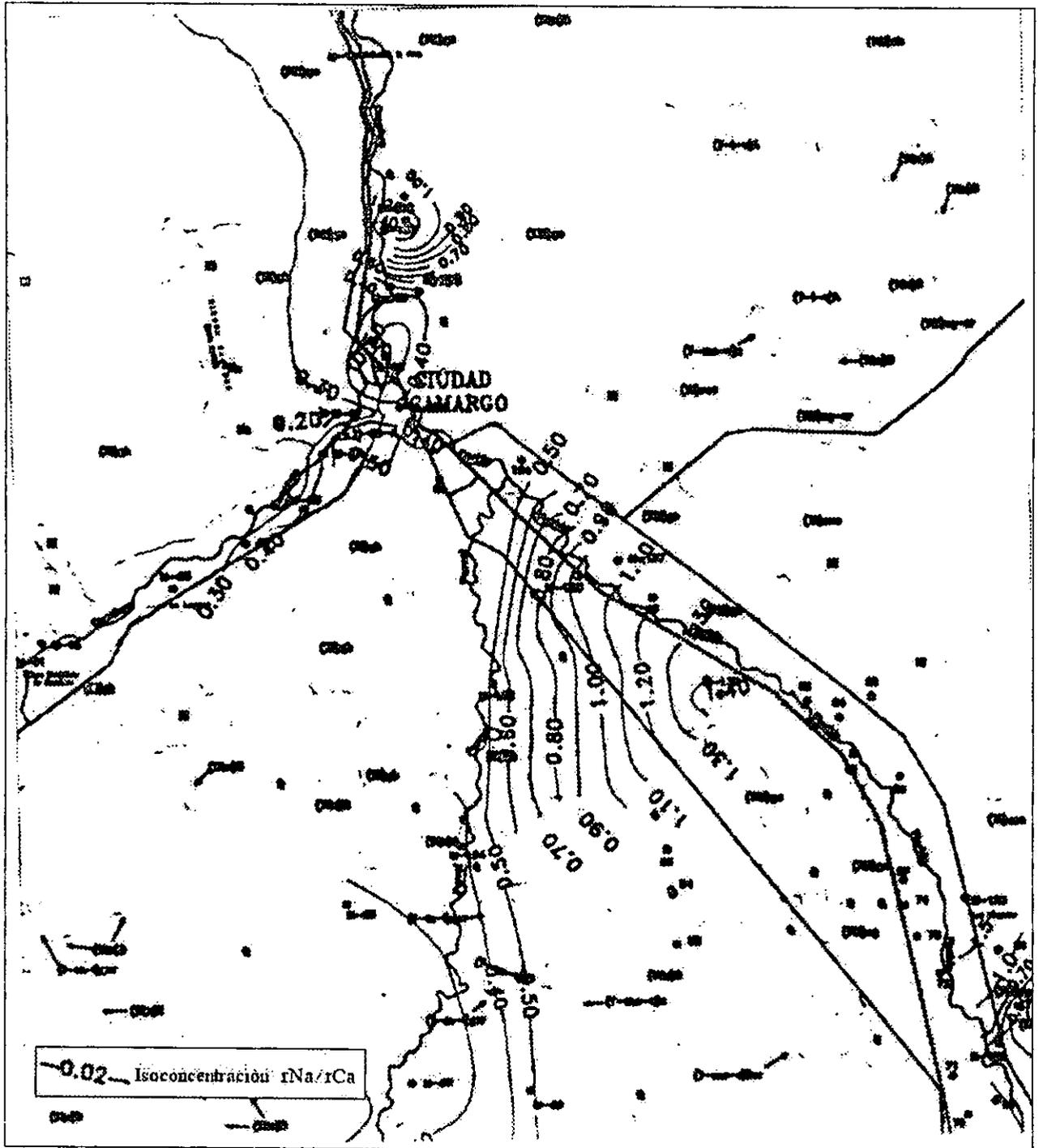


Figura 12 : Configuración de  $rNa / rCa$ , Camargo

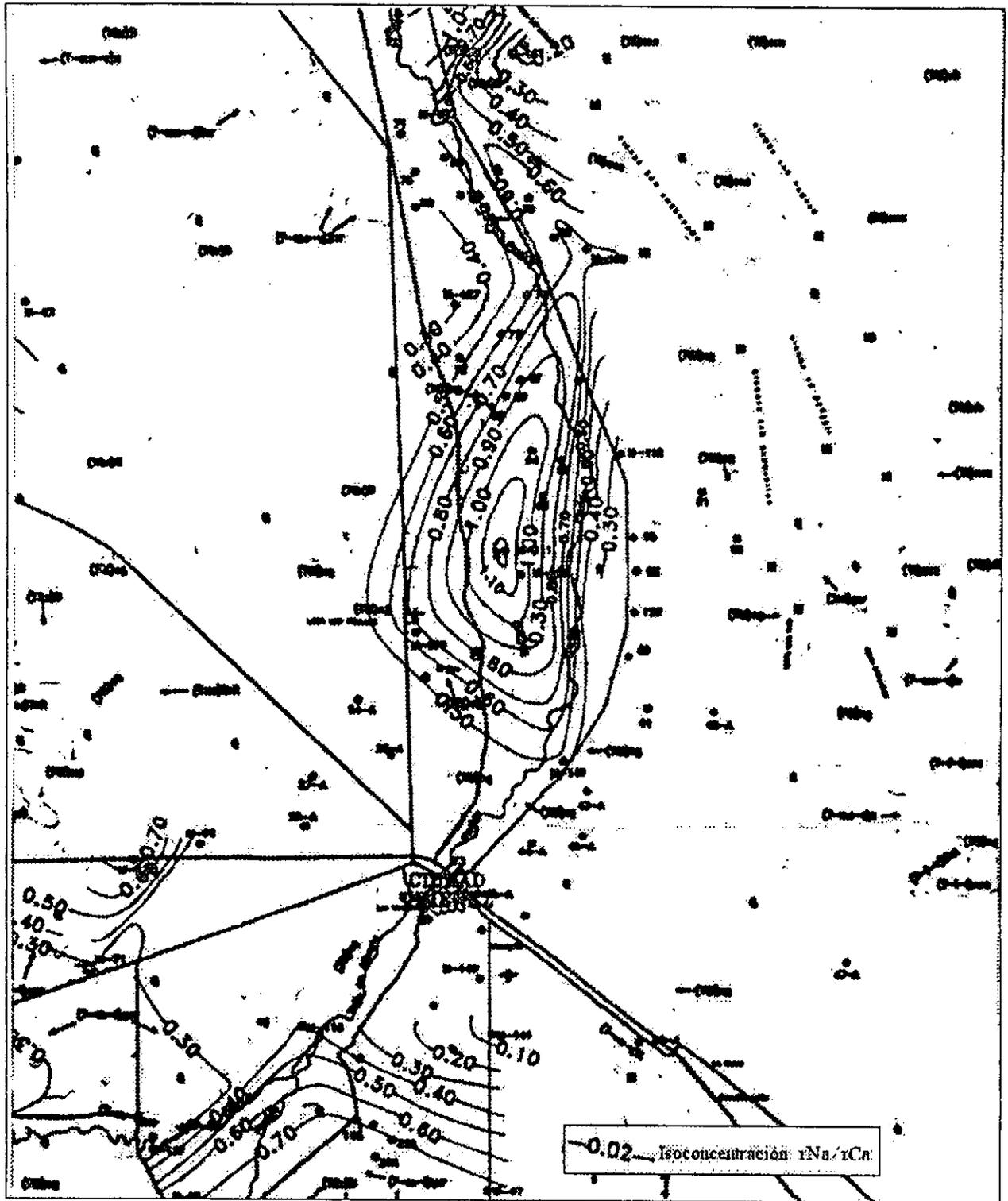


Figura 13 : Configuración de  $rNa / rCa$ , Jiménez

Se ha realizado igualmente la configuración de la relación entre los iones Na y los Ca. En la Figura 12 y Figura 13 se observa como, al contrario que en la zona norte, la zona sur presenta valores de esta relación al sur de Jiménez inferiores a 1 con lo que se ve que el catión que predomina es el Ca. Estos valores de la relación continúan hacia el norte pero poco a poco van aumentando, es decir, se va enriqueciendo en Na el agua subterránea.

Probablemente en función de la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , así como de un proceso de intercambio de bases. Al sureste de Camargo la relación alcanza los mayores valores, mismos que también aumentan en dirección N, hacia la zona de Saucillo, en la zona norte. Como se observa en este plano se trata de aguas predominantemente cálcicas.

Esto mismo se observa en el diagrama de Piper (Figura 14), donde se aprecia que se trata de aguas cálcicas.

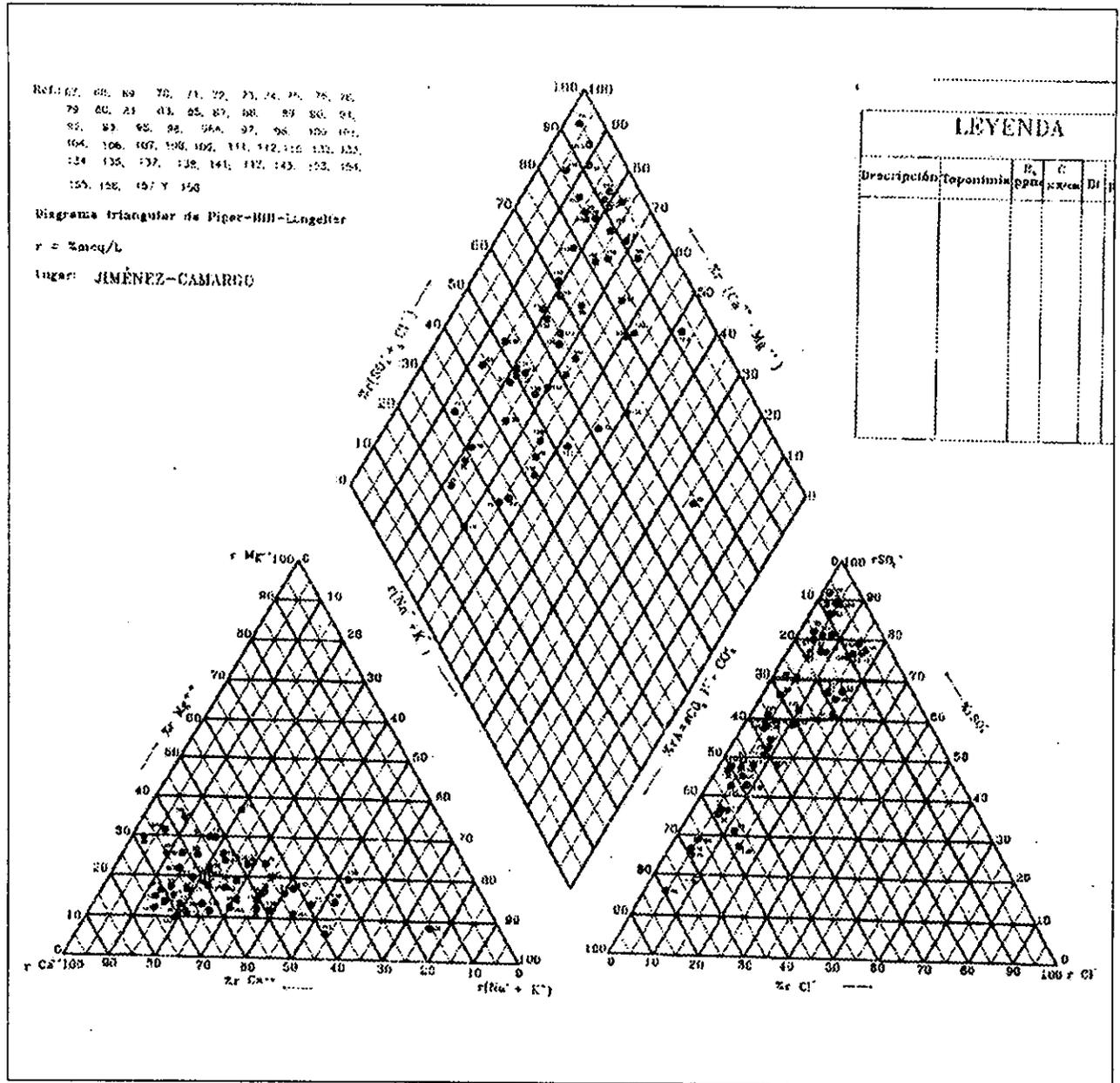


Figura 14 : Diagrama de Piper-Hill-Langelier, para las aguas subterráneas de la zona acuífera Jiménez Camargo

Por otra parte en la Figura 15 se presenta la esquematización de la evolución de los iones predominantes en toda la zona de estudio; posiblemente esta evolución concuerde con la dirección de flujo preferente en cada una de las zonas acuíferas. Se ve como el cambio iónico apreciable en la zona norte

va de aguas bicarbonatadas cálcicas, al NW y W de Meoqui y Delicias, adquiriendo en dirección NW-SE iones sulfato y sodio, hasta llegarse a encontrar, más o menos a la altura de Saucillo, aguas sulfatadas sódicas. En el caso de la zona sur la evolución se aprecia al revés, en dirección S-SE hacia N-NW, sin llegar a ser claramente sulfatadas sino hasta Camargo, al E. Siguiendo esta dirección hacia el N-NW se aprecian ya aguas francamente sulfatadas con predominancia del ion Na, hasta llegar, nuevamente a la altura de Saucillo, donde parecieran converger ambos sistemas. Hace falta mayor información y tratamiento de datos para poder tener una mejor interpretación de esto.

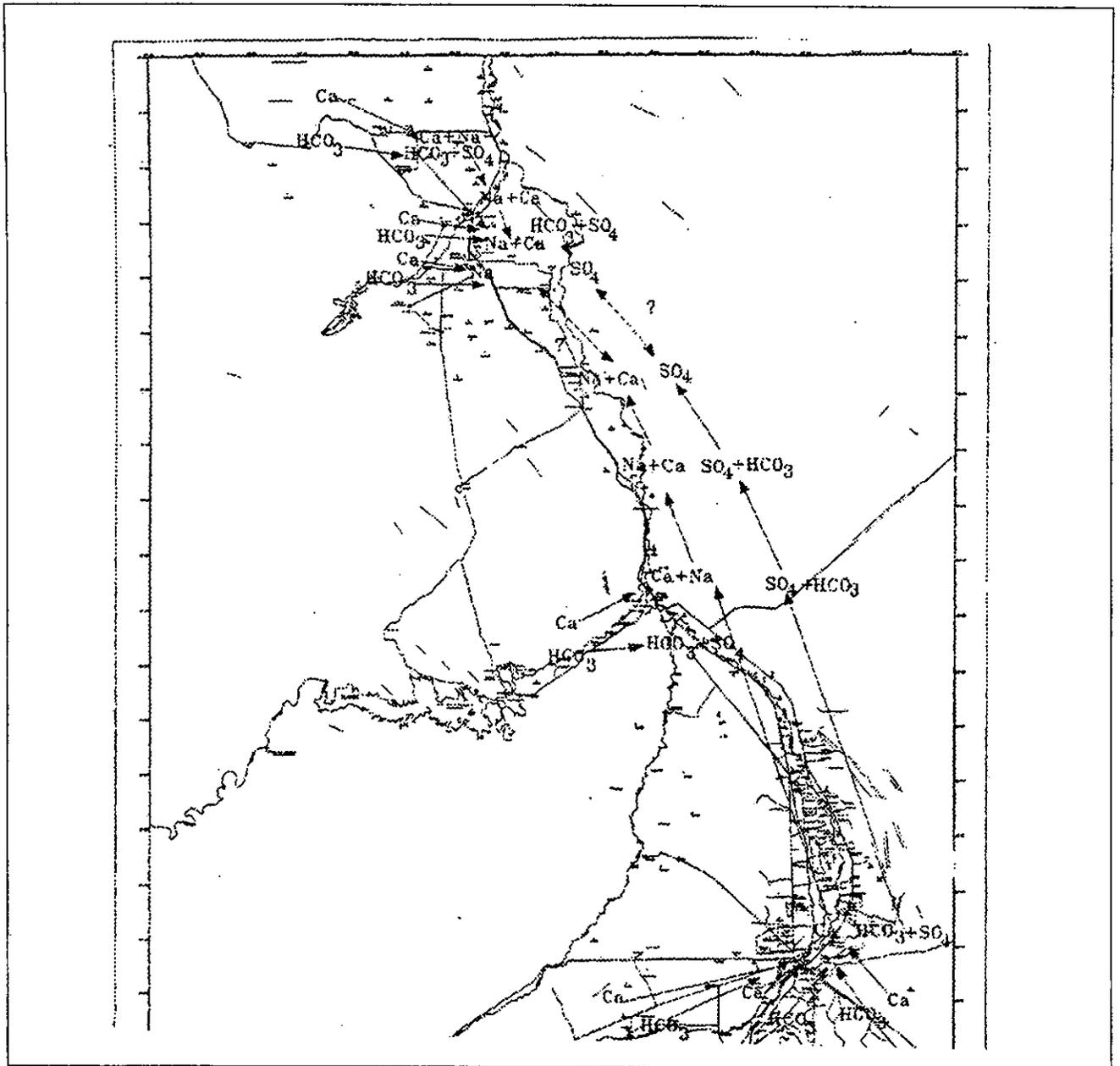


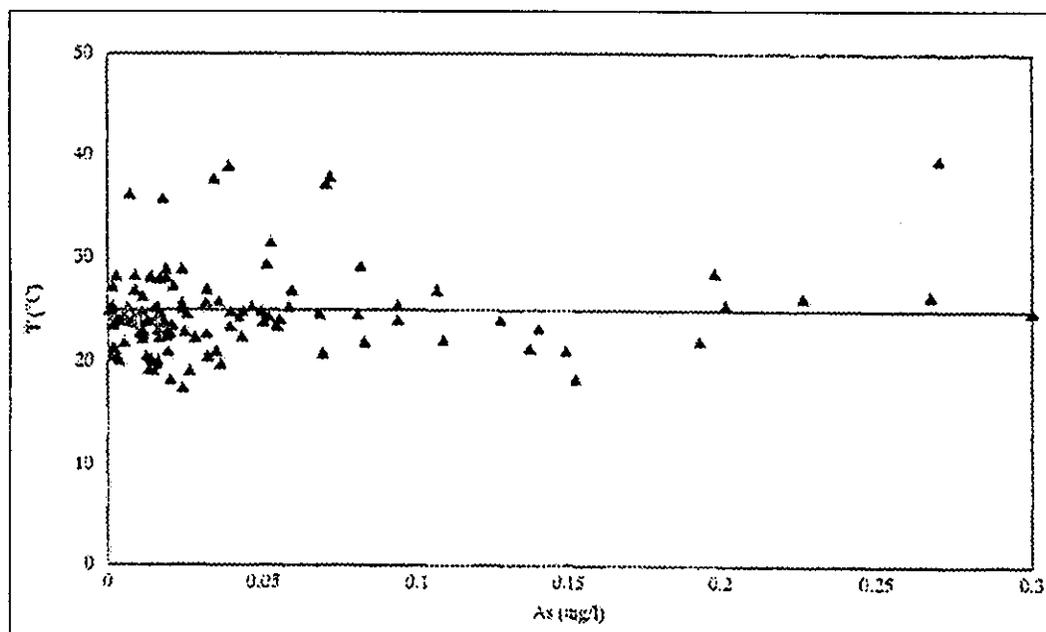
Figura 15 : Evolución de los iones predominantes en toda la zona de estudio

### 5.5. Interpretación gráfica.

Para poder encontrar las relaciones existentes se han realizado diagramas del tipo X, Y, representando algunos de los parámetros que se han analizado.

5.5.1. Gráficas de arsénico vs. otros parámetros.

- Temperatura



**Gráfica 2 : Relación entre el contenido de As (mg/l) y la T (°C)**

En esta gráfica se han representado los valores del contenido de arsénico (As mg/L), contra los valores de temperatura (T °C), encontrados en campo. Como se observa en la gráfica, no existe una correlación clara y definitiva entre los valores altos de As y valores altos de T, como tampoco se observa correlación a la inversa. De hecho hasta ahora los estudios realizados en otras zonas con características similares, siempre han mencionado la correlación entre T altas y As alto sin embargo en esta caso no ha sido posible establecer de ninguna forma esta correlación.

Tomando una temperatura media de 25 °C, (la mínima encontrada está alrededor de los 17°C mientras que la máxima no alcanza los 40°C), de 33 muestras que se encuentran sobrepasando la NOM-127 en cuanto al contenido de As, 19 de ellas se encuentran por debajo de los 25 °C mientras que 14 lo hacen por arriba de este valor.

Más o menos la misma proporción se ha encontrado en las aguas que se encuentran por debajo de la NOM-127 en contenido de As. Con estos resultados no es posible establecer una relación directa entre la T y el contenido de As.

Importante de mencionar es el hecho que, a pesar de que no ha sido posible conocer las características constructivas de los pozos muestreados ni su profundidad real, es de suponerse que, como en la mayoría de los pozos del país, estos se encuentran ranurados desde la profundidad del nivel hasta el fondo, sin discriminar zonas productoras o no, es decir, sin haber realizado un correcto diseño de terminación del pozo, por lo que la mezcla de aguas de diferentes horizontes es total, y resulta imposible diferenciar entre aguas de mayor o menor temperatura, o de mejor o peor calidad en profundidad. Por lo tanto este tipo de diferencias que podrían resultar de gran utilidad interpretativa, no sirven en este caso ya que no es posible diferenciar de donde se está captando el agua y en que proporciones están aportando los distintos estratos atravesados.

Se ha manejado la posibilidad de que la parte superior acuífera, aproximadamente aquella que se encuentra en los primeros 100 m de

profundidad, presenta mejor calidad de agua que aquella que se capta a partir de los 100 m. Sin embargo y debido a las razones ya expuestas no es posible afirmar esto ya que el agua captada y analizada es una mezcla de proporciones desconocidas de ambas profundidades.

Por esta misma razón, y aunado al hecho de que la piezometría no ha sido posible de establecer, la confirmación de varios horizontes acuíferos en profundidad resulta difícil de hacerse.

En la Figura 16, Figura 17 y Figura 18 se presentan las configuraciones de las temperaturas en ambas zonas acuíferas. En la zona norte (a) se encuentran temperaturas alrededor de los 35°C al NE de Meoqui, en San Diego de Alcalá, también se alcanza este valor precisamente en los alrededores de Meoqui y al SE de Delicias, al W de Saucillo. En términos generales no se aprecia alguna característica importante que destaque. En el caso de la zona sur (b) se aprecian áreas con temperaturas superiores, alrededor de los 38°C en Camargo y hacia el sur de esta misma ciudad. El resto de la zona presenta temperaturas entre los 22 y los 28°C, que en principio no parecen ser anormales. Sin embargo no hay que olvidar lo mencionado anteriormente sobre la construcción de los pozos que se han estudiado.

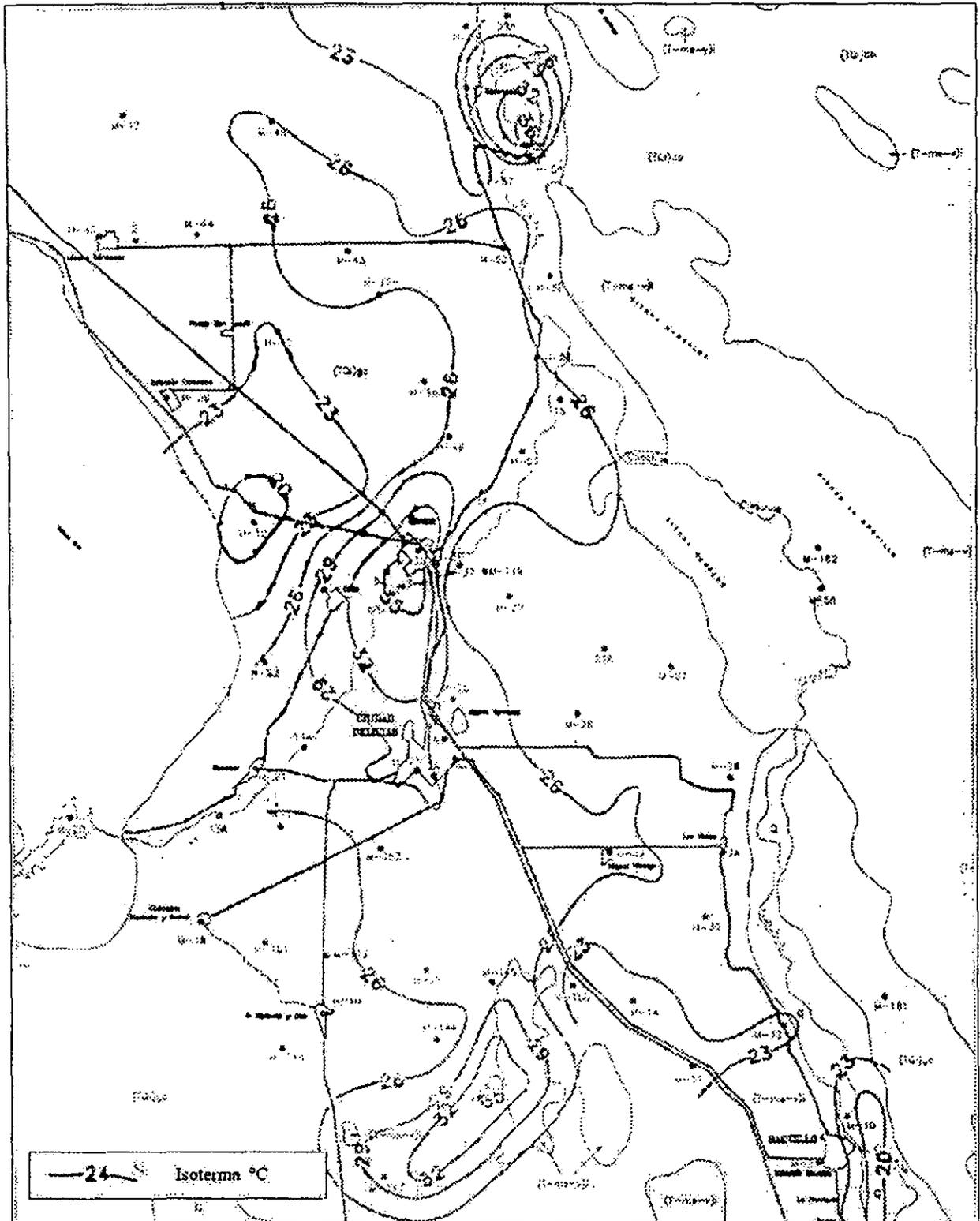


Figura 16 : Configuración de la temperatura en Delicias, Chihuahua

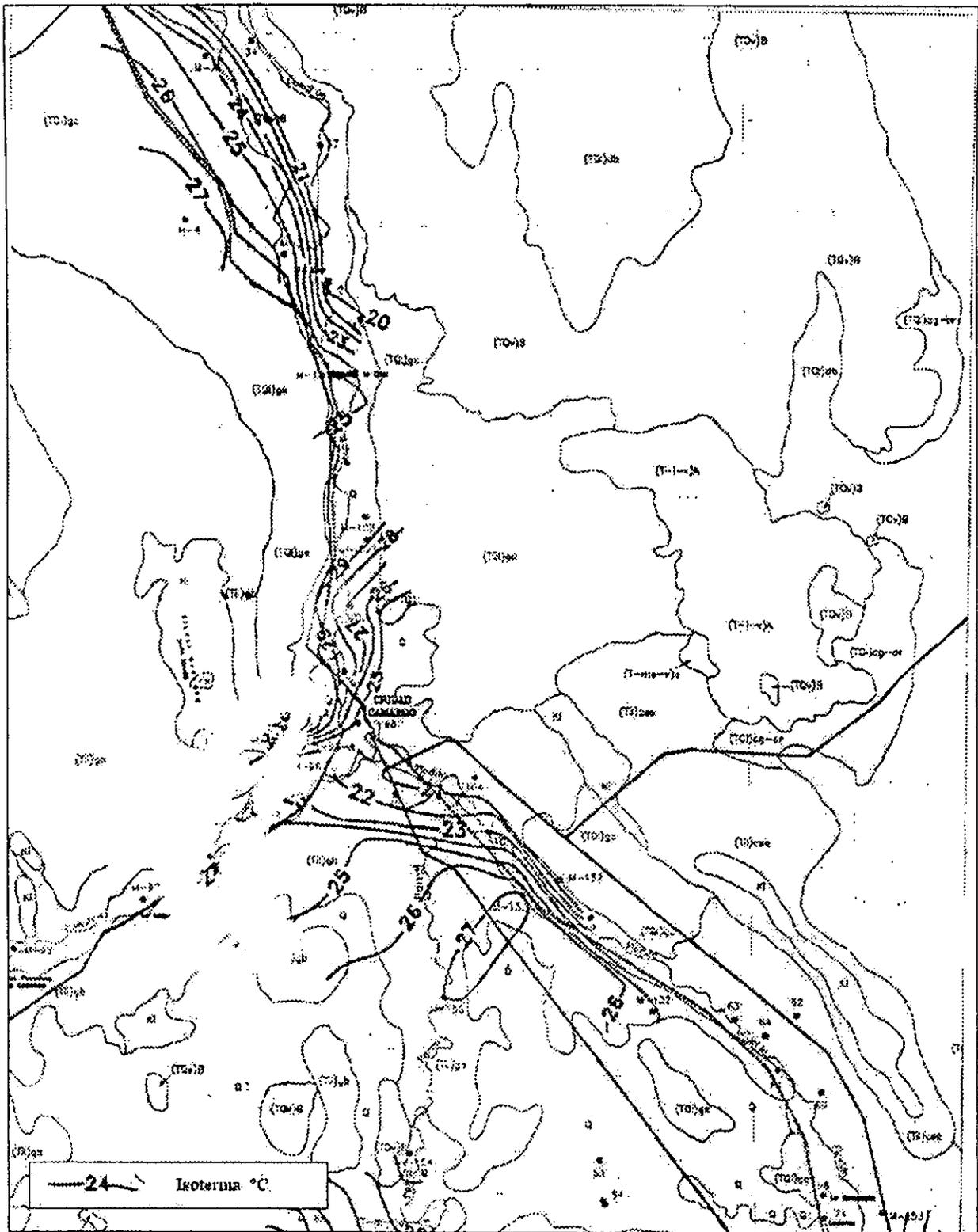


Figura 17 : Configuración de la temperatura en Camargo

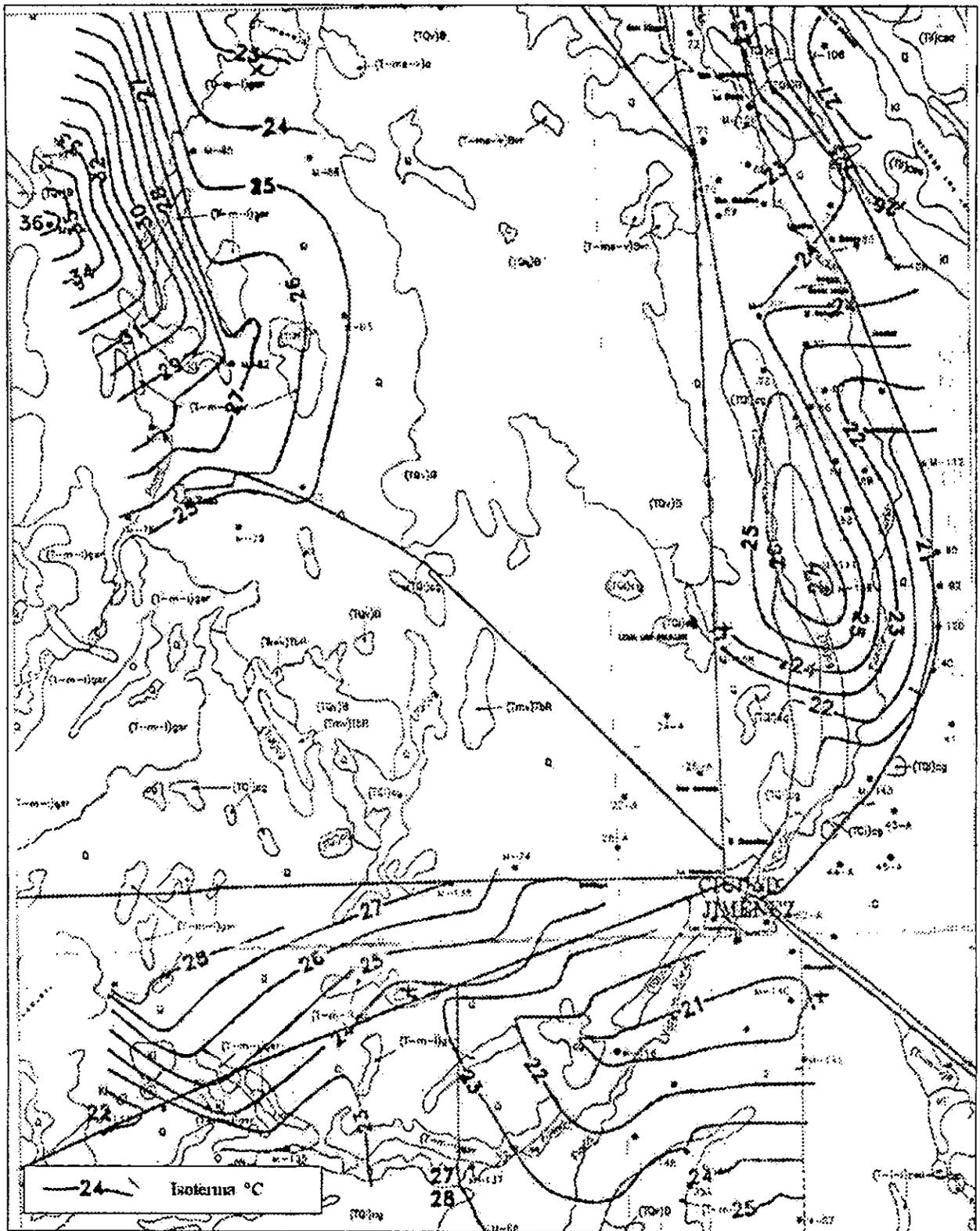
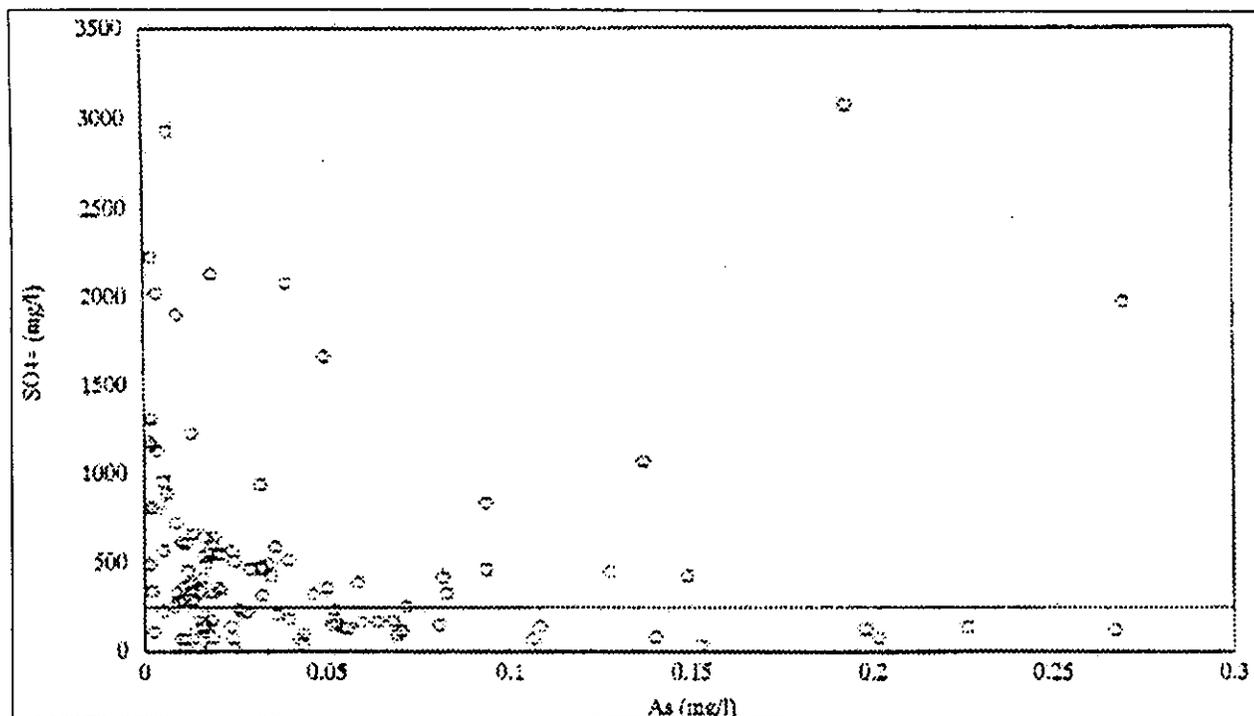


Figura 18 : Configuración de la temperatura en Jiménez

• Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )



**Gráfica 3 : Relación entre el contenido de As (mg /L) y el contenido de  $\text{SO}_4$  (mg /L)**

En la gráfica en donde se relaciona el As con el  $\text{SO}_4^{2-}$  tampoco es posible establecer ninguna correspondencia entre ambos parámetros. Lo único que si queda a la vista es que la mayoría de los pozos muestreados tienen concentraciones de sulfatos superiores a la NOM-127 (250 ppm) para uso de agua potable.

En concentraciones moderadamente altas el sulfato en el agua puede ser laxante. La norma para agua potable es de 250 ppm, sin embargo aún son aceptables concentraciones de hasta 500 ppm. Las aguas que exceden dicha concentración pueden tener sabor desagradable y provocar irritación gastrointestinal.

Por otro lado el sulfato de calcio puede llegar a formar una dura costra en tuberías, condensadores y calderas, además que el sulfato corroe el concreto.

Durante el presente trabajo se ha comentado bastante sobre la presencia de los iones sulfato a lo largo del área de estudio, por lo que ahora no se abundará más sobre ello, sin embargo se presentan en la Figura 19, Figura 20 y Figura 21 las configuraciones de contenido de sulfato. En términos generales se puede observar que prácticamente en toda la zona de estudio el contenido en iones sulfato supera ampliamente el límite máximo permisible por la NOM-127 para uso potable.

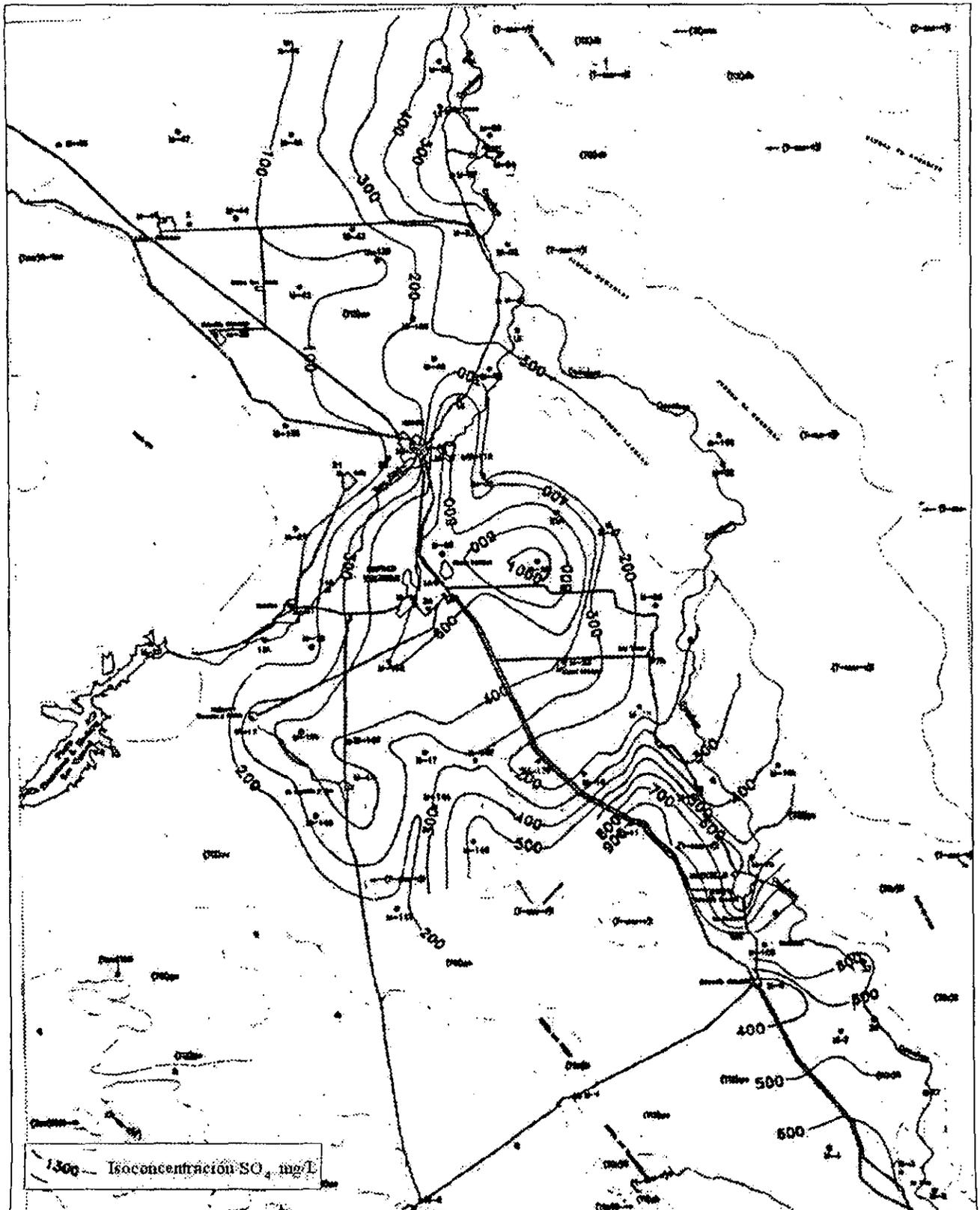


Figura 19 : Configuración de  $SO_4$  en Delicias, Chihuahua

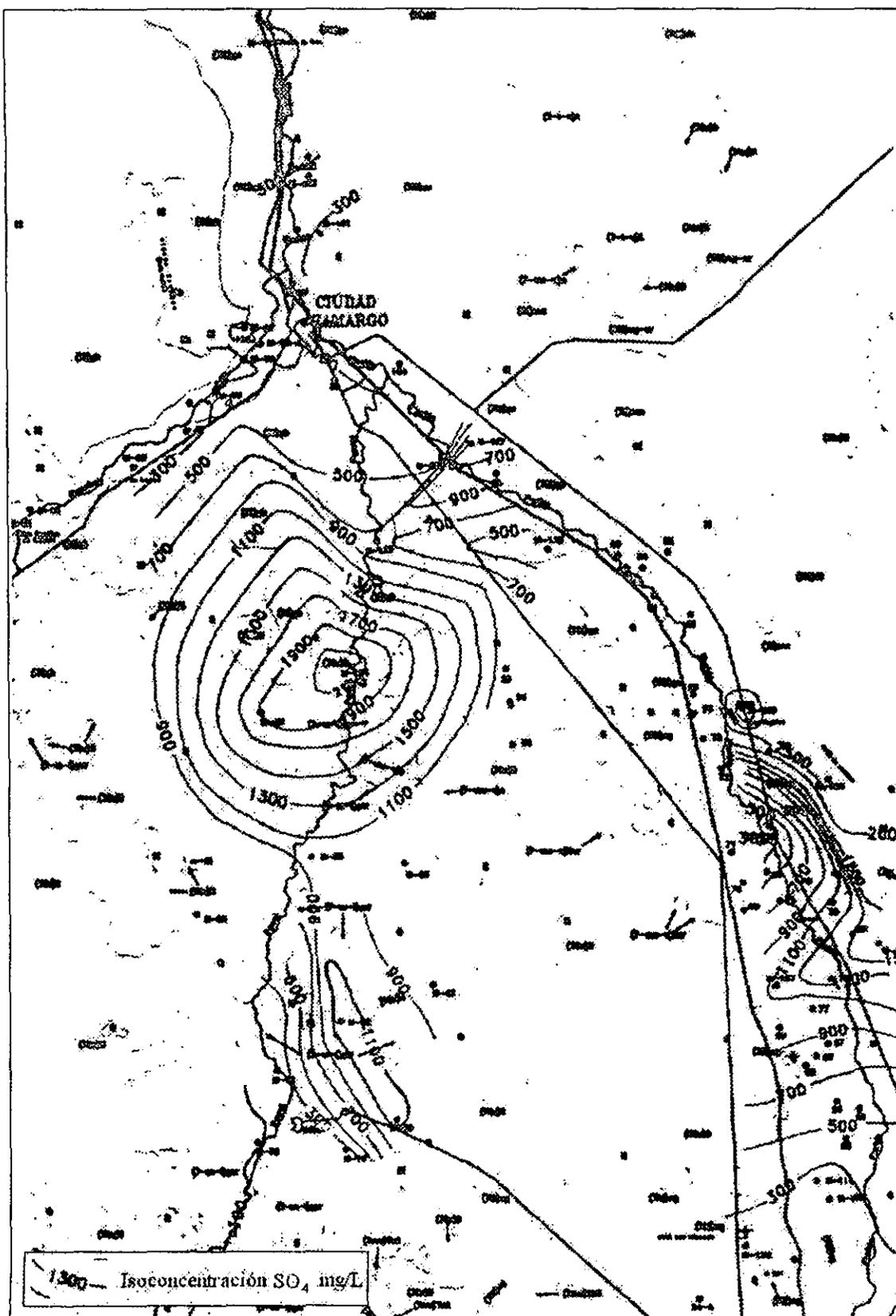


Figura 20 : Configuración de  $SO_4$  en Camargo

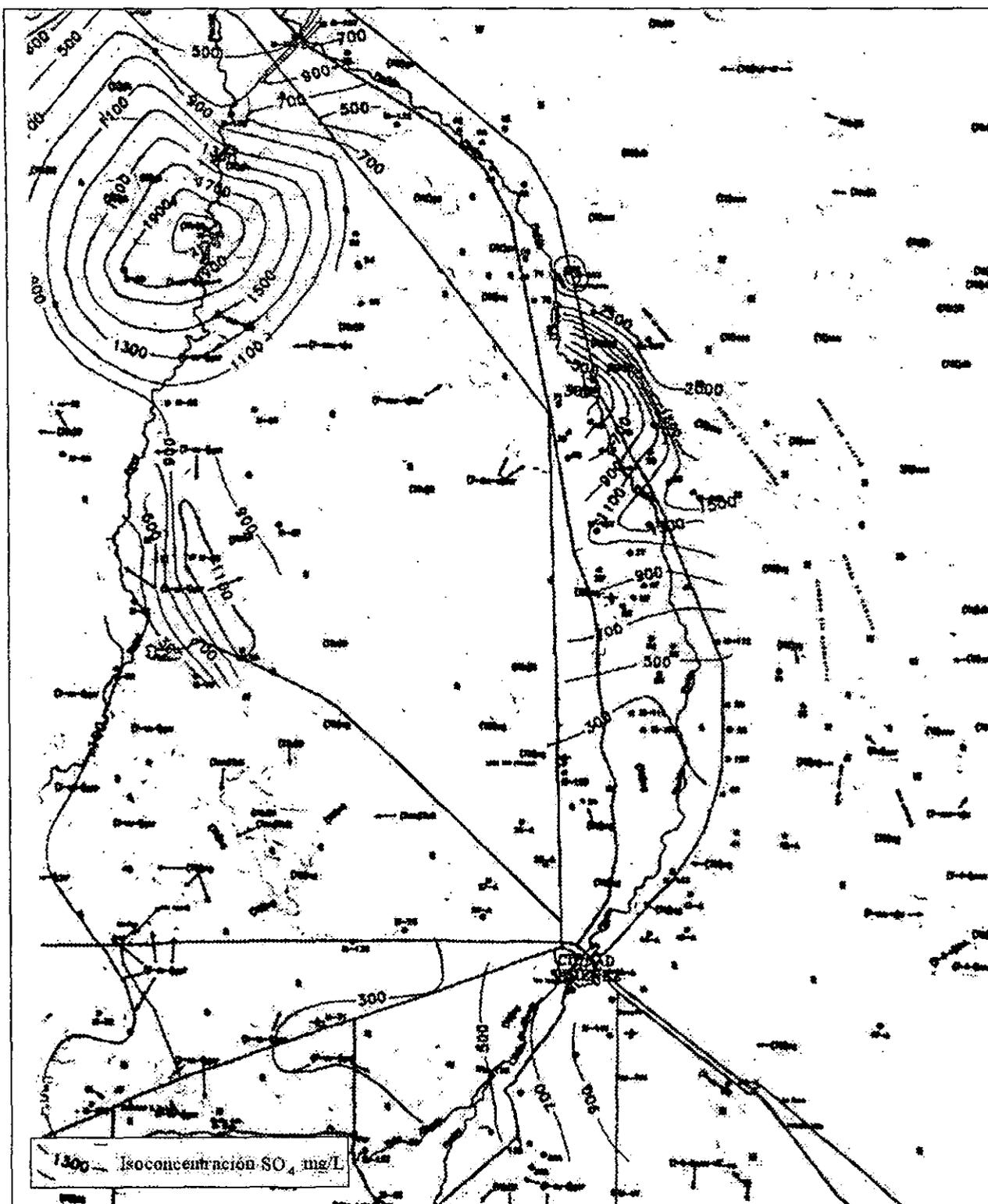
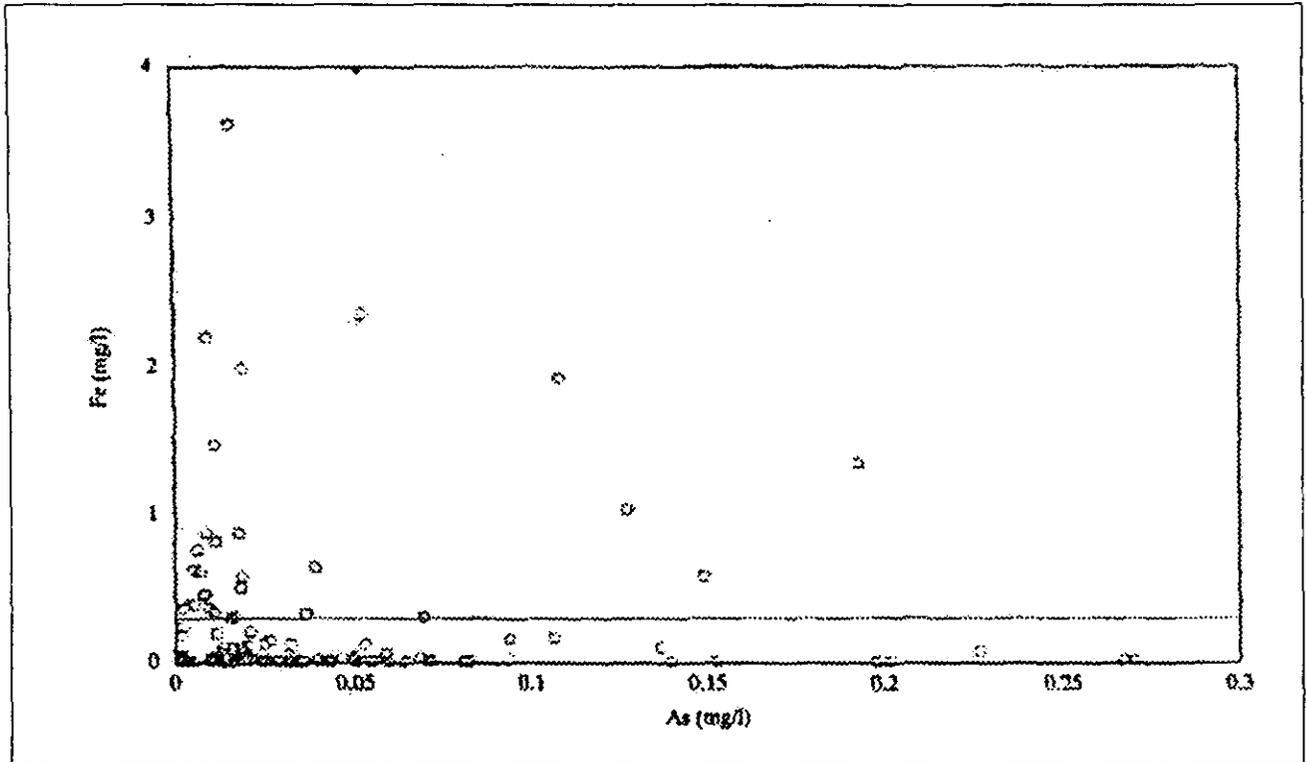


Figura 21 : Configuración de  $\text{SO}_4$  en Jiménez

• Fe

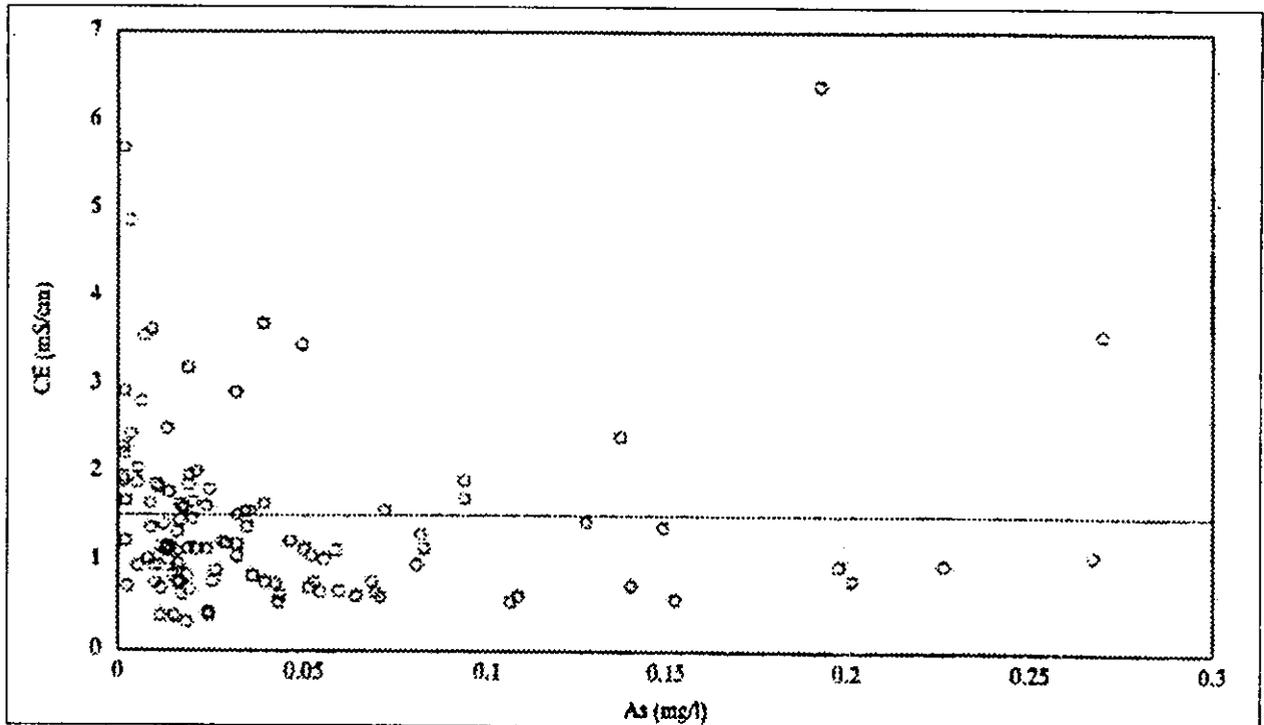


Gráfica 4 : Relación entre el contenido de As (mg/L) y el contenido de Fe (mg/L)

En este caso en particular parece que el número de muestras que se encuentran por encima del valor máximo permitido para Fe por la NOM-127 (0.3 ppm) y al mismo tiempo superando la NOM-127 de As es mínimo (5 puntos). Sin embargo, tampoco es posible establecer que si el Fe se encuentra en concentraciones altas el As se encuentre en concentraciones bajas o a la inversa. Lo que si podría ser es que, como se ha mencionado anteriormente en el apartado de oxido-reducción , es que, al encontrarse el Fe disuelto (medio reductor) posiblemente el estado de oxidación en que se encuentre el As sea +3, que resulta ser el más tóxico. Aunque tampoco puede tomarse como verdad indiscutible puesto que no se conoce a ciencia cierta el estado del medio.

Sin embargo, para el caso en que el agua tenga que ser tratada en una planta de tratamiento, es imprescindible conocer el contenido de Fe disuelto para poder establecer las condiciones de operación de la misma.

- Conductividad Eléctrica



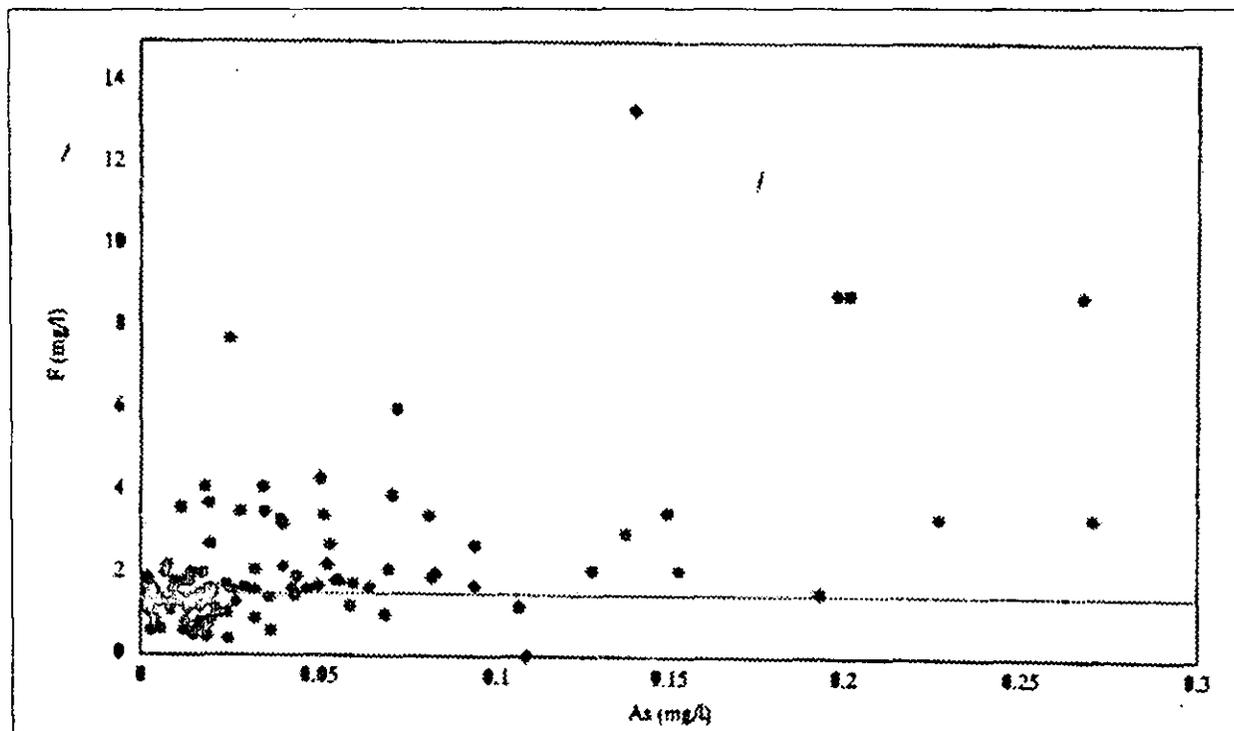
**Gráfica 5 : Relación entre el contenido de As / mg/L y la C.E. (mS/cm)**

La relación que se observa en este caso es que en aquellos puntos en que se rebasa la NOM-127 en cuanto al contenido de As, la conductividad eléctrica (CE mS/cm) no es muy alta. Tan sólo 5 puntos están por encima de los 2000 mS/cm.

Por otro lado y ya no en base al contenido de As, gran parte de las muestras presentan conductividades superiores a los 2000 mS/cm , incluso en algún caso alcanzando más de 6000 mS/cm, lo que las clasifica como aguas que

van de dulces a salobres, pero sin que se pueda relacionar la presencia de As con esta condición.

- Flúor



Gráfica 6 : Relación entre el contenido de As (mg / L) y el contenido de F (mg/L)

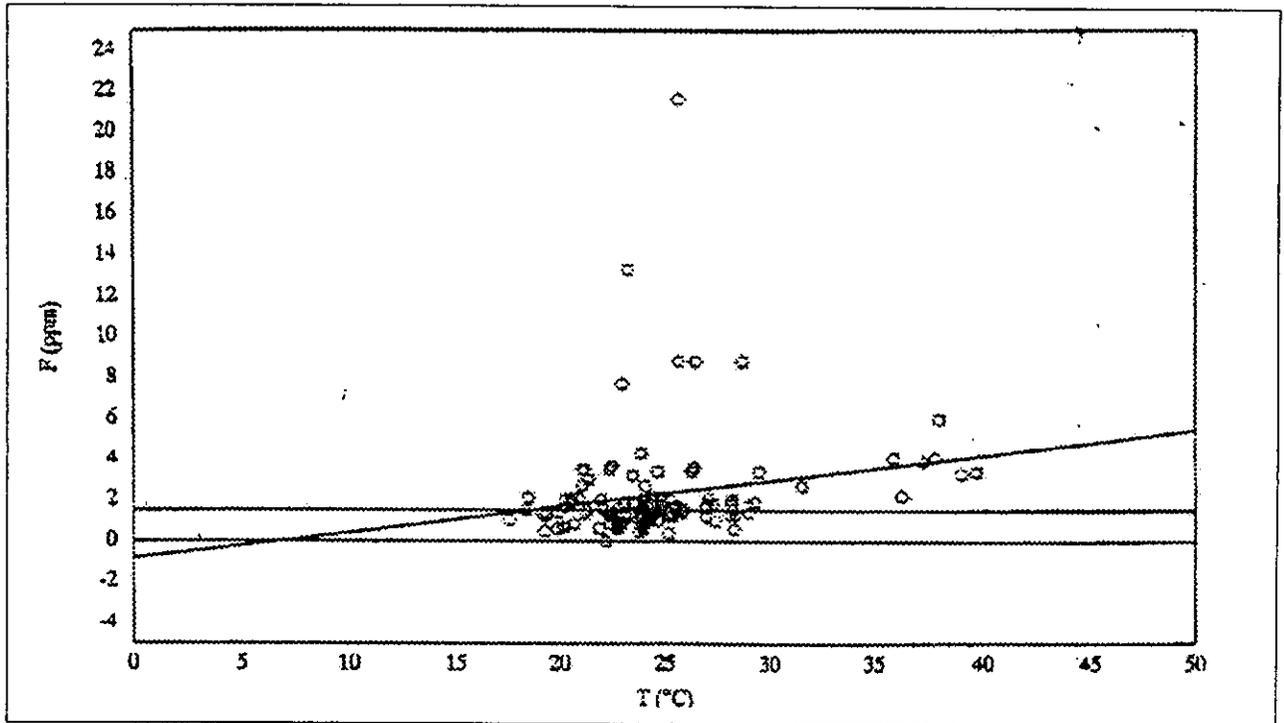
Al contrario que en los casos mencionados con anterioridad, en esta gráfica parece observarse cierta tendencia en el sentido de que prácticamente todas las muestras que se encuentran superando la NOM-127 de As superan también la NOM-127 en contenido de flúor (F, 1.5 ppm).

También parece presentarse que cuando no se supera la NOM-127 de As tampoco se supera la NOM-127 de F, la densidad de puntos que presentan esta situación es bastante alta, por lo que puede decirse que cuando el agua se encuentra con concentraciones de F por debajo de la NOM-127 lo más

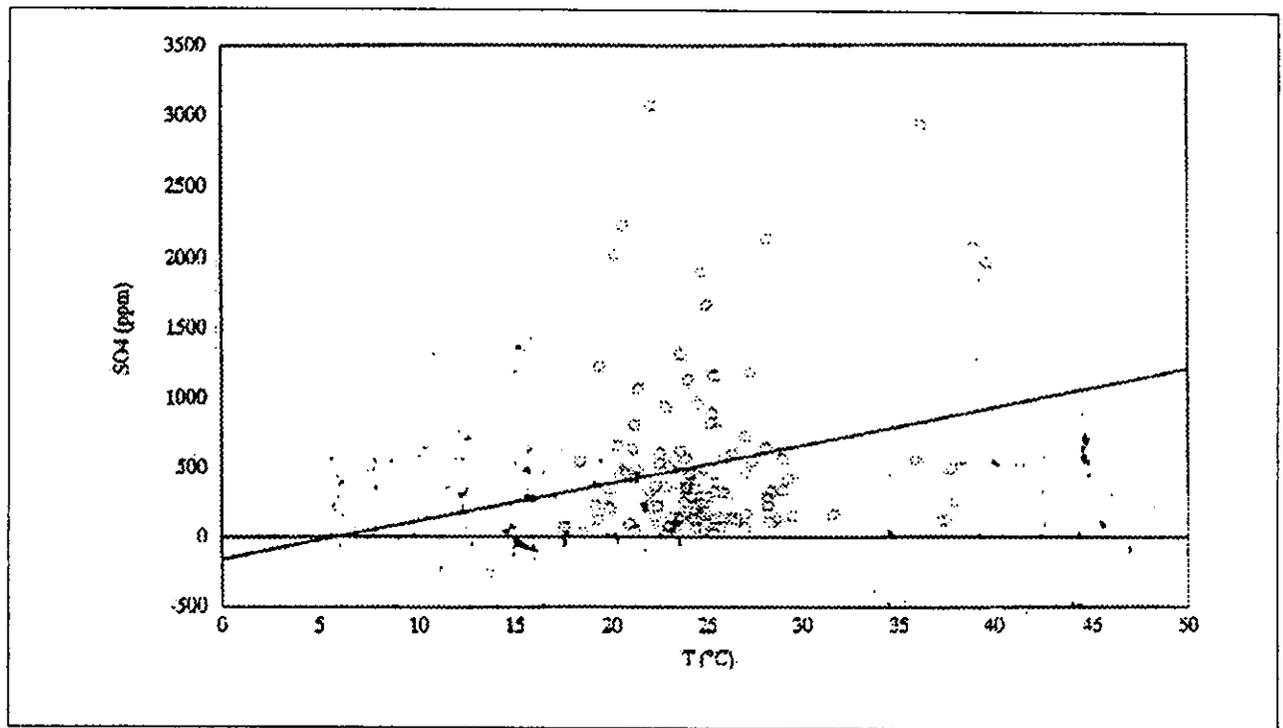
probable es que presente concentraciones de As por debajo de la NOM-127 , y difícilmente, si no contiene F, contendrá As, aunque como se observa puede contener F y no contener As por encima de la NOM-127.

Dentro de las gráficas que se han presentado esta es la que cobra mayor importancia, pues valdría la pena profundizar más en este fenómeno observado. Ello será posible con los resultados de futuros muestreos que se lleven a cabo, con lo cual será posible corroborar la tendencia que se ha mencionado.

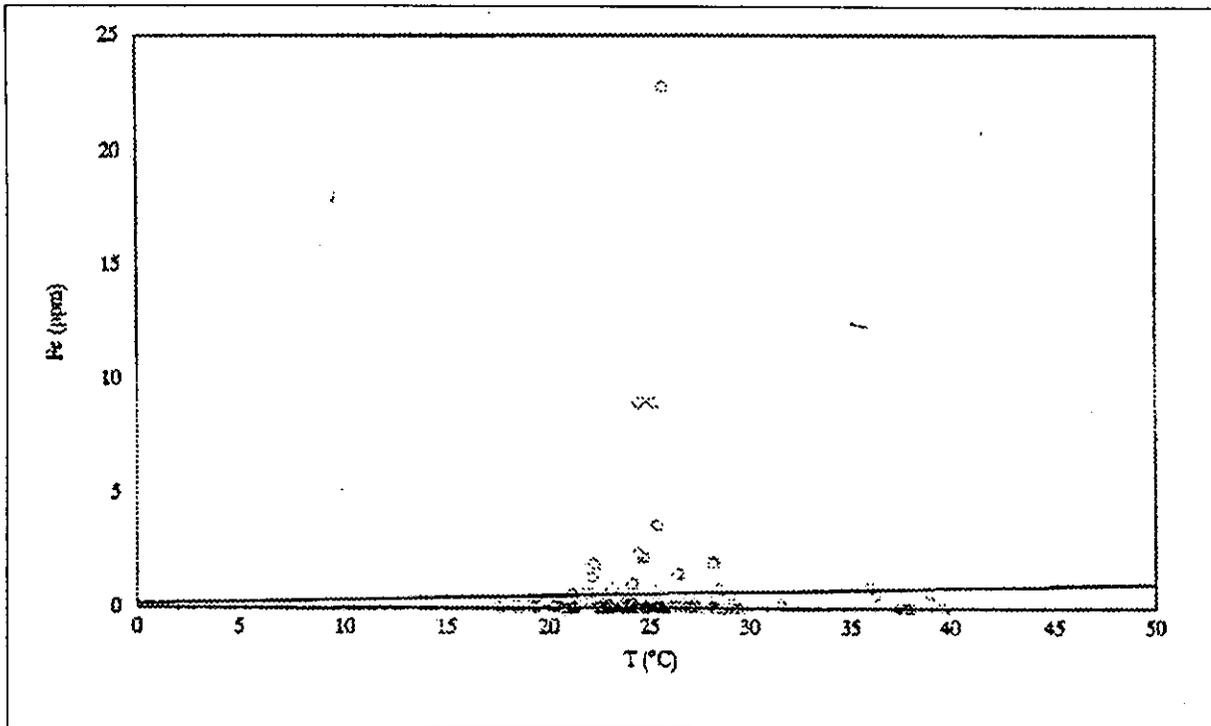
Por otra parte también se realizaron este mismo tipo de gráficas pero dejando como parámetro a comparar la temperatura. Sin embargo tampoco se ha observado ninguna tendencia en las mismas (Gráfica 7, Gráfica 8, Gráfica 9). Esto se debe a la situación mencionada del mal diseño de los pozos. Si se tuviera un correcto diseño de pozos y fuese posible conocer la profundidad a la cual se está realmente captando cada uno de los horizontes productores, el comportamiento de la temperatura (Figura 16, Figura 17 y Figura 18) sería una importante herramienta interpretativa como dato geotérmico.



Gráfica 7 : Relación de la Temperatura (°C) y el Flúor (mg / L)



Gráfica 8 : Relación de la Temperatura (°C) y SO<sub>4</sub> (mg/L)



Gráfica 9 : Relación de la Temperatura (°C) y Fe ( mg/L)

La geotermia se refiere al calor natural de la Tierra. Este planeta es un gran reservorio de calor, ya que prácticamente todo menos la corteza está bajo altas temperaturas. Los datos que se pueden obtener en campo sobre la temperatura del agua subterránea sirven como geotermómetros, aportando información que permite establecer el gradiente geotérmico de la zona de estudio, con lo que sería posible conocer la profundidad a la que se encuentra originalmente el agua que se está captando y por lo tanto facilitaría el conocimiento de su origen y el porqué de las características que presenta.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. ANÁLISIS DE IONES MINORITARIOS Y ELEMENTOS TRAZA (As, F, Fe) EN LAS DOS CAMPAÑAS DE MUESTREO

Como el origen de este estudio fue la detección de As en las aguas de uso potable, a continuación se comentarán los resultados encontrados en los análisis practicados a 262 puntos distintos distribuidos en toda la zona de estudio.

Durante el primer muestreo realizado en Mayo de 1996, no fue analizado el flúor, aunque se analizaron otros elementos minoritarios y traza como Zn, Pb, Cd, entre otros que, al no encontrarse en ningún caso por encima de los valores máximos permisibles para el uso que se les da, no se consideró necesario volverlos a analizar en el segundo muestreo. Entre estos parámetros el único que si se encontró en repetidas ocasiones por encima de la norma fue el Fe por lo que se consideró importante su análisis nuevamente. El F se decidió anexar debido a la experiencia que se presentaba en otros sitios en los que la presencia de As estaba relacionada con la presencia de F, además de como se menciona en el apartado introductorio sobre el F, su toxicidad puede llegar a ser muy grave.

6.1.1. Distribución espacial de los iones minoritarios y elementos traza (As, F, Fe).

En este apartado se describirá la distribución que se ha encontrado de los 3 elementos mencionados en toda la zona de estudio.

- **Arsénico.**

Dentro de los elementos que se han analizado y que se encuentran por encima de la NOM-127 el que más preocupa es el As. En el apartado introductorio sobre este elemento se hace referencia a los efectos que pueden presentarse por un consumo prolongado de agua con concentraciones elevadas del mismo, por lo que no se hará referencia a ello en este punto y tan solo se describirá como se encuentra distribuido.

Al igual que en el párrafo de iones mayoritarios se hará referencia a la zona norte cuando se trate del acuífero de Delicias-Meoqui y a la zona sur cuando se haga referencia al acuífero de Jiménez-Camargo.

En la zona norte es donde se ha encontrado que las concentraciones de As son las más altas y su incidencia es mayor. Específicamente en los municipios de Julimes y Aldama.

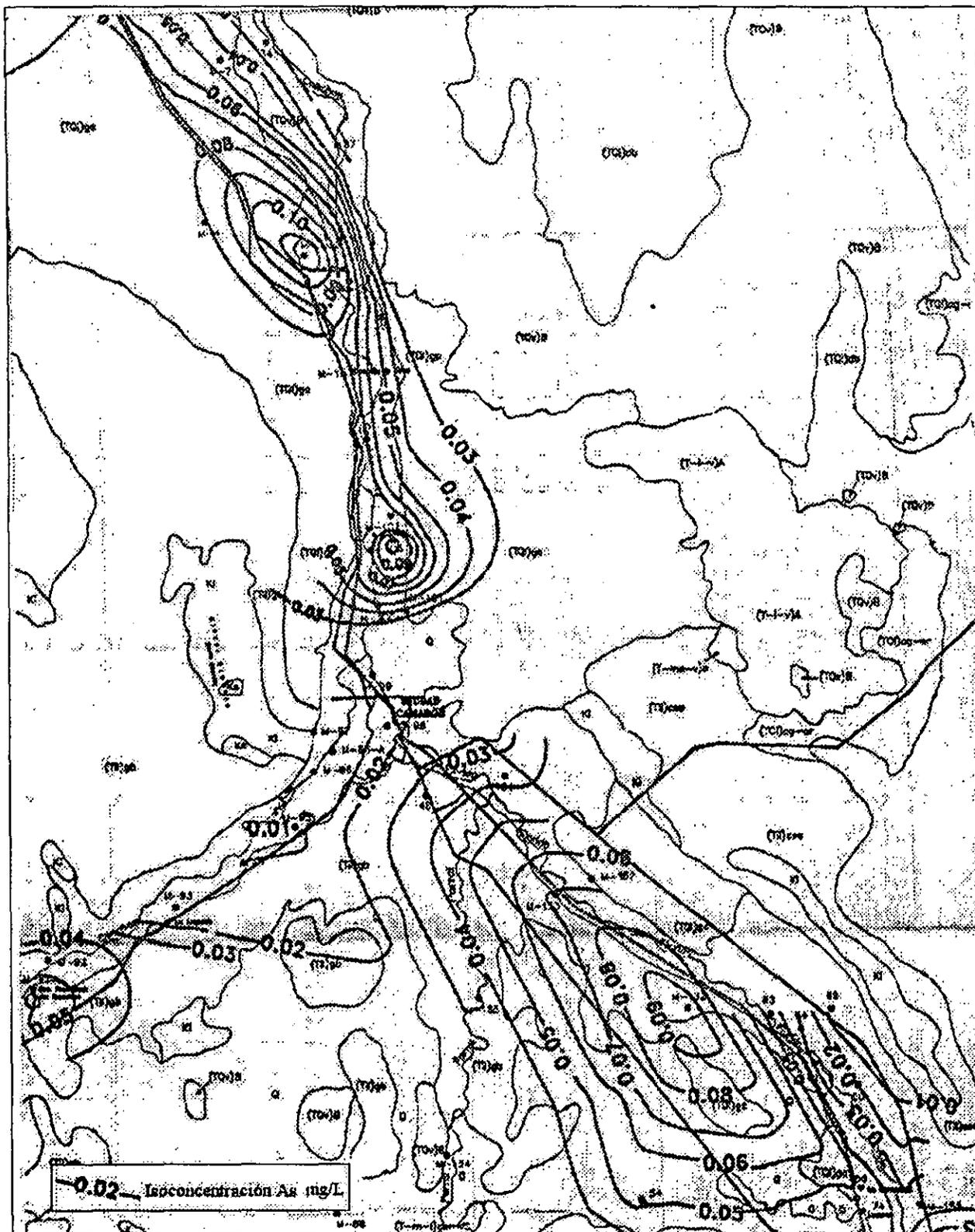


Figura 22 :Representación Gráfica de As, Camargo  
Mes de Mayo ( 1996)

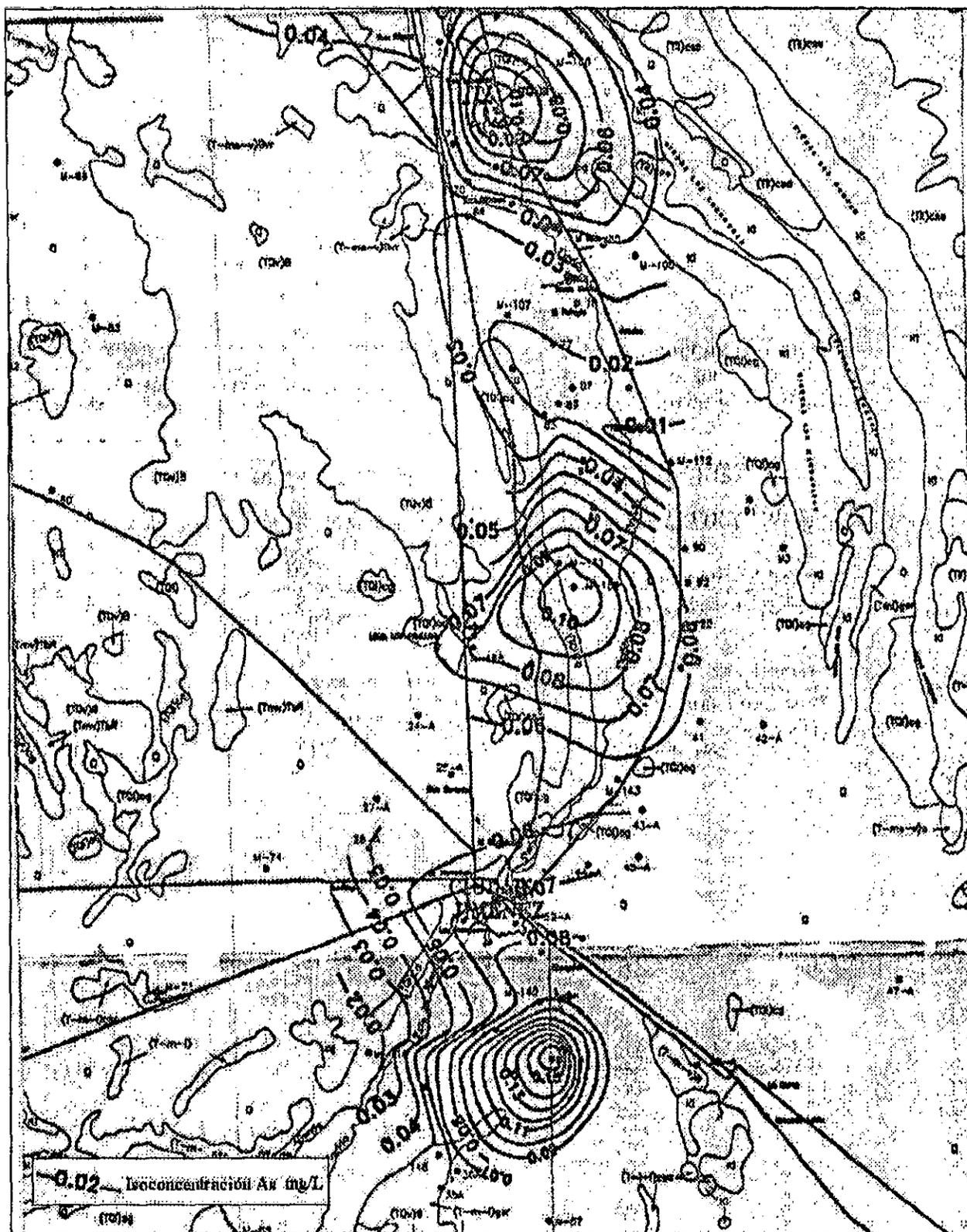


Figura 23 : Representación Gráfica de As, Jiménez  
Mes de Mayo ( 1996 )

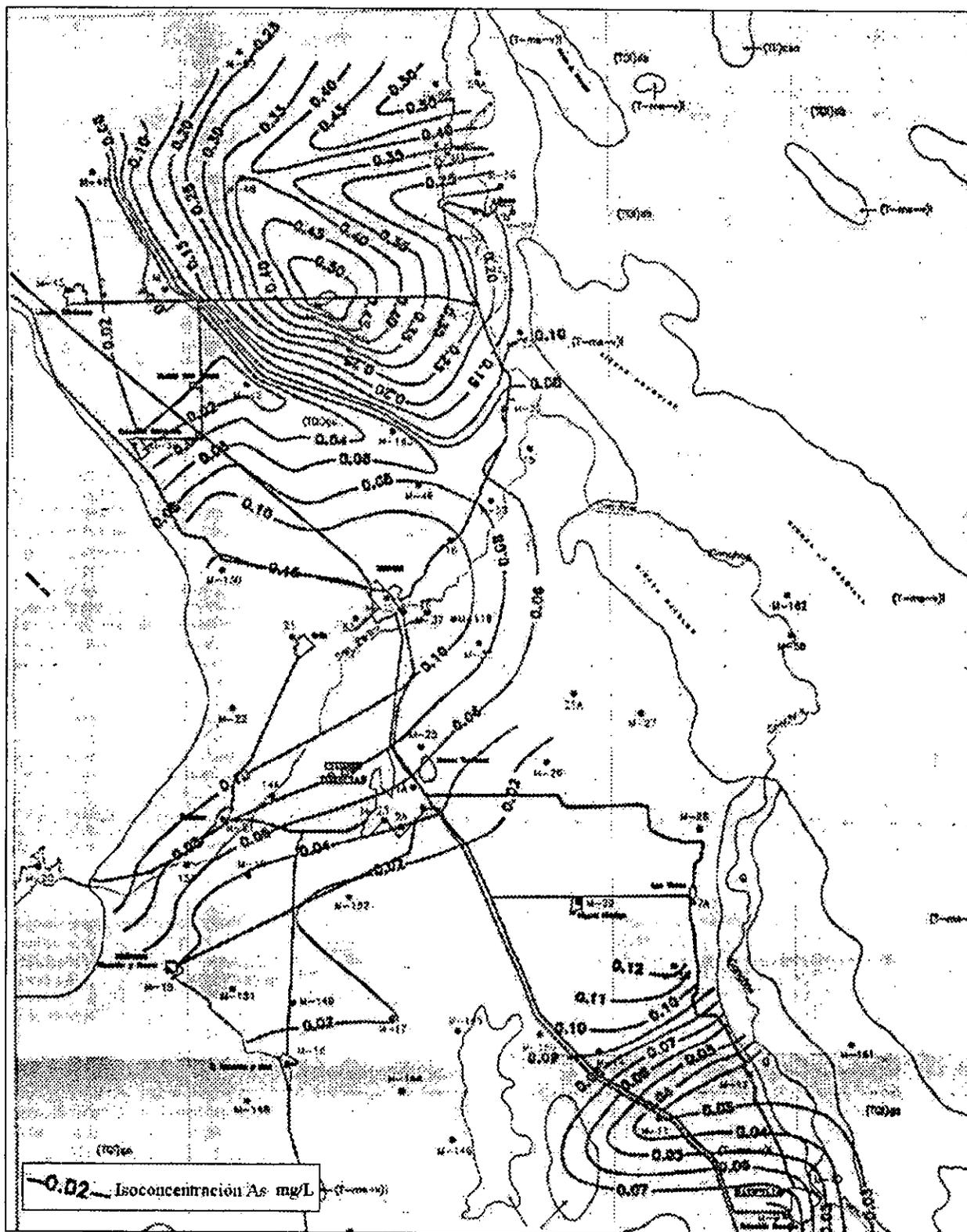


Figura 24 : Representación Gráfica de As, Delicias  
Mes de Mayo ( 1996)

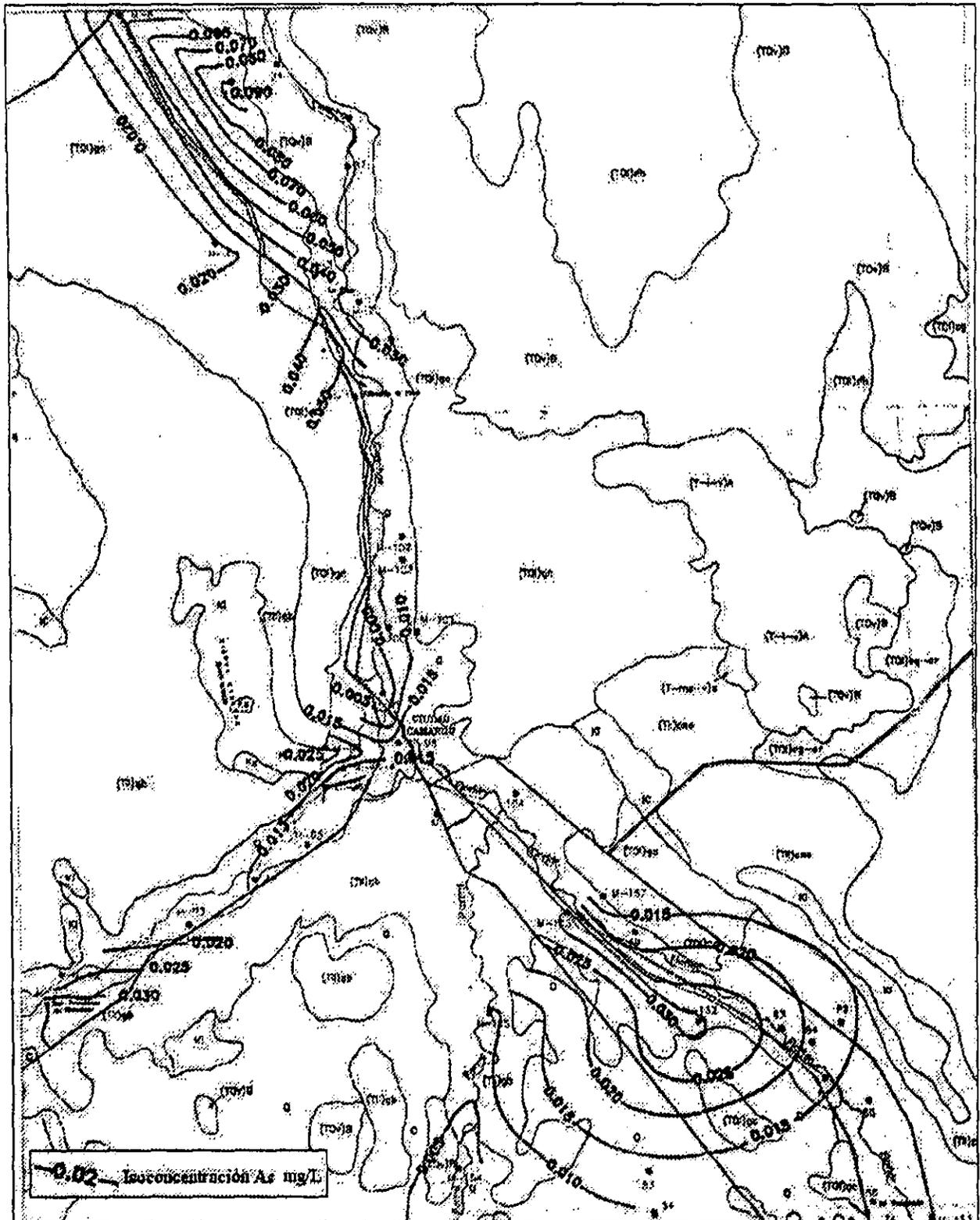


Figura 25 : Representación Gráfica de As, Camargo

Mes de Octubre ( 1996)

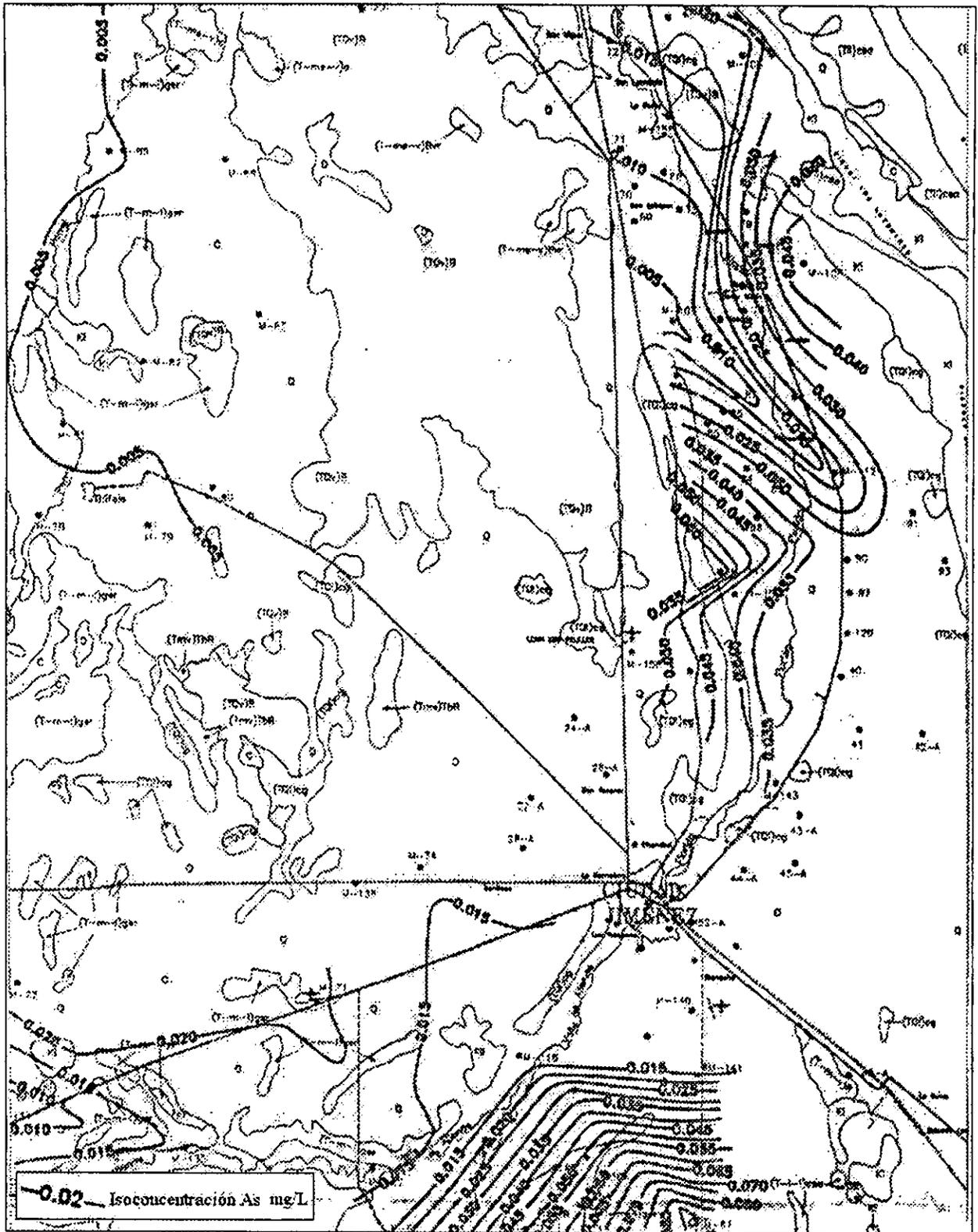


Figura 26 : Representación Gráfica de As, Jiménez

Mes de Octubre ( 1996)



De la Figura 22 a la Figura 27 puede observarse, gracias a los diagramas representativos de los contenidos de estos elementos, como la mayor densidad de pozos con altos contenidos de As se localizan en esta franja, comprendida entre San Diego de Alcalá y Julimes, en dirección siempre S-SE.

Al igual que para el caso de la interpretación de la distribución de los iones mayoritarios en plano, se ha hecho uso de los diagramas de Stiff modificados, para poder tener una representación de este tipo, que fuese sencilla de entender y que al mismo tiempo ofreciera un panorama general de la situación, en este estudio se ha diseñado un diagrama bajo la idea del de Stiff, que comprende las veces en que el elemento supera el valor límite establecido por la norma.

Gracias a este diagrama ha podido observarse que en términos generales, aunque como siempre presentándose excepciones, el As se encuentra prácticamente alineado a lo largo de toda la zona de estudio, en franjas con dirección NW-SE. En toda la zona se observa que la disposición de este elemento coincide con franjas paralelas entre sí, que de alguna forma podrían considerarse a lo largo y hacia el SE como las mismas franjas pero que hacia el sur han sufrido un corrimiento en dirección E. Esta disposición curiosamente coincide con fallas reportadas en la literatura que tienen presencia en superficie, y que se encuentran alineadas paralelamente a las sierras circundantes.

En los planos correspondientes se presentan las alineaciones observadas, así como las fallas reportadas. En la literatura se ha reportado de acuerdo a lo descrito por Gómez, F. (UACH, 1985) y en referencia al denominado rift del Río Grande, que un rift (grieta) es una estructura tectónica que se forma bajo un régimen extensional en un contexto de tectónica de placas. Generalmente consiste en una o varias depresiones topográficas y estructurales, de forma angosta y alargada que pueden ser físicamente continuas o segmentadas, y que normalmente se encuentran afectadas por fallas de transformación.

Este tipo de grietas se caracterizan por estar asociadas a profundas fallas normales que penetran toda la litosfera y que actúan como conductos para el ascenso del magma. Durante los procesos y eventos que se asocian con la formación y evolución de una grieta se pueden generar las condiciones adecuadas para la formación de depósitos económicos de minerales metálicos (Cu, Pb, Zn, Ag, Mo, Fe, etc.) y no metálicos (fluorita, barita, sales diversas).

Esta zona se caracteriza por presentar este tipo de situaciones, lo cual ha concordado con la distribución que se ha encontrado del As.

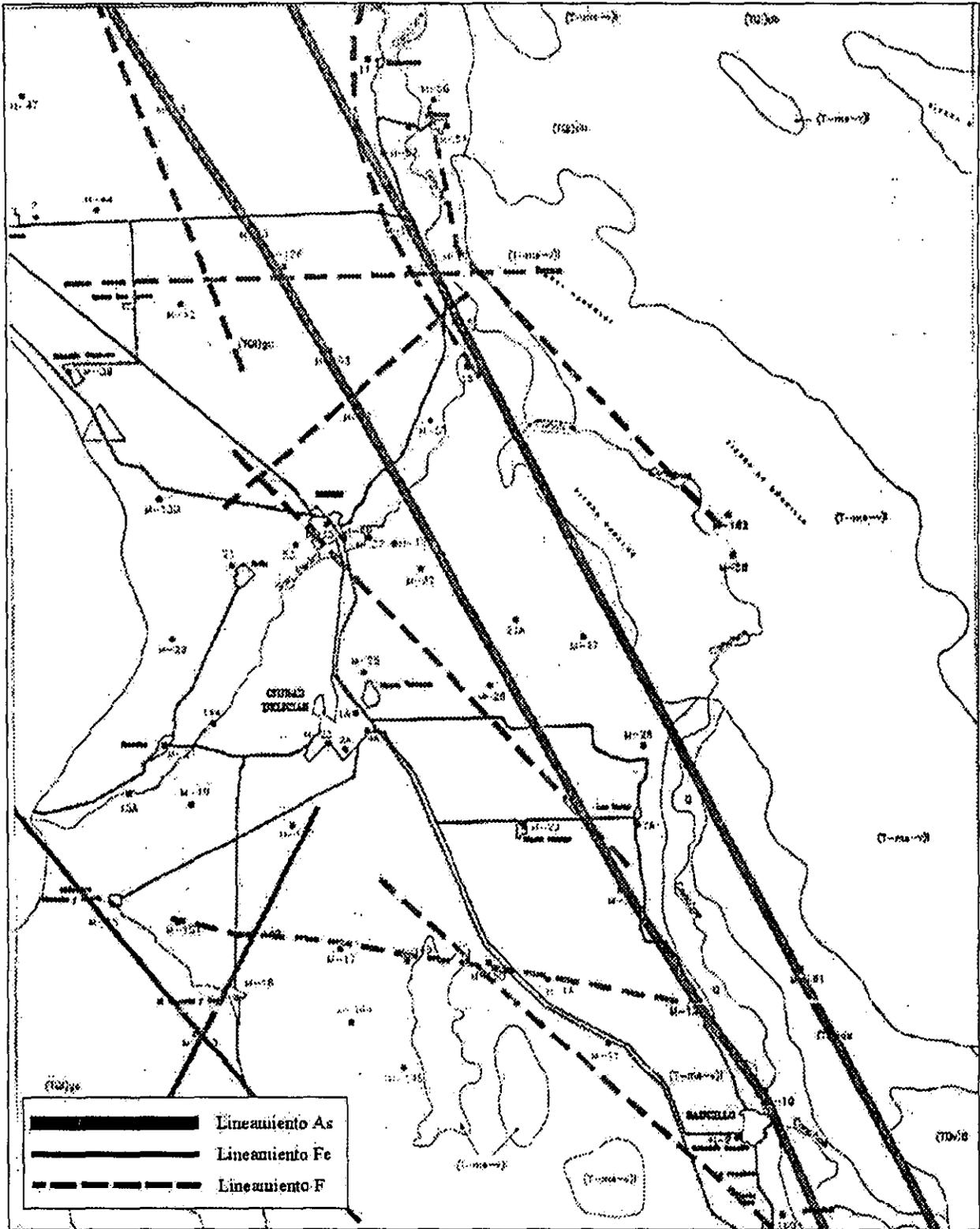


Figura 28 : Esquematzación de la dirección preferente de las fallas de As, Fe, y F , Delicias

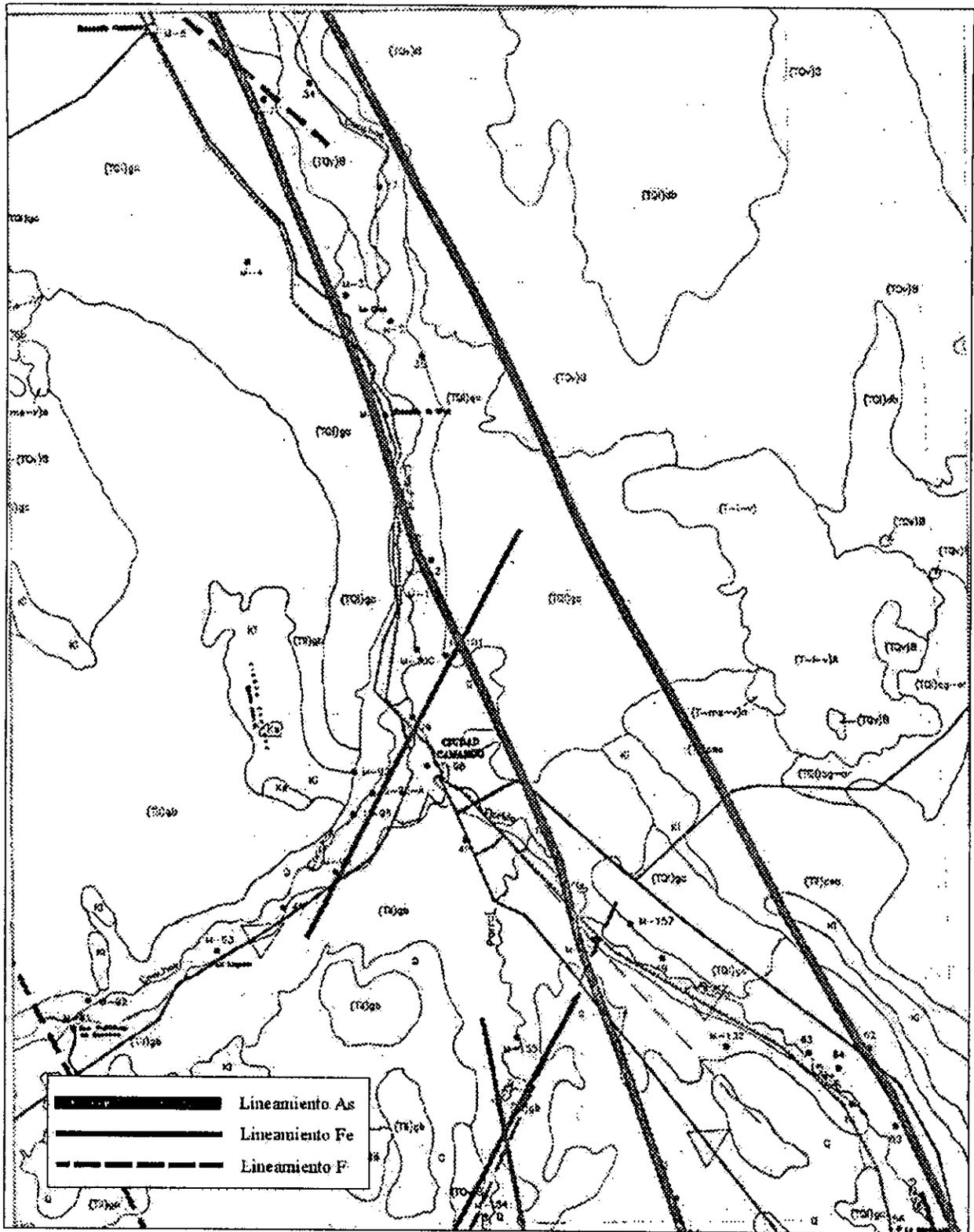


Figura 29 : Esquematación de la dirección preferente de las fallas de As, Fe, y F, Camargo

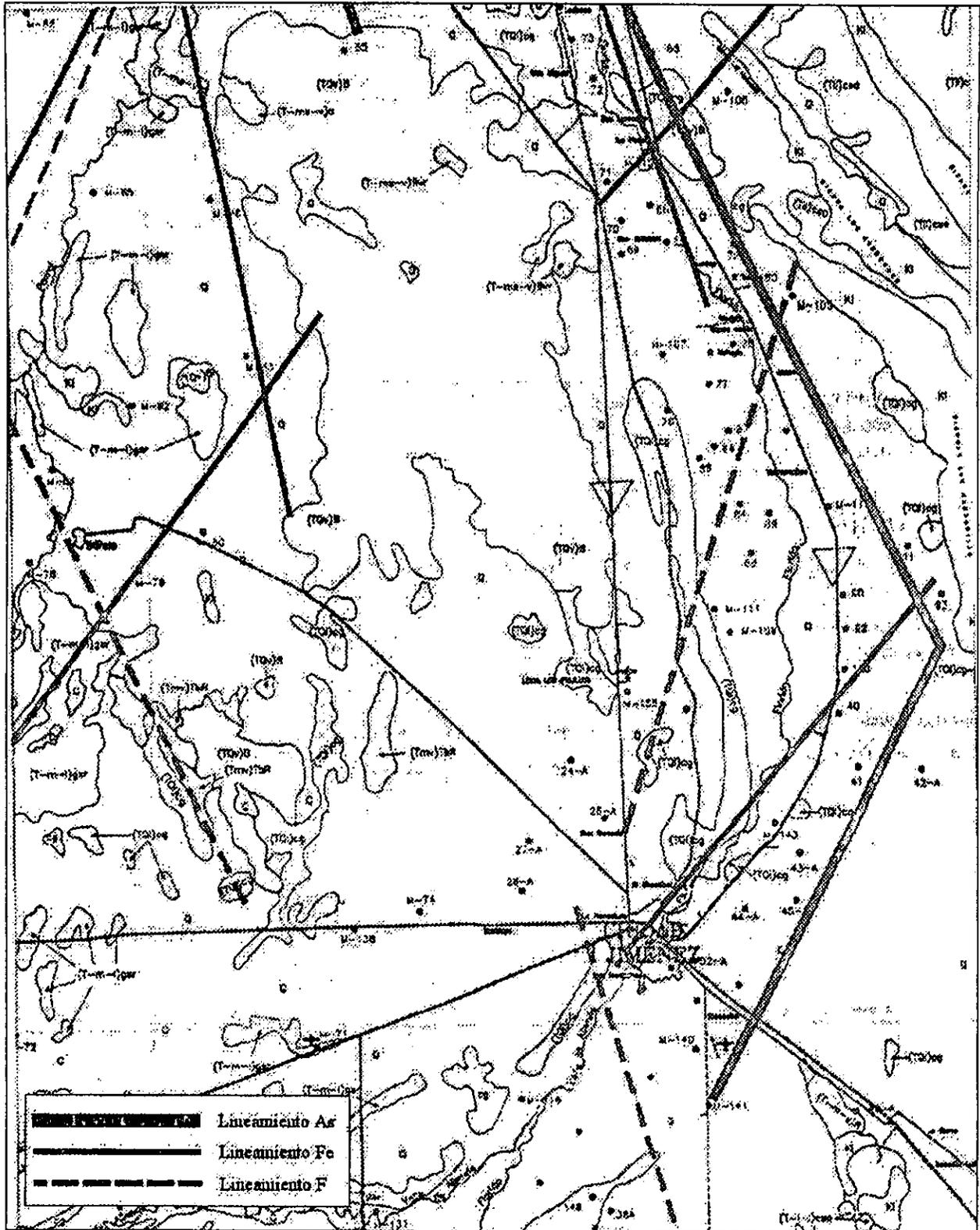


Figura 30 : Esquematzación de la dirección preferente de las fallas de As, Fe, y F , Jiménez

La ubicación de la "falla de arsénico" (Figura 28, Figura 29, Figura 30) comprende prácticamente toda la extensión del área estudiada, lo que alcanza una longitud de aproximadamente 200 km. Además de encontrarse puntos aislados ubicados a lo ancho del área total.

Hacia el W parece que las concentraciones encontradas no son tan altas, coincidiendo en ocasiones con concentraciones altas de Fe, aunque sin encontrarse un comportamiento específico de ambos iones en relación el uno con el otro.

Como se ha mencionado en el apartado de iones mayoritarios y se puede observar en las gráficas de los diversos parámetros vs. el As, no ha sido posible encontrar correspondencias importantes entre ellos. Curiosamente al analizar aguas superficiales y aguas residuales, no se han encontrado contenidos altos de As en ninguna de ellas, lo cual corrobora en parte la tesis mantenida del origen natural del As, proveniente de las formaciones geológicas atravesadas por el agua subterránea.

En los planos con las configuraciones de As obtenidas para ambas campañas, la de Mayo y la de Octubre de 1996. A pesar de las diferencias en las concentraciones que se observan entre ambas campañas, mismas que pudieran ser achacadas a diferencias de muestreo, preservación y/o incluso análisis, quedan claramente manifestadas las zonas más problemáticas en ambos casos.

- Flúor.

En cuanto a la presencia de F en las aguas subterráneas de la zona se ha encontrado que se encuentra muy diseminado, sin observarse una clara tendencia en alguna dirección específica.

Sin embargo, al norte de la zona de estudio parece que el F se acomoda en alineaciones de tipo normales a aquellas en las que se presenta el As, al menos en la zona al W de Meoqui-Delicias. Por otra parte en la zona de Julimes, al E, en las estribaciones de la sierra, se presenta una alineación singular de forma concéntrica que coincide paralelamente con la presencia de una falla reportada en la literatura que se presenta superficialmente en la Figura 28, Figura 29 y Figura 30 precisamente en la zona con la misma forma, con una distancia entre la falla reportada y la alineación de F observada de aproximadamente 1 km.

Como ya se ha mencionado, parece que en aquellos casos en que se encuentra el F con valores por encima de la norma el As también se presenta con valores superiores a su valor guía, y curiosamente si el F no rebasa los valores límite, el As tampoco. No hay que olvidar que no se trata de una regla y que en muchas ocasiones aunque el F esté excedido no necesariamente lo está el As.

Se sabe que en las aguas subterráneas de zonas áridas y semiáridas se pueden encontrar cantidades elevadas de flúor. En relación a la grieta (rift) que se ha mencionado anteriormente, algunas de las asociaciones que sugieren

la continuación de dicha grieta hacia Chihuahua son la distribución de rocas alcalinas, las fallas normales extensionales y su relación a depósitos de fluorita.

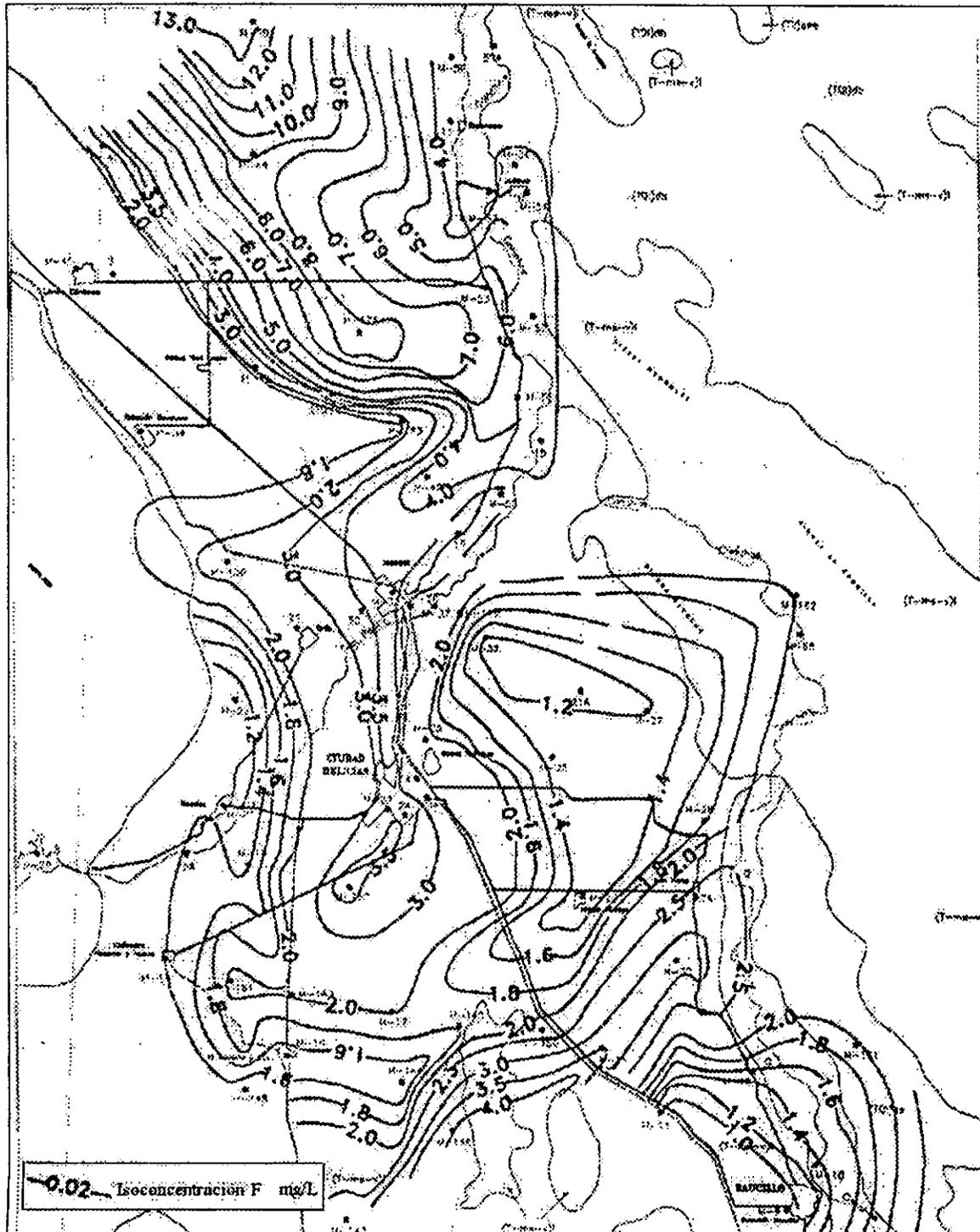


Figura 31 : Configuración de Flúor en Delicias, Chihuahua

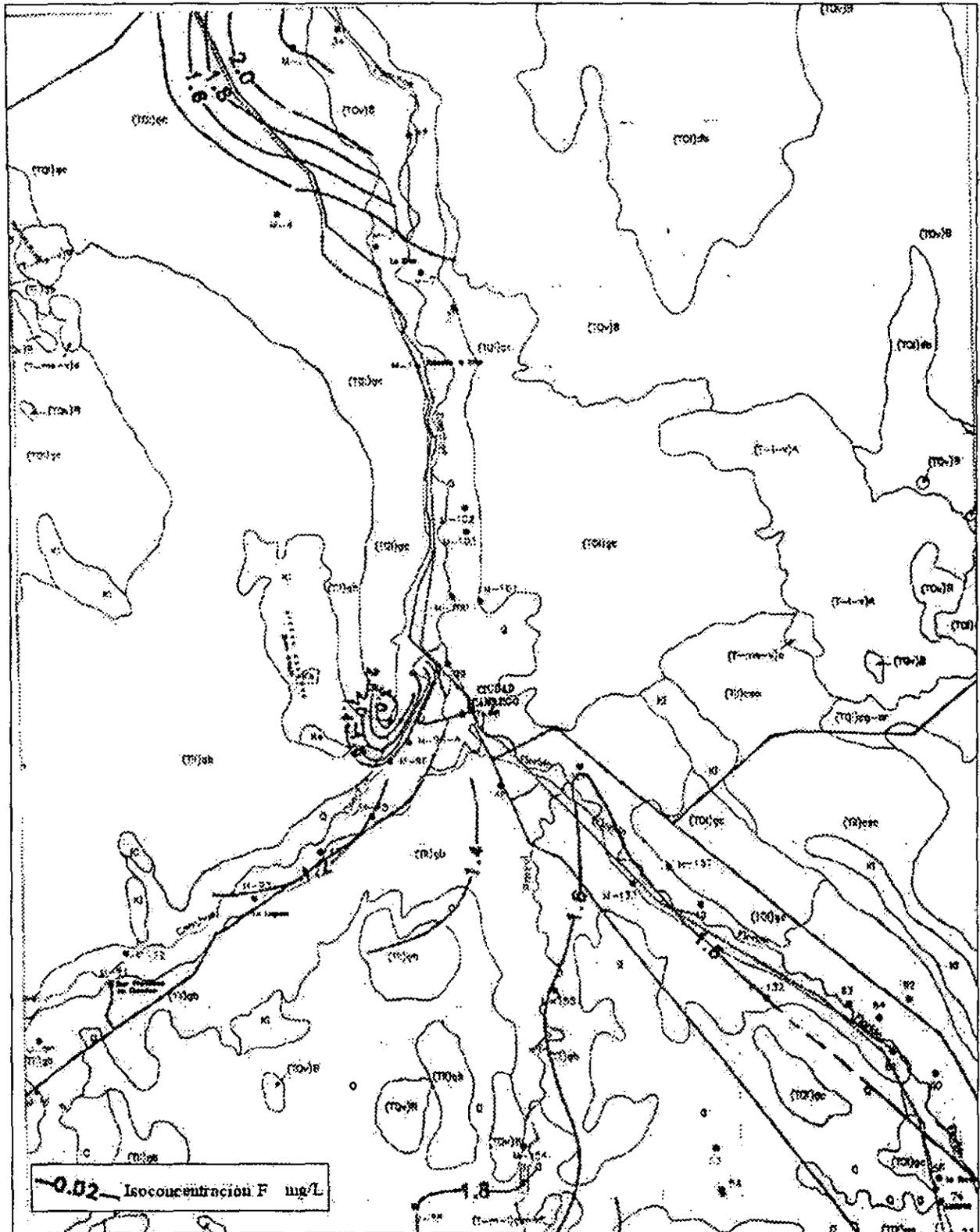


Figura 32 : Configuración de Flúor en Camargo

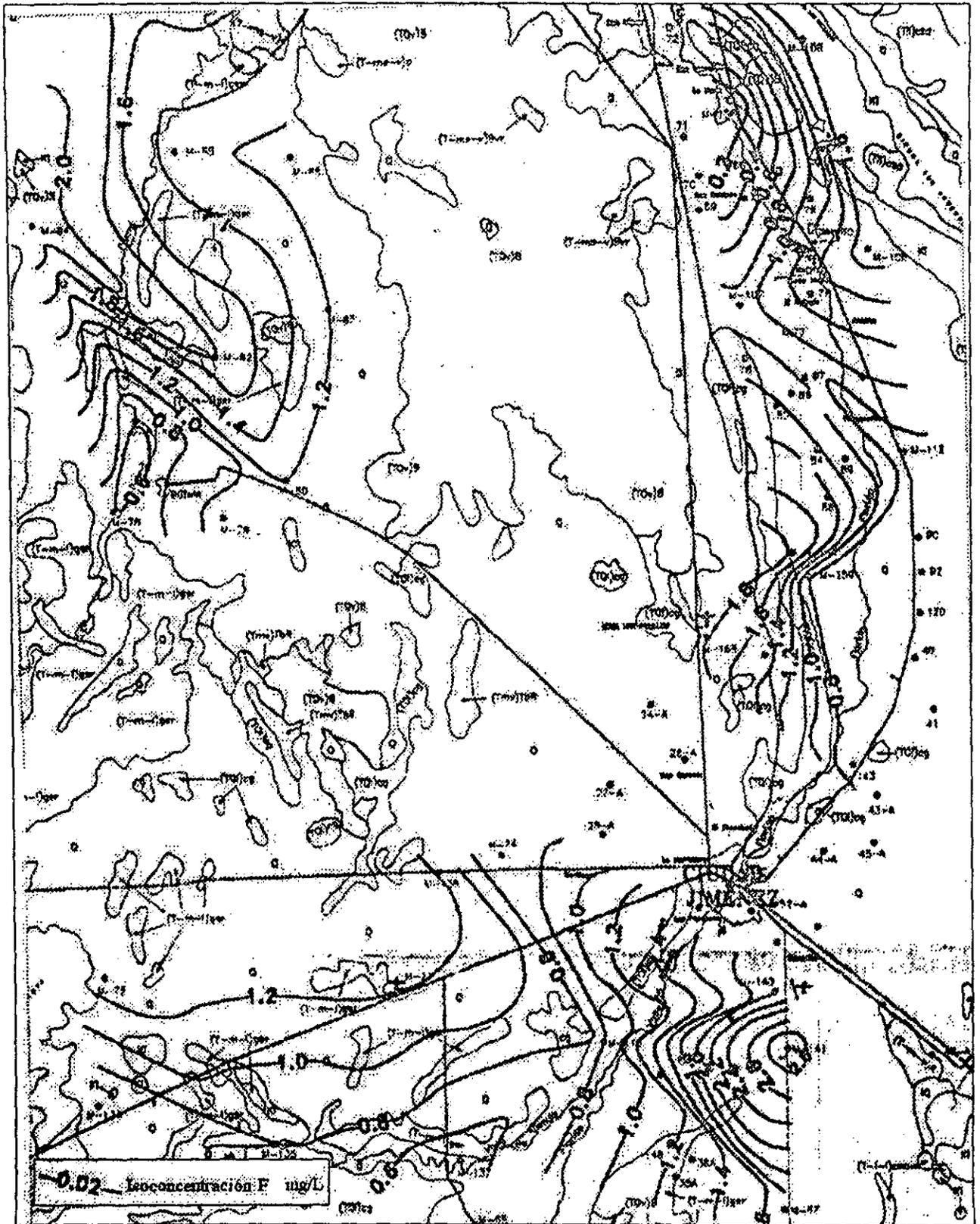


Figura 33 : Configuración de Flúor en Jiménez

En cuanto a la configuración del F se observa en la Figura 31, Figura 32 y la Figura 33 que para el caso de Delicias-Meoqui (a) las concentraciones más elevadas se localizan en la zona N, en San Diego de Alcalá, al N de Meoqui, aumentando del W al NE.

Al igual que el resto de los planos ya comentados se incrementan las concentraciones a partir de las sierras occidentales hacia el valle, en dirección E-SE. Así mismo en la localidad de Saucillo en dirección a las sierras orientales (La Boquilla, etc.), los contenidos aumentan, coincidentemente con lo ya comentado con anterioridad. Llama la atención este aumento en dirección a las sierras orientales o bien la disminución en dirección al centro del valle.

En los alrededores de la ciudad de Delicias se presentan concentraciones altas con valores superiores a los 3 ppm (2 veces por arriba de lo permitido por la NOM-127).

Intentando hacer una correlación entre las concentraciones (Figura 31, Figura 32, Figura 33) y la temperatura (Figura 16, Figura 17 y Figura 18) se aprecia que las temperaturas más altas se ubican en los alrededores de la ciudad de Delicias, y al S de la misma, al W de Saucillo, alcanzando valores incluso superiores a los 35 °C. Este valor aproximado a los 35 °C en ambas zonas mencionadas, coincide con valores de F de entre 3 y 4 ppm. En las zonas con temperaturas inferiores también se presentan concentraciones inferiores de F. A excepción de la zona N, que corresponde a San Diego de Alcalá, donde los contenidos de F son sumamente altos, rebasando incluso las 13 ppm,

mientras que las temperaturas encontradas no son especialmente anómalas en la misma zona.

Como ya se ha mencionado en relación a las gráficas (Gráfica 2, Gráfica 7, Gráfica 8 y Gráfica 9) no ha sido posible encontrar una relación directa entre la temperatura y la incidencia de As, F,  $SO_4$ , y/o Fe en concentraciones altas.

- **Hierro.**

En este caso el Fe se ha encontrado en concentraciones superiores a la norma, y en algunos casos con contenidos realmente altos (más de 20 mg/L), especialmente al NW en el municipio de Aldama, cercano a la Sierra de Sto. Domingo y la población de Bachimba. Curiosamente una vez más la alineación de los puntos que presentan concentraciones altas de Fe sigue la dirección SE, al igual que los puntos de As, aunque sin coincidir entre ellos.

En la zona sur del área de estudio, al W de Delicias, y nuevamente con la misma orientación SE, se vuelve a encontrar una serie de puntos con altos contenidos de Fe. Como se ha mencionado estos puntos coinciden con aguas del tipo bicarbonatado, no encontrándose concentraciones altas en la zona en que el anión predominante es el sulfato, debido seguramente, como ya se ha explicado, a las condiciones oxidantes del medio en el cual predominan los sulfatos, y en las que el Fe no se encuentra disuelto. Tampoco se ha logrado encontrar una correlación importante entre el Fe y el As, ni entre el Fe y el F.

## 6.2. DIAGNÓSTICO GENERAL PRELIMINAR.

Cabe recapitular que la finalidad última del presente estudio es plantear posibles soluciones al problema de abastecimiento de agua potable a las diversas poblaciones que han sido analizadas y a las cuales se les ha encontrado contenidos de As, Fe y F superiores a los valores guía.

Se tiene como resultado en ambos muestreos una relación aproximada del 50 % de pozos afectados (relación de pozos de agua potable afectados ya sea por arsénico y/o flúor por encima de la NOM-127.

Con ambos muestreos se han cubierto aproximadamente 2000 km<sup>2</sup>, correspondiendo a 13 municipios de Chihuahua. De ellos 12 presentan diversos grados de afectación, cubriendo una población aproximada de 170,000 habitantes.

Los datos obtenidos durante los muestreos y análisis realizados durante 1996 dieron pie a la necesidad de obtener más y mejor información de cada uno de los sitios afectados por la presencia de As y/o F y/o Fe, a fin de poder definir la mejor solución para cada caso en particular, dado que se vio que las condiciones de abastecimiento para cada caso eran completamente diferentes entre sí.

Además es necesario verificar la existencia de otras fuentes potenciales de abastecimiento que se encuentren en los alrededores de las poblaciones

afectadas, ya sea de un pozo de buena calidad y buen caudal de una población cercana o bien de un pozo de buena calidad pero que su uso fuese para riego.

A su vez este trabajo, denominado prediagnóstico, debía presentar, en función de los datos recabados en campo, propuestas de solución.

Se ha visto que las soluciones son diferentes para cada caso. En algunas ocasiones la solución podría ser el intercambio de agua de uso agrícola por agua de uso potable. En otros casos, cuando la población se encuentra cercana al río, la construcción de galerías filtrantes en la margen del mismo podría ser la solución.

Otras soluciones que se presentan es la importación de agua desde poblados con buena calidad (acueductos de hasta 2.5 km.), o bien en casos más extremos la construcción de plantas de tratamiento adecuadas, o la dotación de reactores domiciliarios cuando la población a abastecer es muy pequeña (menos de 20 habitantes).

Entre los puntos más importantes que se destacan en este prediagnóstico se encuentra la necesidad de realizar un nuevo muestreo exhaustivo, ya que las soluciones dependen de la calidad de las fuentes alternas propuestas, que en general es desconocida.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1. CONCLUSIONES.**

En este estudio por razones de tiempo así como por desconocimiento de lo que se iba a encontrar, se terminó el muestreo a la altura de la población denominada San Diego de Alcalá, justamente donde parece que las concentraciones de As alcanzan los valores más altos. Por lo revisado en las cartas geológicas se considera que las condiciones geológicas hacia el N-NW de esta zona (en dirección hacia Ciudad Juárez, aproximadamente hasta Villa Ahumada, así como hacia la zona alrededor de la Ciudad de Chihuahua) se presentan muy similares a las que se tienen en toda el área de estudio por lo que la probabilidad de que las características del agua sean similares es muy alta, con el consiguiente problema de presencia de As, F y Fe en el agua potable.

En la zona norte la mayoría de las aguas son sódicas y sulfatadas. El 30% de las aguas es del tipo cálcico, tanto sulfatadas como bicarbonatadas.

En la sección Norte de la Zona Sur se ha encontrado agua muy similar a la descrita en La Cruz, es decir, francamente sulfatada, aunque aquí se observa un aumento en el contenido de iones sulfato. Este ion presenta los mayores valores al S-SE de Camargo, encontrándose concentraciones francamente altas, muy por encima de los 250 ppm establecidos por los valores

guía. A pesar de ello podría hablarse de un mismo tipo de aguas en ambas zonas, ya que no se aprecian variaciones importantes.

Por otra parte la conductividad eléctrica (CE mS/cm) no es muy alta. Tan sólo 5 puntos están por encima de los 2000 mS/cm.

No ha sido posible establecer una correlación clara y definitiva entre los valores altos de As y valores altos de T, como tampoco se observa correlación a la inversa. En parte esto no ha sido posible debido a que las características constructivas de los pozos muestreados no son conocidas, ni su profundidad real, por lo que es de suponerse que, como en la mayoría de los pozos del país, estos se encuentran ranurados desde la profundidad del nivel hasta el fondo, sin discriminar zonas productoras o no, es decir, sin haber realizado un correcto diseño de terminación del pozo, por lo que la mezcla de aguas de diferentes horizontes es total, y resulta imposible diferenciar entre aguas de mayor o menor temperatura, o de mejor o peor calidad en profundidad. Por lo tanto este tipo de diferencias que podrían resultar de gran utilidad interpretativa, no sirven en este caso ya que no es posible diferenciar de donde se está captando el agua y en que proporciones están aportando los distintos estratos atravesados.

En la zona norte es donde se ha encontrado que las concentraciones de As son las más altas y su incidencia es mayor. Específicamente en los municipios de Julimes y Aldama.

En términos generales se ha observado que el As se encuentra prácticamente alineado a lo largo de toda la zona de estudio, en franjas con dirección NW-SE. En toda la zona se observa que la disposición de este elemento coincide con franjas paralelas entre sí, que de alguna forma podrían considerarse a lo largo y hacia el SE como las mismas franjas pero que hacia el sur han sufrido un corrimiento en dirección E. Esta disposición curiosamente coincide con fallas reportadas en la literatura que tienen presencia en superficie, y que se encuentran alineadas paralelamente a las sierras circundantes. La ubicación de la "falla de arsénico" comprende prácticamente toda la extensión del área estudiada, lo que alcanza una longitud de aproximadamente 200 km.

En cuanto al F en las aguas subterráneas de la zona se ha encontrado que se encuentra muy diseminado, sin observarse una clara tendencia en alguna dirección específica.

Sin embargo, al norte de la zona de estudio parece que el F se acomoda en alineaciones de tipo normales a aquellas en las que se presenta el As, al menos en la zona al W de Meoqui-Delicias. Por otra parte en la zona de Julimes, al E, en las estribaciones de la sierra, se presenta una alineación singular de forma concéntrica que coincide paralelamente con la presencia de una falla reportada en la literatura que se observa superficialmente precisamente en la zona con la misma forma, con una distancia entre la falla reportada y la alineación de F observada de aproximadamente 1 km.

En este caso el Fe se ha encontrado en concentraciones superiores a la NOM-127, y en algunos casos con contenidos realmente altos (más de 20 mg/L), especialmente al NW en el municipio de Aldama, cercano a la Sierra de Sto. Domingo y la población de Bachimba. Curiosamente una vez más la alineación de los puntos que presentan concentraciones altas de Fe sigue la dirección SE, al igual que los puntos de As, aunque sin coincidir entre ellos.

## **7.2. RECOMENDACIONES.**

De acuerdo con los resultados obtenidos, así como del diagnóstico de la situación de abastecimiento en la zona de estudio, se ha llegado a lo siguiente:

1. La acción inmediata a realizar es el muestreo y análisis de 144 pozos y 22 tomas superficiales (río y canal) a fin de conocer la calidad de los puntos propuestos.
2. Como respuesta del muestreo se definirán las acciones a seguir, en función de cada caso específico, tales como:
  - a) Fuentes alternas
  - b) Galerías filtrantes
  - c) Reactores domiciliarios
  - d) Rehabilitación.

3. Este programa de remediación en poblaciones de menos de 3,000 habitantes, y sistemas de abastecimiento simples, interesa a aproximadamente 41,500 habitantes y abarca del orden de 8,500 tomas.
4. El caudal necesario es de apenas 106 L/s que repartidos en 84 poblaciones lo que da un promedio de 1.26 L/s por población.
5. Estas 84 poblaciones se encuentran ubicadas en un área aproximada de 1,500 km<sup>2</sup> lo que dificulta la solución.

No ha sido posible establecer una relación entre la profundidad de pozos y la mala calidad del agua por lo que no es posible decir si los estratos inferiores son los causantes del deterioro de la misma. Se ha manejado esta posibilidad en función del aporte de aguas de mayores profundidades y posiblemente mayor tiempo de contacto por lo que las concentraciones de los diversos constituyentes aumentan, sin embargo no se cuenta con la información necesaria y suficiente para establecerlo como un hecho.

Es necesario realizar un muestreo mucho más intensivo, determinando la calidad del agua de todos los pozos susceptibles de ser aprovechados para abastecimiento a la población. Dicho muestreo debe estar basado en los resultados del diagnóstico preliminar.

Es imperioso dar solución inmediata a este problema de calidad natural del agua subterránea, ya que los problemas de salud que conlleva son graves.

Debido a que la mayoría de las poblaciones son pequeñas, con pocos pobladores y sobre todo, se encuentran muy alejadas entre sí, se ha visto que la solución más adecuada en estos casos sería los denominados reactores domiciliarios.

A futuro se realizarán pruebas en un modelo de reactor que ha sido propuesto para lograr la remoción tanto del As, como del Fe y el F. El principio en que se basa este reactor es ampliamente conocido y puede encontrarse en la literatura especializada. La novedad estriba en que se trata de un equipo de fácil manejo, familiar, de pequeño volumen, y que no requiere mantenimiento especial. Es de bajo costo y la única dificultad será la distribución de los reactivos floculantes necesarios, cuyo costo también es reducido, pero que requieren ser suministrados en las dosis adecuadas.

- <sup>1</sup> Volkov, S.N., Hydrogeochemistry of Toxic Elements in Urbanized Geotechnical Systems, Water Quality Research Journal of Canada., 1997, Vol. 32, No. 3, pp. 523-539.
- <sup>2</sup> USEPA, Quality Criteria for Water. Washington, D.C., EUA, United States Environmental Protection Agency, 1976.
- <sup>3</sup> Baduí, Salvador, Química de Alimentos., Editorial Alhambra Mexicana, México, 1994.
- <sup>4</sup> Hem, John D., Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Geological Survey Water-Supply, Paper 1474. US Government Printing Office, Washington, D.C., 1959.
- <sup>5</sup> Castellan, Gilbert W., Fisicoquímica, Editorial Addison-Wesley Iberoamericana, México, 1987.
- <sup>6</sup> Kemmer, F.N., Water: The Universal Solvent, NALCO Chemical Company, Oak Brook Il, EUA, 1977.
- <sup>7</sup> Custodio, Emilio y Llamas, Manual Ramón, Hidrología Subterránea, Ediciones Omega S.A., 3ª Edición, Barcelona, España, 1996.
- <sup>8</sup> Rankama, K. y Sahama, T.G., Geochemistry, Chicago University Press, Chicago, EUA, 1950.
- <sup>9</sup> Domenico, Patrick A., Concepts and Models in Groundwater Hydrology, Ed. Mc Graw Hill, Nueva York, EUA, 1992.
- <sup>10</sup> Davies, Stanley N., De Wiest, Roger J.M, Hydrogeology, 2ª Edición, Wiley and Sons, New York, EUA, 1966.
- <sup>11</sup> OPS, Guías para la Calidad del Agua Potable. Criterios Relativos a la Salud y Otra Información de Base., Volumen II, Publicación científica No. 481. Organización Panamericana de la Salud, 1997.
- <sup>12</sup> OPS. Guías para la Calidad del Agua Potable. Recomendaciones., Volumen I. Publicación científica No. 481. Organización Panamericana de la Salud, 1985.
- <sup>13</sup> OMS. Normas Internacionales para el Agua Potable, Organización Mundial de la Salud, 3ª Edición, Ginebra, Suiza, 1971.
- <sup>14</sup> Loaiciga, H.A. Charbeneau, R.J. et al. Review of Groundwater Quality Monitoring Network Design, American Society of Civil Engineering, Journal of Hydraulic Engineering, 1992. Vol. 118, No. 1, pp. 11-37.
- <sup>15</sup> Brondy, M. Dall'Aglio, M. et al., Analysis of Trace Elements in Natural Waters, Chemistry and Ecology, 1986. Vol. 2, No. 4, pp. 289-299.

- <sup>16</sup> Secretaría de Salud., Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano-Limites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización, México, 1994.
- <sup>17</sup> Hung, Tsu-Chang, Liao, Shu-Mao. Arsenic Species in the Well Water and Sediments of the Blackfoot Disease Area in Taiwan, Toxicological and Environmental Chemistry. Vol. 56, No. 1-4, 1996, pp. 63-73.
- <sup>18</sup> Pontius, Frederick W., Brown, Kenneth G. Et al., Health Implications of Arsenic in Drinking Water, American Waterworks Association, Denver, EUA. Journal of the American Waterworks Association, Vol. 86, No. 9, septiembre 1994, pp. 53-63.
- <sup>19</sup> Vallée, B.L. et al. Arsenic Toxicology and Biochemistry, A.M.A. Archives of Industrial Health, Vol. 21, No. 132, 1960.
- <sup>20</sup> Nimick, David A. Arsenic Hydrogeochemistry in an Irrigated River, Ground Water, Vol. 36, No. 5, Sept-Oct 1998, pp. 743-753.
- <sup>21</sup> Khan, A., et al., Chronic Toxicity of a Fluoride Mixture to Freshwater Organisms, Water Science and Technology. Vol. 26, No. 9-11, 1992, pp. 2353-2356.
- <sup>22</sup> Castang, 1971.
- <sup>23</sup> Van Gaans, PFM., Role of Modelling in Geochemical Engineering, Journal of Geochemical Exploration, Vol. 62, No. 1-3, June 1998, pp. 41-55.
- <sup>24</sup> Melloul, A., Collin, AM., The Principal Components Statistical Method as a Complementary Approach to Geochemical Methods in Water Quality Factor Identification; Application to the Coastal Plain Aquifer of Israel, Journal of Hydrology, 1992. Vol. 140, No. 1-4, pp. 49-73.
- <sup>25</sup> D'Amore, F., Escandiffio, G, et al., Some Observations on the Chemical Classification of Groundwaters, Geothermics. 1983, Vol. 12, No. 2-3, pp. 141-148.
- <sup>26</sup> Cates, David A., Impact of Ion Exchange Processes on Surface Brine Transport as Observed on Piper Diagrams, Groundwater, Vol. 34, No. 3, May-June, 1996, pp. 532-544.
- <sup>27</sup> Lee, T. C. Leegram, A. Program for Normalized Stiff Diagrams and Quantification of Grouping Hydrochemical Data, Computers and Geoscience, Vol. 24, No. 6, July 1998, pp. 523-529.
- <sup>28</sup> Stonges, DJ., Heil, JH., Black, JA., Sliding Stiff Diagrams a Sophisticated Groundwater Analytical Tool. Groundwater Monitoring and Remediation, 1995, Vol. 15, No. 2, pp. 134-139.
- <sup>29</sup> Secretaría de Salud., Norma Oficial Mexicana NOM-117-SSA1-1994, Bienes y Servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre,

fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica, México, 1994.