



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN



ESTUDIO QUIMICO DE LA REMOCION DE ARSENICO EN  
AGUAS POTABLES CONTAMINADAS EN EL DISTRITO  
MINERO DE ZIMAPAN HIDALGO.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**Q U I M I C O**

P R E S E N T A :

**Perez Herrera Hector Fernando**

ASESOR DE TESIS: I.Q. MARGARITA ALONSO ESPINOZA

CUAUTITLAN, IZCALLI, EDO. DE MEX.

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Estudio químico de la remoción de arsénico en aguas potables contaminadas en el Distrito Minero de Zimapán Hidalgo

que presenta el pasante: Héctor Fernando Pérez Herrera  
con número de cuenta: 8613334-8 para obtener el TITULO de:  
Químico

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 26 de FEBRERO de 1976

PRESIDENTE	M. en C. Alberto Rojas Hernández	<i>Alberto Rojas</i>
VOCAL	Q. Ofelia Vega Vázquez	<i>Ofelia Vega V.</i>
SECRETARIO	I.Q. Margarita Alonso Espinoza	<i>Margarita Alonso</i>
PRIMER SUPLENTE	Q. M. Verónica Tapia Sánchez	<i>Verónica Tapia</i>
SEGUNDO SUPLENTE	Q. M. Eugenia Carbajal Arenas	<i>Eugenia Carbajal</i>

## AGRADECIMIENTOS.

A mis padres:  
Leobarda Herrera de Pérez  
Héctor Pérez Valencia

Sabiendo que esto solo es el resultado de su enorme apoyo, sacrificios y esfuerzos, por el gran incentivo dado para la culminación de este gran sueño. Porque cada objetivo alcanzado se debe al ser que han formado en mí con sus enseñanzas y esfuerzo tanto material como espiritual. Gracias por enseñarme a ser como soy y apreciar la vida como tal.

A mis hermanos:  
Luis Eduardo  
Alan Rodrigo  
De quienes he aprendido algo más acerca de la vida.

A cada uno de los sinodales, quienes dedicaron parte de su tiempo en la revisión del presente trabajo.

De manera muy especial a Edith Arroyo Mondragón, Cristina Retana Albarrán y Ericka García Patiño quienes desinteresadamente me brindaron su apoyo y plena amistad, aún en los momentos más difíciles, quienes me impulsaron a seguir adelante y continuar con la culminación de este gran sueño.

A mis amigos:  
Mario Pérez M, Oscar Peralta P, Javier Martínez C, Carlos Córtes F, Eduardo de Moraes B, Rodrigo Calderón M, Juan Martín Campos S, Leopoldo A Granados R y quienes no nombre por falta de espacio, por la amistad y buen grupo que formamos en la escuela y quienes aprendí algo más. A todos ellos y cada uno de mis compañeros (as) de la 17<sup>ava</sup> generación de Ingeniería Química. Gracias

A mis amigos:  
Guillermo Montoya, José Antonio Hdez, Rigoberto Nolasco, Carlos Quezada, Jesús Canales, Rogelio Montoya, Salvador Sánchez, Ana Belem Trujeque, Margot Gómez, Miguel A Rafael, Carmen Molina, Marcela Cruz, Carmen Ortega, Israel Salazar, Amalia Díaz, Minerva Archundia, Verónica Márquez, Teresa Pichardo M. y a quienes no mencione por la falta de espacio, quienes compartieron su alegría y amistad brindada durante el tiempo de realización. A todos ellos y cada uno de los compañeros (as) de la 19<sup>ava</sup> generación de Químico Farmacéutico Biólogo. Gracias.

A Dhaisim, Feilong y DeeJay, por enseñarme a reponerme ante todo y contra todo lo adverso de la vida.

A las familias:  
Arroyo Mondragón  
García Patiño  
Retana Albarrán  
Ibarra Montaña  
Porque de alguna manera han contribuido para la culminación de este gran sueño y por todo su apoyo, muchísimas gracias.

A la UNAM, por lo que es y lo grande que será.

**El presente trabajo se realizó en el laboratorio de Tratamiento de Aguas y Química Inorgánica de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (U.N.A.M.), bajo la dirección de la I.Q Margarita Alonso Espinoza.**

## **INDICE:**

### **I.- OBJETIVOS**

### **II.-INTRODUCCION**

<b>III.-ANTECEDENTES.....</b>	<b>1</b>
<b>3.1 GENERALIDADES DEL ARSENICO.....</b>	<b>2</b>
<b>3.2 CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS COMPUESTOS DE ARSENICO.....</b>	<b>5</b>
<b>3.2.1 USOS DE ALGUNOS COMPUESTOS DE ARSENICO.....</b>	<b>6</b>
<b>3.3 CICLO DEL ARSENICO EN EL ECOSISTEMA.....</b>	<b>8</b>
<b>3.3.1 FUENTES DEL ARSENICO EN EL MEDIO AMBIENTE.....</b>	<b>8</b>
<b>3.3.2 PRESENCIA DE ARSENICO EN LA NATURALEZA.....</b>	<b>9</b>
<b>3.4 TOXICIDAD DEL ARSENICO.....</b>	<b>11</b>
<b>3.4.1 ARSENICO COMO RIESGO DE SALUD EN MEXICO.....</b>	<b>14</b>
<b>3.4.2 TIPOS DE ABSORCION-EXPOSICION AL ARSENICO.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4.3 METABOLISMO DEL ARSENICO EN HUMANOS.....</b>	<b>16</b>
<b>3.4.4 CUADRO CLINICO POR INTOXICACION AL ARSENICO.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4.5 HIDROARSENICISMO CRONICO REGIONAL ENDEMICO.....</b>	<b>20</b>

### **IV.- LOCALIZACION Y UBICACION DEL AREA DEL**

<b>DISTRITO DE ZIMAPAN.....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 CARACTERES GEOFISICOS.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1.1 ESTRATIGRAFIA.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 YACIMIENTOS MINERALES EXISTENTES.....</b>	<b>24</b>
<b>4.3 CARACTERES CLIMATICOS Y DE VEGETACION.....</b>	<b>28</b>
<b>4.4 CARACTERES DEMOGRAFICOS.....</b>	<b>28</b>

<b>V.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>34</b>
5.1 ANALISIS FISICOQUIMICO DE LAS AGUAS.....	35
5.1.1 ENSAYOS QUIMICOS CUALITATIVOS PARA LA DETECCION DE ARSENICO.....	35
5.2 METODOS ESTANDAR PARA EL ANALISIS FISICOQUIMICOS DE LAS AGUAS.....	36
5.3 MODELO EXPERIMENTAL PARA LA CUANTIFICACION DE ARSENICO.....	42
5.3.1 METODO COLORIMETRICO DEL DIETIL DITIO CARBAMATO DE PLATA.....	42
5.3.2 METODO DE ESPECTROMETRIA DE ABSORCION ATOMICA.....	43
5.3.3 OTROS METODOS.....	44
5.4 MODELO EXPERIMENTAL PARA LA REMOCION DE ARSENICO.....	45
5.4.1 METODOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS MAS COMUNES.....	45
5.4.2 METODO DE COAGULACION-FLOCULACION.....	51
5.4.2.1 COAGULACION.....	51
5.4.2.2 FLOCULACION.....	54
5.4.3 SALES COAGULANTES.....	57
5.4.4 AUXILIARES DE COAGULACION.....	59
5.4.5 PRUEBAS DE JARRAS.....	59
<b>VI.- RESULTADOS.....</b>	<b>61</b>
6.1 LOCALIZACION EXACTA DE LO POZOS.....	62
6.2 RESULTADOS DE LOS ANALISIS FISICOQUIMICOS.....	62
6.3 RESULTADOS DE LOS METODOS DE REMOCION.....	70
POR COAGULACION (C/S AUXILIARES DE COAGULACION)	
6.4 RESULTADOS DE LA REMOCION DE ARSENICO EN POZOS ANALIZADOS.....	72

<b>VII.- DISCUSION.....</b>	<b>78</b>
<b>7.1 PARAMETROS FISICOQUIMICOS.....</b>	<b>79</b>
<b>7.2 METODOS DE REMOCION.....</b>	<b>83</b>
<b>VIII.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO I: CALCULOS PARA LA EXPRESION DE DE RESULTADOS DE LOS ANALISIS FISICOQUIMICOS.....</b>	<b>87</b>
<b>IX.- BIHLIOGRAFIA.....</b>	<b>89</b>

## **I.- OBJETIVOS.**

v

# **ESTUDIO QUIMICO PARA LA REMOCION DE ARSENICO EN AGUAS POTABLES CONTAMINADAS EN EL DISTRITO MINERO DE ZIMAPAN,HGO.**

## **OBJETIVOS:**

- 1.- Cuantificar el contenido de As en muestras de agua potable contaminadas,obtenidas dentro del distrito minero de Zimapán,Hgo.
  
- 2.- Proponer un método de tratamiento de aguas contaminadas con As,sencillo, barato y fácil de realizar
  
- 3.-Observar si hay una relación existente entre la calidad del agua y la presencia de As
  
- 4.- Realizar pruebas de coagulación para seleccionar la dosificación o cantidad de coagulante necesaria para remover As.
  
- 5.- Verificar la eficacia del proceso de remoción por coagulación.Sin alterar las propiedades organolépticas del agua a tratar.

## **II.- INTRODUCCION**

## **INTRODUCCION:**

A continuación se presenta un estudio de un problema muy serio de contaminación del manto acuífero del Distrito Minero de Zimapán, Hgo producido por la presencia de sales solubles de As. Este problema deberá de ser resuelto en un lapso corto. Por lo cual aquí será necesario revisar algunos de los métodos más comunes de tratamiento de aguas potables para la remoción de As.

Es importante mencionar que el Distrito Minero de Zimapán, posee algunos pozos de aguas con concentraciones de As mayores al límite máximo permisible por las normas internacionales (mayor a 0.05 mg/ L de As en agua de consumo). Donde este exceso de As en el agua puede ocasionar lesiones y daños a largo plazo en la salud humana, que pueden ir de lesiones cutáneas hasta la muerte.

Este problema se ha hecho trascendental principalmente porque la población de escasos recursos, sobre todo los niños y en general es la que está más expuesta a los padecimientos antes expuestos.

Se han analizado a breves rasgos técnicas más apropiadas para la resolución del problema tales como: intercambio iónico, ósmosis inversa y coagulación-floculación.

Resultados previos de los análisis fisicoquímicos muestran que el método de coagulación-floculación, posee unas ventajas como: sencillez de funcionamiento y costo de proceso global. En comparación con otros métodos [intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis] resultan más costosos, además de la complejidad de operación y requieren de personal especializado.

Últimamente entre los problemas geohidrológicos de nuestro país, podemos señalar el que presenta el Distrito Minero de Zimapán, Hgo, pues dadas sus

características ecológicas de la zona, condiciones de explotación del agua subterránea, se ha generado el agotamiento gradual de recurso hídrico y su deterioro posterior al contaminarse con As . Este elemento se encuentra de manera natural asociado con ciertos minerales ,de ahí que los compuestos de As sean disueltos por infiltraciones de agua a yacimientos minerales ocasionando un proceso natural de lixiviación, de donde esta solución de As sea arrastrada a los mantos acuíferos. El incremento en la demanda de agua ,como resultado de crecimiento demográfico y económico producido por un desarrollo industrial, ha ocasionado un aumento en el consumo de agua.

Los mantos acuíferos del Distrito donde aflora el agua subterránea, en algunos pozos ha descendido en su nivel varios metros ,debido al agua extraída del subsuelo para atender la demanda actual de la población, hasta hoy ,el agua (contaminada por As) debe de ser extraída de profundidades considerables [ 50-100m ],lo cual tiene un costo económico y social muy alto, donde tanto la población rural, así como de los alrededores de pueblo de Zimapán, tiene que abastecerse del agua proveniente de estos pozos, para sus necesidades domésticas, lo que ha ocasionado daños a la salud pública, ya que parte de la población ya padece de trastornos somáticos, así como de lesiones de piel y manos (cáncer palmoplantar), ocasionado esto por una intoxicación crónica de As.

El problema es grave, ya que la población de la zona rural y de escasos recursos se abastece de la única fuente de agua disponible, extraída del subsuelo, la cual contiene cantidades de As mayores al límite máximo permisible de As, la cual al ingerirse por períodos prolongados provoca serios daños a la salud, padecimientos que con el tiempo pueden tener consecuencias fatales. Para evitar en lo posible, estos problemas de salud, es necesario investigar la posibilidad

**III.-ANTECEDENTES.**

### 3.1 GENERALIDADES DEL ARSENICO:

El arsénico ( conocido en latín como arsenicum ,en griego arsenikon,oropimente amarillo, también conocido como arsenikos= macho; a partir de la creencia de que los metales poseían sexos diferentes ; en árabe az-zemikh, arsenikon o arrehenicum= audaz o valiente). Este elemento tiene un peso atómico de 74.921 g/mol ,un número atómico de 33, valencias posibles : -3, 0, +3, +5 , tiene una densidad de 5.73 g/cm<sup>3</sup> .<sup>1,3</sup>

Tiene una configuración electrónica de (Ar) ,3d<sup>10</sup> , 4s<sup>2</sup> ,4p<sup>3</sup> .

Ya era conocido desde la antigua Grecia , ya que lo citan Aristóteles , Teofrasto y Dioscórides ;ya que ellos 3 distinguieron el rejalgal del oropimente ( minerales de sulfuros de As utilizados como pigmento desde entonces). En 1250 Alberto Magno lo aisló del oropimente , describiendo su obtención con el nombre de : bastardo de los metales por su carácter semimetálico . En 1646 Schröder publicó 2 métodos de obtención de As por reducción del sulfuro y/u óxido ; se representó al As como una serpiente enroscada en 2 círculos pequeños, unidos por un corto segmento.<sup>2</sup>

Se encuentra libre en la naturaleza sólo en pequeñas cantidades. Combinado con el azufre constituye los minerales rejalgal y oropimente , a menudo acompaña a minerales de :Ni, Cu, Ag, Pb, Sn; siendo la cantidad total mundial estimada de As de 5x10<sup>-4</sup> % en peso de la corteza terrestre. En México el As procede de los subproductos del beneficio de los minerales de Pb y Ag , aunque existe As nativo en el municipio de Tlataya, Edo de México, en el lago de Texcoco existen pequeñas cantidades de H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub> solubilizado. En Torreón Coah , Zimapán Hgo, así como en algunos lugares de la serranía de Puebla existe As disuelto en agua , de origen natural .<sup>2</sup>

El As es un elemento relativamente escaso en la naturaleza, ocupa el 21<sup>er</sup> lugar en abundancia y se encuentra como constituyente de 254 especies minerales diferentes ; entre los cuales podemos destacar: arsenopirita (FeAsS), arsenolita ( As<sub>2</sub> O<sub>3</sub> ) , cobaltita ( CoAsS ) , leucopirita ( FeAs<sub>2</sub> ) , rejalgal ( As<sub>4</sub> S<sub>4</sub> ) , oropimente ( As<sub>2</sub> S<sub>3</sub> ) , proustita ( Ag<sub>6</sub> As<sub>2</sub> S<sub>6</sub> ) y osmaltita ( CoNiAs<sub>2</sub> ) . El As está tan difundido en la

naturaleza que se encuentran indicios de él en todas partes, **EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION** establece que la concentración máxima permisible de As en aguas para consumo humano es de: 0.5 mg/ L.<sup>4</sup>

Los principales países productores de As en el mundo son: Alemania, China, Estados Unidos, Francia, México, Namibia, Perú, Suecia y Rusia.<sup>2,6</sup>

El As elemental existe en 3 formas (alótropos): metálico, amarillo y negro.

As amarillo (forma  $\alpha$ ): Tiene una estructura romboédrica, alótropo muy inestable, sublima a bajas temperaturas, basta la temperatura corporal, expuesto a la luz solar se transforma a la variedad negra. Insoluble en agua, soluble en  $CS_2$ . Es inestable en contacto con el aire, arde con luminiscencia a 200°C

As metálico o gris (forma  $\gamma$ ): Tiene una estructura romboédrica, la variedad más estable a la temperatura ambiente, sólido gris, sublima a 610° C dando un vapor amarillo con olor a ajos, a 215° C en parte cambia a As negro (espejo de As). La forma  $\gamma$  o metálica es un buen conductor de calor, pobre conductor de electricidad, insoluble en agua pero da dispersiones coloidales. Cuando es quemado en el aire rápidamente se oxida al trióxido ( $As_2O_3$ ), dando un olor a ajos. Es un semimetal o metaloide, ya que posee propiedades anfóteras.

Al arsénico lo oxidan:  $HNO_3$ ,  $H_2SO_4$  para dar  $H_3AsO_4$ , reacciona con HCl en presencia de agentes oxidantes para dar también  $H_3AsO_4$ ; es soluble en soluciones concentradas y calientes de NaOH y KOH para dar arsenitos ( $AsO_2^-$  y  $AsO_3^{3-}$ ). Estas reacciones se dan con más intensidad en el alótropo amarillo.<sup>1</sup>

Los estados de oxidación más comunes del As son:

$As^{3+}$ : es el más estable, más aún en soluciones muy ácidas ( $As_2O_3$ ,  $As_2S_3$ ).

$As^{5+}$ : presente al reaccionar con oxidantes o halógenos ( $AsF_5$ ,  $H_3AsO_4$ ).

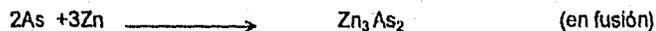
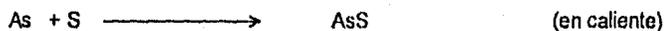
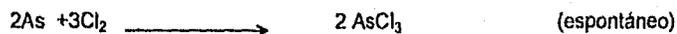
$\text{As}^{3-}$  : hidruros o arseniuros inestables, fáciles de hidrolizar ( $\text{AsH}_3$ ,  $\text{Na}_3\text{As}$ ).

$\text{As}^0$  : arsénico elemental.

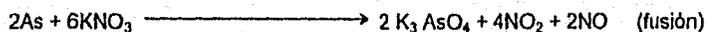
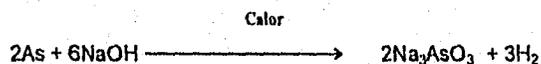
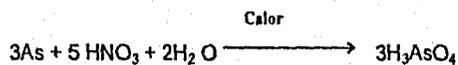
Conducta química del As:

Reacciones típicas del As:

Con elementos:



Con compuestos:





Pentóxido de arsénico  $\text{As}_2\text{O}_5$  : Polvo blanco delicuescente, P.M 232.84 g/mol, p.f  $315^\circ\text{C}$  (descompone) , muy soluble en agua y alcohol; tóxico, se absorbe por inhalación e ingestión.

Tricloruro arsenioso  $\text{AsCl}_3$ : Líquido aceitoso incoloro, P.M 181.28 g/mol, p.f -  $8.5^\circ\text{C}$ , p.eb  $130.5^\circ\text{C}$ , soluble en agua y HCl, muy tóxico, se absorbe por inhalación e ingestión.

Disulfuro de arsénico  $\text{As}_2\text{S}_2$ : Cristales amarillos, P.M 213.97g/mol, p.f  $267^\circ\text{C}$ , p.eb  $565^\circ\text{C}$ , soluble en soluciones de sulfuros alcalinos y de  $\text{NaHCO}_3$  ; tóxico , se absorbe por ingestión e inhalación.

Tribromuro de arsénico  $\text{AsBr}_3$ : Cristales amarillos ,P.M 314.65 g/mol, p.f  $32.8^\circ\text{C}$ , p.eb  $221^\circ\text{C}$ , soluble en HBr,HCl , $\text{CS}_2$  ;muy tóxico , se absorbe por ingestión.

Triyoduro de arsénico  $\text{AsI}_3$ : Cristales rojo-naranja, P.M 455.64 g/mol, p.f  $146^\circ\text{C}$ , p.eb  $403^\circ\text{C}$ , solubles en: alcohol, éter, benceno,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{CHCl}_3$  ; tóxico, se absorbe por inhalación e ingestión.

Acido arsénico  $\text{H}_3\text{AsO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$  : Cristales incoloros, P.M 151g/mol, p.f  $35.5^\circ\text{C}$ , p.eb  $160^\circ\text{C}$ , muy solubles en agua y alcohol ; tóxico, se absorbe por inhalación e ingestión.

### 3.2.1 USOS DE ALGUNOS COMPUESTOS DE ARSENICO:<sup>3</sup>

As elemental : conductores de electricidad,producción de fotoconductores , aleaciones con Pb en forros de cables .

Trióxido de arsénico  $\text{As}_2\text{O}_3$  : fabricación de plaguicidas, agente de coloración en la industria de vidrios, se emplea para preservar cueros y madera, uso veterinario; en medicina para combatir: enfisema pulmonar, anemia, enfermedades de la piel, dermatitis, bronquitis, asma, neoplasias malignas de la piel.

Pentóxido de arsénico  $\text{As}_2\text{O}_5$ : defoliante en el cultivo de algodón, conservador de la madera.

Acido arsénico  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ : medicina veterinaria: enfermedades de la sangre y de la piel.

Arseniato de calcio  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ : insecticida, larvicida, herbicida.

Arseniato de plomo  $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$ : plaguicida, herbicida, regulador del crecimiento vegetal.

Arsenito de cobre  $\text{Cu}_3(\text{AsO}_2)_2$ : pigmento, fungicida, rodenticida, preservativo.

Arseniato diácido de potasio  $\text{K}_2\text{HAsO}_4$ : conservador de cueros, industria textil, industria química

Arseniato de sodio tribásico  $\text{Na}_3\text{AsO}_4$ : conservación de la madera, baños anti-parásitos.

Arsenito de potasio  $\text{KH}(\text{AsO}_2)_2$ : en medicina para tratar leucemias y lesiones cutáneas.

Arsenito de sodio  $\text{NaAsO}_2$ : herbicida, plaguicida, en conductos de petróleo.

Tricloruro de arsénico  $\text{AsCl}_3$ : industria cerámica, síntesis química.

Triyoduro de arsénico  $\text{AsI}_3$ : en medicina contra la dermatitis crónica y artrósisis crónica.

Sulfuros de arsénico  $\text{As}_2\text{S}_2$  -  $\text{As}_2\text{S}_3$ : pigmentos para pinturas, municiones para armas de fuego, teñido e impresión de telas, curtido de pieles y cuero, depilatorios.

Derivados organoclorados del As: herbicidas, gases de guerra.

### 3.3 CICLO DEL ARSENICO EN EL ECOSISTEMA:

#### 3.3.1 FUENTES DEL ARSENICO EN EL MEDIO AMBIENTE:<sup>5,6,7,11,12</sup>

**1.- MINERALES:** En los minerales hay elevadas concentraciones de As. El contenido de As en la corteza terrestre es de :2-5 mg/ kg de mineral.

**2.-AIRE:** La exposición ocupacional al As es por inhalación de partículas que pudieran contener este elemento, tal riesgo lo corren los trabajadores de las industrias metalúrgicas y los que manipulan pesticidas arsenicales. Se han reportado concentraciones aproximadas de As de 1 mg/ m<sup>3</sup> en estas áreas de trabajo, con inhalación diaria de 20µg de As por día laborable, la cantidad de As inhalado en áreas no contaminadas es menor de 0.05µg , suponiendo que aproximadamente 20 m<sup>3</sup> de aire son inhalados diariamente por cada individuo.

**3.- AGUA:** La concentración y especies de As en el agua varían en diferentes partes del mundo , así en algunos casos contiene algunos µg /L de As inorgánico, mientras que en otros lugares exceden de 1mg/L , llegando inclusive a 10 mg / L. En ocasiones procede de forma natural, pero en otros casos es resultado de una contaminación industrial.

**4.- ALIMENTOS:** El As esta presente en alimentos siempre en concentraciones menores de 1 mg/kg , ya que puede ser un constituyente natural de ellos .Sin embargo en algunos alimentos de origen marino puede llegar a concentraciones de 5mg/ kg e incluso en algunos crustáceos puede superar la decena de mg/ kg . En las especies marinas puede formar compuestos orgánicos con una gran estabilidad química, en ocasiones puede llegar a estar presente en los vinos , donde existe como forma trivalente , indicando así , una probable contaminación por pesticidas.<sup>14</sup>

**5.- MEDICAMENTOS:** El arsenito de potasio ( solución de Fowler) es utilizado para tratar la leucemia y asma. También es utilizado como tónico. Los arseniatos de sodio son utilizados en enfermedades crónicas de la piel y para ciertas anemias. El salvarsán (Arsfenamina) antiguamente fue utilizado en el tratamiento de la sífilis.

### 3.3.2 PRESENCIA DEL ARSENICO EN LA NATURALEZA

El As en el agua puede encontrarse en forma natural acompañando a minerales , en ocasiones en concentraciones muy elevadas , debido a su presencia en ciertas regiones del planeta o por procesos de erosión y vulcanismo. Bajo condiciones especiales de lixiviación se libera al As en solución acuosa , ya sea como producto de infiltración de licores arsenicales hacia los mantos acuíferos, o bien la filtración y lenta disolución de polvos arseniados que se han depositado sobre las paredes y fondo del manto acuífero.

La solubilidad de As en el agua es tan baja que su presencia es un indicador de operaciones mineras en lechos de ríos . Las leyes federales limitan su contenido en fuentes de agua para consumo humano a un máximo de 0.1 mg/ L de As total. Toda agua que se infiltra en el suelo esta contaminada hasta cierto punto , pero puede volver a ser satisfactoria para usos domésticos y otros empleos humanos. Como una regla el As siempre se encuentra en concentraciones elevadas en aguas termales; comparte características comunes con el fósforo, de tal manera que un incremento en la concentración de P , se puede traducir en un incremento de concentración de As tanto en agua y suelo. El As, en comparación con el fósforo , posee una mayor solubilidad en el agua y un menor grado de absorción , precipitación y oclusión <sup>7,12,21</sup>.

En el distrito a estudiar (Zimapán Hgo) , podemos proponer la existencia de un ciclo. En este ciclo el eje principal es el agua de origen subterráneo ,ya que afecta el desarrollo del hombre, animales y plantas. Se observa que el hombre es el más afectado ya que está más expuesto directamente ( consumo de agua contaminada) e indirectamente ( consumo de animales y plantas de la región).

En este distrito la presencia de As es de origen natural, ya que proviene de agua que lava a los minerales. El agua tiene un carácter ligeramente alcalino, ocasionando esto una lixiviación continua de corrientes subterráneas sobre los minerales que contienen As, donde el As es soluble en soluciones alcalinas ;se sabe que existe arsenopirita ( FeAsS), y que el As esta asociado a minerales de Pb y Ag , muy frecuentes en la región. Este lixiviado arseniado atraviesa diferentes capas geológicas ; de aquí , el por qué ciertos pozos de una misma región están más concentrados en As que otros. Posteriormente, el hombre utiliza esta agua para su consumo y de esta manera provocarse graves problemas de salud.

Los compuestos de As más comunes en el distrito de Zimapán son :  $As_2O_3$ , arsenitos de metales relacionados con los minerales existentes (arsenitos de Ag,Pb y Zn), dando como resultado una prevalencia de la especie trivalente. Se sabe que el trióxido es muy tóxico, así como los arsenitos salinos. Este trióxido es ligeramente soluble en agua , por lo cual se considera como la principal fuente de As en esta región.

**TABLA 2: ARSENICO EN MATERIALES DE LA CORTEZA TERRESTRE <sup>5</sup>**

TIPO DE ROCA:	CONCENTRACION (mg/kg)
Roca ígnea	
Ultrabásico	0.3-16
Basaltos	0.06-113
Andesitas	0.5-5.8
Graníticas	0.2-13.8
Volcánicas silíceas	0.2-12.2
Rocas sedimentarias	
Piedras de cal ( limolita)	0.1-20
Piedras de arena ( arenisca)	0.6-120
Pizarras y arcillas	0.3-490
Fosfóricas	0.4-188

### 3.4 TOXICIDAD DEL ARSENICO:

**TABLA 3 : CATEGORIA DE TOXICIDAD ESTIMADA SEGUN LA O.M.S. <sup>5</sup>**

GRADO DEL TOXICO:	DOSIS LETAL EN HUMANOS
No tóxico	15 g/kg
Ligeramente tóxico	5-15 g/kg
Moderadamente tóxico	0.5-5 g/kg
Muy tóxico	50-500 mg/kg
Extremadamente tóxico	5-50 mg/kg
Super tóxico	menores a 5 mg/kg

**TABLA 4: NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES RECOMENDADOS POR LA O.M.S Y  
LA O.P.S <sup>5,39</sup>**

Arsénico presente en:	niveles recomendados:	unidades:
aire	0.01- 1.6	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
agua de océanos	0.001- 0.008	mg/ L
ríos naturales	0.01-1	mg/ L
ríos con hidroarsenicismo	0.21-12.6	mg/ L
suelo	0-2	mg/kg
suelos contaminados	hasta 40	mg/kg
alimentos	menores de 1	mg/kg
alimentos marinos	1-10	mg/kg

Una cantidad tan pequeña como 100 mg de As puede ocasionar un envenenamiento grave ; pueden aparecer efectos crónicos por acumulación de niveles repetidos bajos de As. La concentración de As en agua rara vez excede de los 10  $\mu\text{g}/\text{L}$  .De manera natural el As presente puede existir como pentavalente , relativamente poco tóxico , pero que en contacto con material orgánico,se reduce a la forma

trivalente , mucho más tóxico . Podemos decir a grandes rasgos que la adsorción de compuestos de As se realiza a través de : piel, pulmones, aparato gastrointestinal ; aunque el As se encuentre en varios tejidos en cantidades muy pequeñas , no tiene alguna función fisiológica conocida. 6.<sup>13,14</sup>

El riesgo por intoxicación debido a As se relaciona con su presencia en el ambiente , concentraciones de As de 0.3-0.5 mg/ L en el agua son suficientes para el desarrollo de una intoxicación , existen ciertos factores aún sin identificar que hacen que algunos individuos de una misma región expuesta no desarrollen síntomas , en una población expuesta hay que tomar en cuenta la forma en la cual se presenta el As.<sup>13,15</sup>

El As actúa coagulando proteínas, forma complejos con las coenzimas , inhibe la producción de ATP, agente secuestrante de sulfuros , sustituye al fósforo en muchos procesos bioquímicos con efectos metabólicos adversos.Los compuestos orgánicos de As son mucho menos tóxicos que las sales inorgánicas , además  $As^{3+}$  es mucho más tóxico que  $As^{5+}$ .Se sabe que el efecto carcinogénico de  $As^{3+}$  es debido a que inhibe los procesos de multiplicación a nivel del DNA y bloquea los mecanismos de reparación , ocasionado por fenómenos de la unión de As en los puentes disulfuro.<sup>13,14</sup>

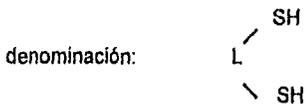
#### ***Mecanismos de acción toxicológicos:***

$As^{3+}$ : Se une a los grupos -SH de las células , afectando los tejidos ricos en sistemas oxidativos,para formar complejos , así las enzimas cofactores que posean grupos -SH serán inhibidos por la presencia de  $As^{3+}$  . Entre las reacciones bioquímicas inhibidas más importantes podemos destacar: descarboxilación oxidativa de los ácidos cetónicos (ácido pirúvico) , algunos de los efectos del  $As^{3+}$  se atribuyen a esta inhibición. <sup>13,14,16</sup>

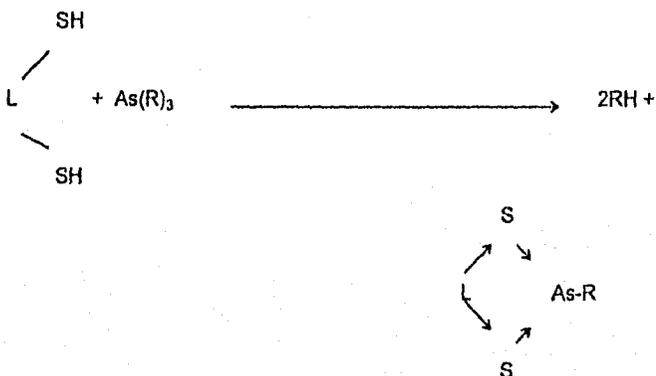
El  $As^{3+}$  bloquea la descarboxilación del ácido pirúvico , debido a que se combina con los grupos -SH del ácido lipoico (ácido 6,8-ditiooctanoico) , inhibiéndose así la descarboxilación , deteniendo el ciclo de Krebs, acumulándose el ácido pirúvico.<sup>14,18</sup>

**ESQUEMA 1: MECANISMO DE ACCION DE As<sup>3+</sup>**

Donde el ácido lipoico: SH-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH(SH)-(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>-COOH



Reacción de interferencia debido a la presencia de As trivalente:

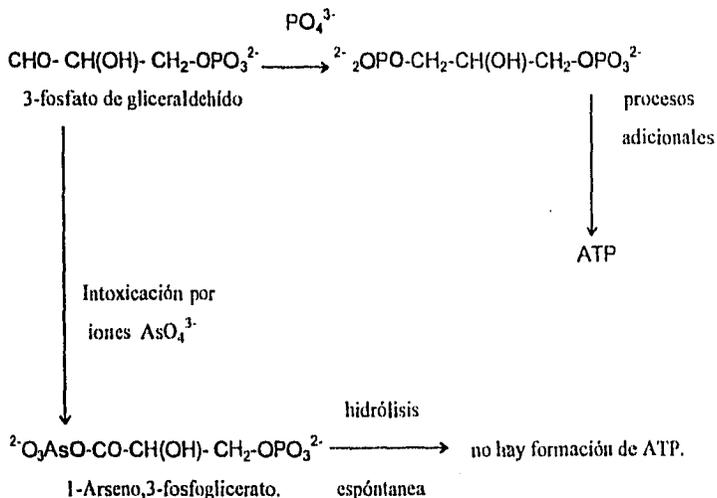


**CONSECUENCIA:** Inhibición del proceso de glucólisis por inactivación de descarboxilación del piruvato.

As<sup>5+</sup>: Ocasiona trastornos del mecanismo metabólico glucídico-lípido, actúa como desacoplante en la fosforilación oxidativa (producción de energía metabólica), ya que las células lo confunden con los iones PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.<sup>6,16</sup>

## ESQUEMA 2: MECANISMO DE ACCION TOXICOLOGICO DEL $As^{5+}$ :

Interferencia de la fosforilación oxidativa por los arseniatos:



### 3.4.1 ARSENICO COMO RIESGO DE SALUD EN MEXICO:<sup>4,6,21</sup>

#### 1.- Población de alto riesgo:

- Personas que vivan en regiones con contaminación natural de aguas y suelos con As, con riesgo de hidroarsenicismo crónico regional endémico.
- Población en regiones mineras donde se sabe que existe As.
- Poblaciones aledañas o colindantes con regiones industriales donde manipulen As.

#### 2.- Cuidados y precauciones:

- Si hay contacto con As, lavado local con agua durante 15 min, utilización de agua con jabón o detergente.

- b) Remoción de ropas contaminadas con As.
- c) Evaluación de los posibles daños producidos y niveles sistémicos del As en el organismo.

### **3.- Control periódico de As a nivel general:**

- a) Determinación periódica de concentración de As en aguas destinadas a consumo público, suelo y alimentos.
- b) Evaluación de cantidades diarias absorbidas por cada individuo.
- c) Control del agua , en regiones donde se sabe existe el problema de hidroarsenicismo.
- d) Determinación de As en poblaciones expuestas.
- e) Identificación y control de fuentes y/o procesos generadores del As soluble.

#### **3.4.2 ABSORCION Y TIPOS DE EXPOSICION <sup>6,15,23,43</sup>**

*Absorción:* Las formas de absorción son:

- a) Inhalación de polvo con 50% de As absorbido(vía aérea).
- b) Ingestión con un 80% de As absorbido(vía oral).
- c) Absorción dérmica.

La mayor parte de As que se encuentra en el medio ambiente es inorgánico. En el agua , el estado de oxidación de As se ve afectado por diversos factores: temperatura, pH, salinidad, y presencia de luz.

El As se absorbe a través del sistema respiratorio y dependiendo de la solubilidad del material inhalado se puede depositar en sus paredes; en el caso de ingerir agua contaminada de As, soluciones de sales de As , alimentos o medicamentos con As; los compuestos inorgánicos de As son fácilmente absorbidos después de su ingestión ,absorbible a través de la piel; también existe transferencia placentaria ya que el As puede atravesar la barrera placentaria y produce concentraciones importantes de As en el feto.

***Tipos de exposición:*** 6.8.16.21

**a) Ocupacional:** Existe siempre un riesgo por intoxicación para cualquier persona expuesta a compuestos de As en un ambiente ocupacional, esto se debe a las posibilidades de transformación química de los compuestos de As, en lo laboral , casi siempre la especie de As es inorgánica.

**b) Natural:** Ocurre mediante la presencia de As en el medio ambiente natural y que este en contacto con el hombre; en el aire ,se debe su presencia a la existencia de plantas químicas que manipulan As o industrias mineras que laboran al aire libre; en el agua se debe su presencia a una contaminación por desechos industriales o contaminación de origen natural en una determinada área geográfica, en el suelo su presencia se debe a contaminación por plaguicidas o herbicidas utilizadas en los cultivos.

No se ha determinado la cantidad y/o tiempo necesario de exposición para causar un daño, ya que existen individuos que pueden tolerar altas cantidades de As en una dosis, aunque esto no es válido para una comunidad afectada , pues esto corresponderá a una intoxicación aguda pero repetitiva.

### **3.4.3 METABOLISMO DE ARSENICO EN HUMANOS**

El metabolismo del As es muy complejo, ya que su destino en el cuerpo humano varía con el tipo de compuesto que se trate. Las concentraciones de As distribuido en los tejidos humanos son normalmente bajas , niveles elevados se

encuentran en : piel, cabello, uñas. El As se absorbe bien por vía respiratoria, más aún si se trata de compuestos inorgánicos.<sup>15</sup>

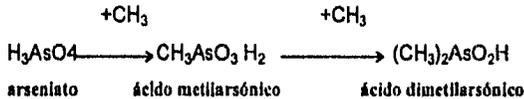
La mayoría de especies animales, incluyendo el humano excretan en un término de 24 hrs más del 85% de la dosis administrada de As. La vida media de As en el humano depende del tipo de As existente; ya que para As inorgánico su vida media es de 10 hrs aproximadamente, en el caso de As orgánico, su vida media es de 30 hrs y en el caso de As de origen marino su tiempo de vida media es de 20 hrs. El As es transportado por las proteínas plasmáticas y su destino en el organismo puede depender de dicho transporte. Al principio el As se concentra en : hígado, riñones, pulmón y bazo; se distribuye a través de : sangre, hígado y riñones, posteriormente disminuye en estos tejidos y comienza a elevarse en tejidos ectodérmicos , sobre todo la piel ; por último se almacena una pequeña cantidad durante un largo tiempo , sobre todo en pelos y uñas, es acumulativo cuando se repite a la exposición a este tóxico.<sup>16,21,23</sup>

La biometilación y bioreducción son las transformaciones ambientales que se realizan en el elemento produciendo especies organoarsenicales, altamente estables; sin embargo .los compuestos biometilados pueden estar sujetos a desmetilación bacteriana que los transforma a su forma inorgánica. La aparición de ácidos metilarsónicos en agua de mar o de ríos está asociada a la actividad metabólica de plantas presentes en estos medios.<sup>21,23</sup>

La metilación de As inorgánico se efectúa casi después de la inhalación o ingestión de sales de As. Las especies excretadas en la orina humana son: ácido dimetilarsónico ( 65%) , ácido metilarsónico (20%); la absorción de compuestos organoarseniados es rápida cuando éste procede de alimentos marinos y menos rápida cuando procede de alimentos donde las sales de As fueron utilizadas como aditivos o contaminaron al mismo alimento. En el humano un 70-80% de As orgánico proveniente de alimentos marinos es rápidamente excretado por la orina. Los diversos compuestos orgánicos provenientes de otras fuentes muestran diversos grados de absorción, transformación y retención . Se demostró que los compuestos orgánicos de As provenientes de alimentos marinos son difícilmente metabolizados a otros compuestos en el ser humano y son eliminados en la orina sin ser biotransformados.

Con el tiempo los depósitos finales de As son los huesos y los músculos , el As tiene el poder de atravesar la barrera placentaria y causar daño al feto. Los arsenitos tienen una forma de excreción biliar, mientras que los arseniats se excretan en forma renal, se acumulan en uña y pelo por lo cuál éstos son de importancia en un análisis toxicológico.<sup>21,23</sup>

**Reacción de biometilación en el organismo humano:**



**3.4.4 CUADRO CLINICO POR INTOXICACION DEBIDA AL ARSENICO.**

El As como un contaminante de agua , puede producir diversos estados patológicos con manifestaciones locales y sistémicas, no se ha determinado la cantidad y/o el tiempo necesario de exposición para causar un cuadro clínico ; la especie química más estable de As es el arseniato ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ), aunque el arsenito esta presente como 1/3 parte del As total existente.

La cantidad de As que se considera tolerable en el caso de ingestión por consumidores del reino animal se encuentra en el intervalo de : 1-12 mg/kg de peso vivo ; variando la toxicidad del compuesto ingerido en función de su fórmula química , solubilidad, vía y tiempo de exposición ,resistencia particular de un organismo . Los efectos toxicológicos se relacionan estrechamente con el estado de oxidación del As . En el caso de la especie más tóxica y más conocida (trióxido) , la dosis letal de  $\text{As}_2\text{O}_3$  en seres humanos es de 70-180 mg (variable entre individuos),120 mg (fijado por normas médicas internacionales).<sup>4,8,9,10</sup>

Entre los daños principales podemos mencionar : lesiones de la mucosa estomacal, hemólisis intravascular, lesiones degenerativas de hígado y riñón ,lesiones

dérmicas ,alteraciones digestivas , alteraciones vasculonerviosas, anemia, leucopenia, trastornos metabólicos. 4.15.16.18

Los efectos agudos generalmente vistos únicamente después de la ingestión de una gran dosis de sales de As o inhalación de  $AsH_3$  ;ya sea accidental, suicida u homicida. A grandes rasgos los siguientes órganos y/o sistemas son los afectados:

**Síntomas mas comunes:**<sup>4.15.16</sup>

Sistema nervioso central: polineuritis, parestesias ( dolores quemantes de manos y pies), náuseas, convulsiones, coma., neuritis periféricas de las extremidades, dolor, parálisis

Piel: bronceamiento, alopecia, eritema localizado y dermatitis, melanosis, hiperhidrosis.

Sistema digestivo: cirrosis hepática, náuseas, vómitos, salivación, calambres abdominales, dificultad para tragar, malestar estomacal generalizado, diarrea ,pérdida del apetito.

Sistema cardiovascular: insuficiencia cardíaca, paro cardíaco, colapso sistémico, hipotensión.

Riñones: nefritis crónica, edema.

Efectos generales: anemia, pérdida de peso, ictericia.

Organos de la visión: deterioro de la visión, atrofia del nervio óptico, conjuntivitis, úlcera corneal.

Manifestaciones agudas por ingestión de sales de As: Gastrointestinal ( vómitos, diarrea, dolor abdominal), Sistema Nervioso Central ( cefalea, convulsiones, pérdida del conocimiento, coma) ,hemorragias , puede ocurrir la muerte dentro de las primeras 48 hrs después de ingerir sales de As

Manifestaciones agudas por inhalación de arsina ( $AsH_3$ ) : hemólisis intensa, orina oscura, ictericia, oliguria, anemia, falla miocárdica.

Manifestaciones crónicas : Estas se dan en diversos órganos, : piel, mucosas, S.N.C, sangre, efectos genéticos.

El depósito de As en pelo y uñas es una forma de excreción y no de acumulación. Se ha demostrado que el As y sus compuestos derivados son potenciales agentes cancerígenos para: piel, pulmones, hígado, vejiga y probablemente otros órganos; se creó que As inhibe los procesos de multiplicación celular a nivel del DNA , bloquea los mecanismos de reparación al unirse el As a los azufres del puente disulfuro de la cadena del DNA. Es un agente teratógeno. es también un agente mutagénico ya que ocasiona aberraciones cromosómicas porque interfiere con el proceso normal de reparación del DNA

**TABLA 5: SINTOMAS MAS COMUNES POR INTOXICACION DE LAS ESPECIES DE As,<sup>16</sup>**

Especie de Arsénico:	Signos o lesiones más comunes:
trivalente ( $As^{3+}$ )	hiperqueratosis palmoplantar, cáncer pulmonar
pentavalente ( $As^{5+}$ )	cáncer cutáneo, hiperpigmentación de la piel.
metilado ( $CH_3-AsR_2$ )	vasculopatía periférica.

#### **3.4.5 HIDROARSENICISMO CRONICO REGIONAL ENDEMICO:<sup>6,19,40,41,42</sup>**

La contaminación natural de aguas para abastecimiento público con As en algunas regiones de América ha generado una gran cantidad de casos de intoxicación. La constancia con que se ha presentado este fenómeno en localidades de : Argentina, Chile y México constituye un problema de salud pública de gran significación. Además existe en: Japón, Taiwán, Alemania, Estados Unidos y Canadá.

El problema ha sido detectado por primera vez en Argentina desde 1913 , después de ver ciertas lesiones características ( queratosis palmoplantar,

melanodermia, epitelomas) , donde todos los afectados presentaban : hiperhidrosis, hiperqueratosis, infecciones recurrentes, ulceraciones que no curan , cáncer, donde existen lesiones más graves con un mayor tiempo de exposición.

**TABLA 6 : REGIONES DE AMERICA CON HIDROARSENICISMO**

**COMPROBADO<sup>6,19</sup>**

País	Zona afectada:
Estados Unidos	Alaska, Nevada, California, Oregon
Canadá	Nueva Escocia
Argentina	Córdoba
Chile	Antofagasta
México	Torreón, Zimapán, Zona NE de Puebla (Sta Cruz Achichiplico).

En una población que habitualmente ingiere agua contaminada con As a niveles más allá del nivel máximo permisible ( 0.05 mg/ L ) , aparece en un individuo una hiperpigmentación en la piel no expuesta al sol, así como una vasculopatía periférica que a largo plazo provocará gangrena en las extremidades ( enfermedad del pie negro ) ; las manifestaciones de neuropatía por As podemos citar: pérdida de sensibilidad en las extremidades, modificaciones de posturas y posición, debilidad muscular y parálisis.<sup>19</sup>

El cáncer de piel se observa en poblaciones que ingieren agua contaminada con As de manera periódica, el período de latencia puede ser más allá de 24 años, a menudo la enfermedad evoluciona inexorablemente para terminar en cáncer; se debe considerar el hidro arsenicismo como un problema de salud pública que disminuye la calidad y esperanza de vida. En casos de hidroarsenicismo el historial clínico puede aparecer desde la fecha de nacimiento o de llegada del individuo a la comunidad hasta la aparición temprana de los síntomas , pueden pasar de 6 a 23 años ; en todos los casos el cuadro clínico fue de evolución crónica , con etapas de activación y largos períodos de estabilidad ; como prueba de laboratorio característico cabe señalarse un descenso de hemoglobina y colesterol en pacientes femeninos , y una alteración proteica.<sup>40,41,42,44,45</sup>

#### **IV.- LOCALIZACION Y UBICACION DEL AREA**

## IV.- LOCALIZACION Y UBICACION DE LA ZONA DE ZIMAPAN

### 4.1 CARACTERISTICAS GEOFISICAS <sup>25,26</sup>

El Distrito Minero de Zimapán, Hgo se encuentra situado sobre la carretera México-Ciudad Valles- Nuevo Laredo , a 207 km de la Ciudad de México, en el lado occidental del estado de Hidalgo ,límitrofe con el estado de Querétaro, zona centro parte SE de la República Mexicana, el Distrito tiene un relieve máximo de 1500m desde el fondo del río Tolimán, hasta la cima del cerro del Monte, el clima es templado seco (Cw ), la vegetación y forma topográfica es la típica de una región semiárida de la Mesa Central de México.<sup>25</sup>

La zona comprendida entre México D.F y Zimapán Hgo cruza la parte centro-oriental de la provincia fisiográfica de la Mesa Central y una parte de la Sierra Madre Oriental ; está constituida por montañas de rocas del mesozoico plegadas y cortadas por profundos cañones. La zona comprendida entre Zimapán, Hgo y Fachuca, Hgo está comprendida dentro de la cuenca del río Tula , el cual con sus tributarios : los ríos Salado y Actopan forman una serie de valles interconectados cuyo región es conocida como: **Valle del Mezquital**.<sup>25</sup>

Entre los rasgos fisiológicos más importantes del distrito podemos destacar: se encuentra en el Altiplano Mexicano, en las estribaciones occidentales de la Sierra Madre Oriental, es un abanico aluvial del río Tolimán, a su vez afluente del río Moctezuma (zona límite de Hidalgo-Querétaro) .El patrón de desagüe en Zimapán está controlado por la litología , la zona tiene un aspecto rectangular producido por los arroyos que desaguan paralelos a los estratos calcáreos.<sup>25</sup>

#### 4.1.1 ESTRATIGRAFIA:

Las rocas más antiguas expuestas a lo largo del camino México-Zimapán son areniscas impuras, lutitas filíticas, calizas del Jurásico Superior. Un conglomerado de caliza con matrices de arcilla roja y CaCO<sub>3</sub> suelen también existir ; contiene: basalto, andesita y toba, en Zimapán se denomina a este conjunto: **Conglomerado del Morro**.<sup>26,31</sup>

Rocas volcánicas de la época Oligoceno-Mioceno están intrusionados por diques existiendo alteraciones y mineralizaciones hidrotermales, consta de andesita

de grano fino y basalto. Este tipo de roca existe en la zona de las Espinas en el distrito de Zimapán.<sup>26,27</sup>

Las rocas del distrito varían en edad desde el Jurásico Superior hasta el actual, está compuesto por capas de lutita filítica de color gris , intraestratificada con capas calizas , una capa de 1000m de espesor de caliza gris con algunos nódulos de pedernal , se alterna con capas de caliza fosilífera , a continuación sigue otra capa de 1000m de caliza gris mezclada con lutita calcárea de color pardo , sigue una capa de 400m de fanglomerado constituido por fragmentos de rocas de la época Cretácico Superior , una capa de 375m de lavas andesíticas y basálticas, así como por tobas y conglomerados , finalmente una capa de fanglomerado con fragmentos de guijarros, guijones, guijas de calizas de la época Cretácico Superior.<sup>26</sup>

Los yacimientos disponibles del distrito están íntimamente relacionados con cuerpos intrusivos monzoníticos; existen 2 tipos de yacimientos minerales: a) los de reemplazamiento en caliza y b) vetas a lo largo de fallas de caliza arcillosa, rocas volcánicas y monzonitas.<sup>27,31</sup>

#### **4.2 YACIMIENTOS MINERALES EXISTENTES.**

Todos los yacimientos comprendido dentro de este distrito guardan una estrecha relación con los cuerpos intrusivos de monzonita y cuarzmonzonita. La gran mayoría de producción minera-metálica de este distrito procede de yacimientos en reemplazamiento en calizas o yacimientos mesotermales.<sup>27,48</sup>

**Tipos de yacimientos existentes:**<sup>27,31,32</sup>

**Yacimientos pirometasomáticos:** sulfuros metálicos ( esfalerita, pirita, galena, arsenopirita, pirrotita, calcopirita y jamesonita).

**Yacimientos mesotermales:** esfalerita, pirita, galena, arsenopirita, pirrotita, calcopirita.

**Sulfuros:** pirita, esfalerita, galena, pirrotita, arsenopirita, calcopirita, plumbojarosita, cerusita, anglesita, argentojarosita.

**Minerales del área del Monte:** wollanstonita, granate ( andadita y grosularita), cuarzo, calcita, clorita, dolomita, pirita, esfalerita, arsenopirita, galena, calcopirita, bornita, argentita, tetrahedrita, existen minerales de : Zn, Ag, Hg, Cu, Pb, Fe y Au.

El distrito minero de Zimapán cuya producción aproximada es de 10 millones de toneladas métricas de donde podemos notar que: 14% de Pb, 6% de Zn, 0.65% de Cu y 120 mg/kg de mineral obtenido en contenido de Ag de la producción total nacional lo que constituye una de las regiones más concentradas en este tipo de metales de las que cuenta el país; desde un punto de vista paleogeográfico los yacimientos minerales se alinean a lo largo del margen suroccidental (SW) de la cuenca de Zimapán con depósitos carbonatados que hospedan a la gran mayoría de concentración de minerales de : Cu, Pb, Ag y Zn.

**TABLA 7 : MINERALES EXISTENTES EN EL DISTRITO MINERO DE ZIMAPAN**

Hgo. 27, 28, 31, 32, 48

Nombre común del mineral:	Fórmula química:
Wollanstonita	$\text{CaSiO}_3$
Diópsida	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$
Epldota	$\text{CaH}_2(\text{AlFe})\text{Si}_3\text{O}_{13}$
Clorita	silicatos complejos de magnesio
Esfalerita	$\text{ZnS}$
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$
Pirita	$\text{FeS}_2$
Pirrotita	$\text{Fe}_9\text{S}_8$
Galena	$\text{PbS}$
Arsenopirita o mispickel	$\text{FeAsS}$
Jamesonita	$\text{Pb}_7\text{Sb}_2\text{S}_5$
Plumbojarosita	$\text{PbFe}_6(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_4$
Argentojarosita	$\text{Ag}_7\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_4$
Anglesita	$\text{PbSO}_4$
Cerusita	$\text{PbCO}_3$
Cuarzo	$\text{SiO}_2$
Argentita	$\text{Ag}_2\text{S}$
Granate	$\text{R}_3\text{R}'_2(\text{SiO}_4)_3$ , donde: R= $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ R' = $\text{Al}^{3+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Cr}^{3+}$ .





#### **4.3 CARACTERISTICAS CLIMATICAS Y DE VEGETACION EN EL DISTRITO,<sup>24,25,31</sup>**

Zimapán cuenta con una temperatura promedio anual de 18°- 20° C y en sus alrededores de 16°-18° C, tiene una altitud de 1780 metros sobre el nivel del mar; tiene un clima templado con lluvias en verano (Cw), con un porcentaje de precipitación invernal de 5-10%, clima templado semiseco- semicálido. La región sur presenta un clima semiseco- templado con lluvias en verano, con un porcentaje de precipitación invernal menor a 5% . La población de Zimapán Hgo. presenta una condición en la cuál dentro de la época de lluvias una pequeña temporada es menos lluviosa, también llamada sequía de medio verano. La precipitación total anual en la población es de 400-500mm anuales, en sus alrededores es de 300-400 mm y en la zona norte es de: 200-300mm anuales.

Dentro de la vegetación predominante, predomina el matorral dominado fisonomicamente por cáceas grandes con tallos aplanados o cilíndricos, los cuales se desarrollan en zonas áridas y/o semiáridas. Incluye las comunidades denominadas nopaleras y cardonales. En la región SE de Zimapán se presenta agricultura de temporal, donde los terrenos presentan un ciclo vegetativo dependiente de las zonas de lluvias y se siembra en un 80%. La zona N presenta matorral desértico rosetófilo donde se caracteriza por la presencia de especies con hojas en rosetas con o sin espinas, acaulescentes (sin tallo aparente ) aunque con frecuencia especies arrosadas con troncos bien definidos son característicos. Se desarrollan perfectamente sobre suelos sómicos de las laderas de los cerros bajos, en las partes altas de los abanicos aluviales o bien sobre los conglomerados. su distribución es amplia en las zonas áridas o semiáridas.<sup>30,31</sup>

#### **4.4 CARACTERISTICAS DEMOGRAFICAS DEL DISTRITO <sup>24</sup>**

Zimapán Hgo, municipio número 84 del estado de Hidalgo, coordenadas geográficas: 20°47' N y 99° 24' W ; altitud : 1780 metros sobre el nivel del mar.

**TABLA 8: DATOS GENERALES DE ZIMAPAN HIDALGO.<sup>24</sup>**

Carácteres:	Población:
Población total	50367
Hombres	17264
Mujeres	17803
Población de 6-14 años alfabeta	8522
Población de 6-14 años analfabeta	869
Población mayor de 15 años alfabeta	16309
Población mayor de 15 años analfabeta	3394
Población económicamente activa	7374
Población económicamente inactiva	14944
Población en sector primario	1744
Población en sector secundario	2432
Población en sector terciario	2573
Viviendas habitadas	6454
Viviendas particulares	6441
Ocupantes de viviendas	34399
Promedio de ocupantes por vivienda	5.34
Promedio de ocupantes por cuarto	1.69
Viviendas con un cuarto	457
Viviendas con 2 cuartos	1426
Viviendas con agua entubada	2645
Viviendas con drenaje	1624
Viviendas con energía eléctrica	4243
Población de 12 años o más	22863
Personas profesionales	81
Personas con carrera técnica	132
Agropecuarios	81
Obreros	1388

Población dedicada a la agricultura y a ganadería	1744
Población dedicada a la minería	1063
Población dedicada a extracción petrolera	21
Población dedicada a industria manufacturera	507
Población dedicada a electricidad y agua	41
Población dedicada a industria de la construcción	800
Población dedicada al comercio	550
Población dedicada a transportes	210
Población dedicada a servicio social	474
Población dedicada a administración pública	617
Población dedicada a servicio profesional	25
Población dedicada a restaurants y hoteles	70
Personal de minería profesional	17
Personal técnico de minería	23
Personal directivo de minería	16
Personal de Inspección y supervisión	31
Personal obrero-minero	278
Personal operador de maquinaria minera	284
Personal de oficina en minería	64
Personal de vigilancia en minería	19
Ayudantes en minería	165
Operadores de transportes en minería	153
Empleados en general	3460
Peones	1821
Patrones	86
Personas que no reciben ingresos	746
Personas que reciben menos de 0.5 S.M	265
Personas que reciben 1 S.M	796

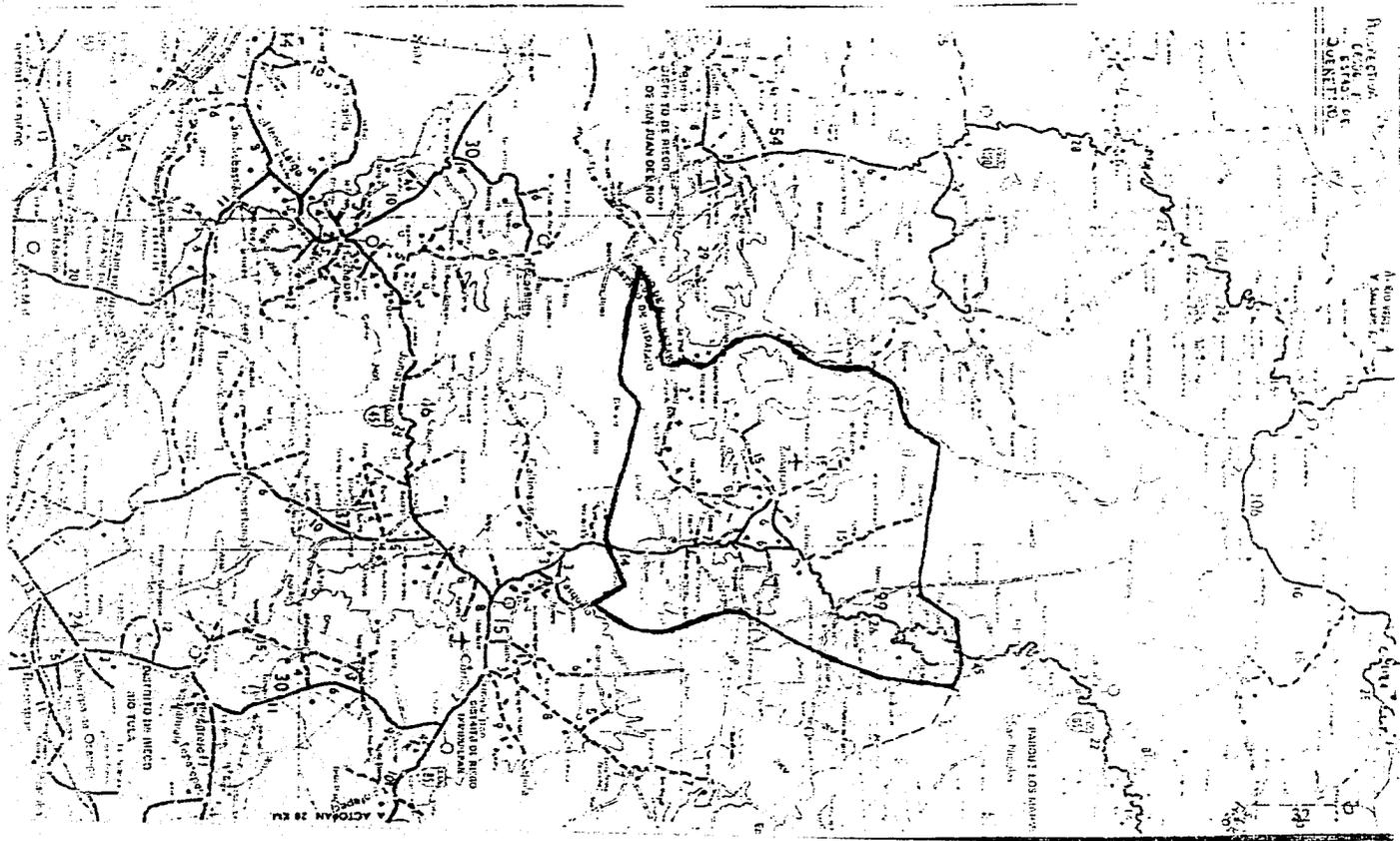
Personas que reciben 1-2 S.M	3414
Personas que reciben 2-3 S.M	926
Personas que reciben 3-5 S.M	458
Personas que reciben 5-10 S.M	206
Personas que reciben más de 10 S.M	71
Personas beneficiadas por el IMSS	1899
Personas beneficiadas por el ISSSTE	968
Personas beneficiadas por la SSA	30757
Personal médico del IMSS	14
Personal médico del ISSSTE	1
Personal médico de la Secretaría de Salud	33
Personal médico de consulta externa	27

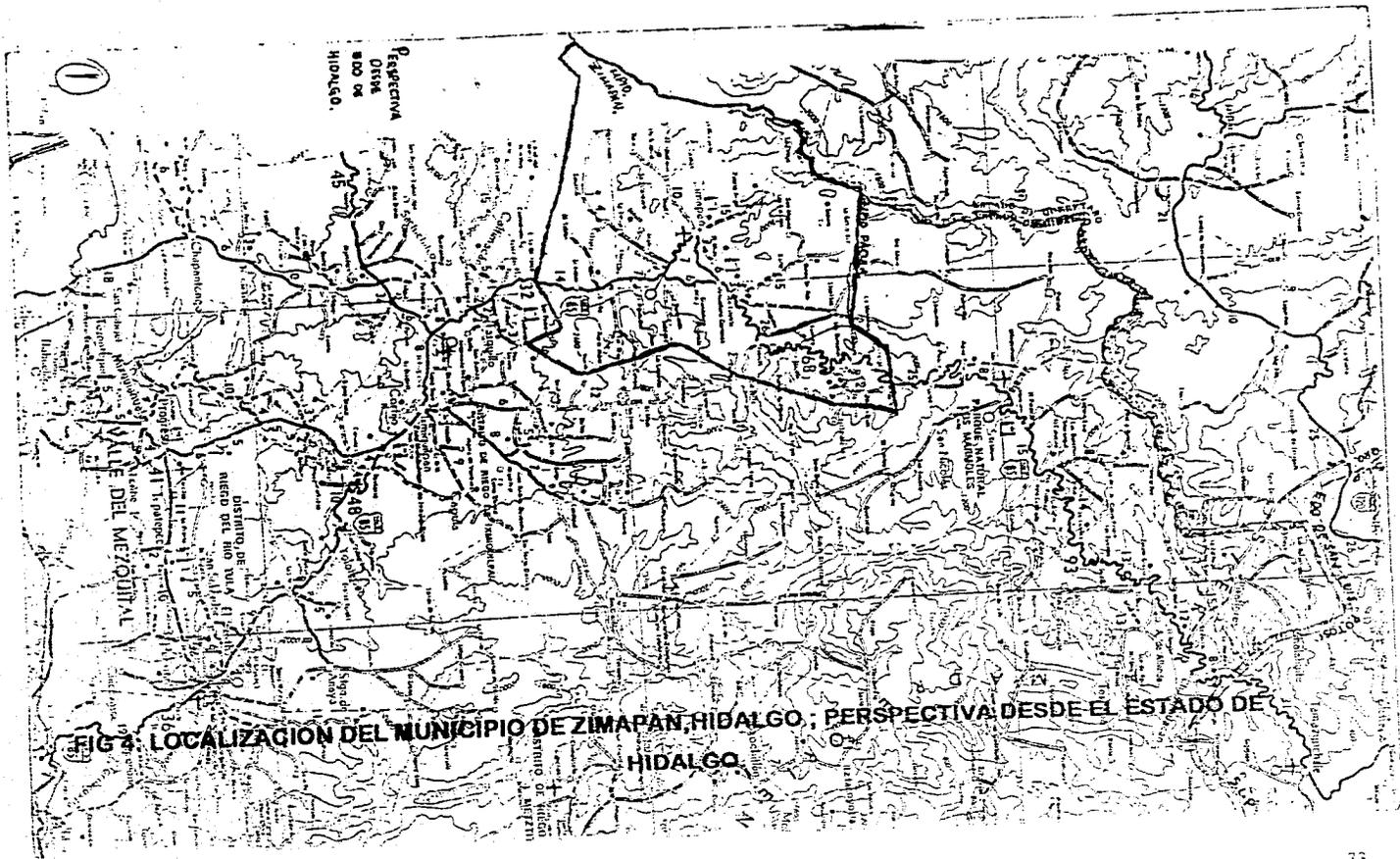
S.M= salario mínimo actual

**TABLA 9 :PRODUCCION MINERA DE ZIMAPAN ( 1992 ) <sup>24,32</sup>**

METAL	CANTIDAD
Zinc	15420 tons.
Plomo	10360 tons.
Cobre	399 tons.
Plata	39039 tons.
Oro	17 kg.

**FIG 3: LOCALIZACION DEL MUNICIPIO DE ZIMAPAN, HIDALGO ; PERSPECTIVA DESDE EL ESTADO DE QUERETARO.**





## **V. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

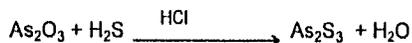
## 5.1 ANALISIS FISICOQUIMICO DE LAS AGUAS:

### 5.1.1 ENSAYOS QUIMICOS CUALITATIVOS PARA LA DETECCION DE ARSENICO:

#### PARA ARSENICO TRIVALENTE:

a) Sulfuro de hidrógeno: Se tiene un precipitado amarillo del trisulfuro en solución clorhídrica.

Reacción:



b) Solución de nitrato de plata: Da un precipitado amarillo de arsenito de plata en solución neutra y este precipitado es soluble en ácido nítrico o hidróxido de amonio.

Reacción:



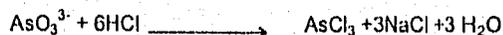
c) Solución de yodo en yoduro de potasio: se decolora la solución con la formación de HI y oxidación del As.

Reacción:



d) Reacción de Betendorff: se adiciona 1 ml. de muestra a 1 ml. de solución saturada de cloruro de estaño II en HCl y se calienta, si toma un color pardo o negro es debido a la formación de arsénico elemental.

Reacción:



### PARA ARSENICO PENTAVALENTE:

a) Solución de nitrato de plata: En solución neutra se produce un precipitado rojo pardo de arseniato de plata.

Reacción:



b) Mezcla magnesiána: se produce un precipitado blanco cristalino con una mezcla de cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ), cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) e hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ).

Reacción:



c) Solución de KI: Si se efectúa ante la presencia de HCl se obtiene yodo ( $\text{I}_2$ ), si se agita con 1 ml. de cloroformo, este se tiñe de violeta ante la presencia de yodo.

Reacción:



## 5.2 METODOS ESTANDAR PARA EL ANALISIS FISICOQUIMICO DE LAS AGUAS:<sup>34,37,38</sup>

### DUREZA:

Es la medida o la capacidad para precipitar el jabón, por los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , la suma de las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se expresan como mg/ L. de  $\text{CaCO}_3$ .

**Método titulométrico con EDTA:** El EDTA forma un quelato soluble, a pH= 10 con indicador NET (Negro de eriocromot), donde la solución toma color rojo vino, el EDTA acompleja tanto al  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  dando al final de la titulación un color azul. No se debe subir el pH más allá de 10 puesto que puede precipitar el calcio y el magnesio ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ), se debe practicar la titulación a temperatura ambiente, ya que a temperaturas bajas el cambio de coloración es muy débil, aplicable a todo tipo de aguas.

Reactivos:

Solución buffer de amonio ( $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ),  $\text{pH}=10$ .

Solución de EDTA 0.01 M.

NET (negro de eriocromo T) sólido.

Detección del punto final: Vire e color rojo vino a azul.

**DUREZA DEBIDA A CALCIO:** Procedimiento similar al descrito pero con la modificación de muréxida como indicador. Se debe alcanzar un  $\text{pH}$  de 12.5-13 para que no interfiera el  $\text{Mg}^{2+}$ .

Reactivos:

Solución de  $\text{NaOH}$  1M.

Solución de EDTA 0.01M.

Muréxida sólida.

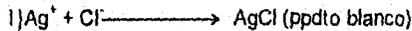
Detección del punto final: Vire de color rosa a violeta.

**CLORUROS:** Aniones presente en agua, en agua de montaña y tierras de altas latitudes son bajas en cloruros y en abastecimientos subterráneos son altas, elevan la cantidad de cloruros: descargas industriales, desechos humanos, erosión de minerales, en altas concentraciones los cloruros aceleran la corrosión. se determinó por el método argentométrico de Mohr.

**METODO DE MOHR:** En una solución ligeramente alcalina, utilizando como indicador ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) se titula con  $\text{AgNO}_3$  0.1N, se considera el punto final la formación de un precipitado rojo de  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ , el aspecto de la mezcla final da un color rojo salmón, se recomienda utilizar el método modificado con peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) para eliminar sulfitos.

Cuando se agotan los iones cloruros presentes, el exceso de los iones plata se combina con los iones cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ), hasta la aparición del precipitado de  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ . El  $\text{pH}$  se conservará entre 7 y 8 para que no precipite  $\text{Ag}_2\text{O}$ .

Reacción:



**ALCALINIDAD:** Es la medida de la capacidad de neutralizar un ácido, se debe a la presencia de sales de ácidos débiles, los iones  $\text{HCO}_3^-$  representan la mayor parte de la alcalinidad, otras sales como:  $\text{BO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  pueden estar presentes, en ciertas ocasiones las aguas naturales pueden contener alcalinidad debida a dos iones ( $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{OH}^-$ ).

TIPOS DE ALCALINIDAD.

- 1) Por iones hidróxido. ( $\text{OH}^-$ )
- 2) Por iones carbonato. ( $\text{CO}_3^{2-}$ )
- 3) Por iones bicarbonato. ( $\text{HCO}_3^-$ )

Los iones  $\text{OH}^-$  presentes en una muestra pueden ser el resultado de la hidrólisis de solutos, reaccionan por la adición de un ácido estandar, la alcalinidad depende del pH del punto final utilizado; se puede medir por titulación con indicadores apropiados o potenciométricamente. Para la medición existen dos tipos de alcalinidad: Alcalinidad total (detectado por titulación con verde bromocresol); y parcial ocasionada por iones  $\text{OH}^-$  libres (detectado por fenolftaleína).

**METODO:** Se mide volumétricamente por titulación con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.02N, se reporta como equivalentes de  $\text{CaCO}_3$ .

Para pH mayor de 8.3 se utiliza el Indicador fenolftaleína.

Para pH menor de 4.5 se utiliza el indicador rojo de metilo-verde bromocresol.

Detección del punto final:

Verde bromocresol vira de azul a amarillo.

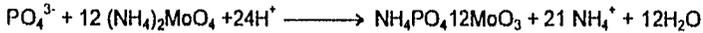
Fenolftaleína vira de rosa a incoloro.

**FOSFATOS:** El fósforo se encuentra en las aguas naturales ya sea como: ortofosfato, polifosfato y pirometafosfato, provienen de diversas maneras (agua contaminada, agua residual de proceso y agregado de minerales). En este caso se utilizó el método colorimétrico de molibdato y posterior reducción.

**Método colorimétrico:** Tiene un nivel crítico de 0.01 mg/ L, con un intervalo de 0.01 a 6 mg/ L de fosfatos; método de reducción por cloruro estannoso para dar azul de molibdeno, método muy aplicable si se eliminan sílice y arseniatos.

En una solución diluida el ión  $\text{PO}_4^{3-}$  se combina con el molibdato de amonio en medio muy ácido para dar un complejo amarillo de fosfomolibdato de amonio.

Reacción:



Este fosfomolibdato es fácil de reducir con  $\text{SnCl}_2$  para dar una solución azul, proporcional a la cantidad de fósforo presente, susceptible de medición a  $\lambda=690$  nm.

Reacción:



Reactivos:

$\text{SnCl}_2$  al 2.5 o 12 % en HCl concentrado

molibdato de amonio  $(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7\text{O}_{24}$

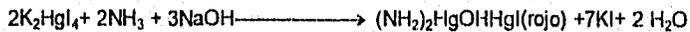
$\text{H}_2\text{SO}_4$  5N

**NITROGENO AMONIACAL:** Todo el nitrógeno que existe como ion  $\text{NH}_4^+$  se considera como nitrógeno amoniacal; la prueba necesita pasarse por una destilación preliminar en medio alcalino.

**MÉTODO DE NESSLER:** El método de Nessler es recomendable para aguas potables, viable en muestras que no tienen color ni turbidez; éste consiste por un pretratamiento de destilación en medio alcalino para recoger  $\text{NH}_3$ , el cual reacciona con el reactivo de Nessler para dar un complejo amarillo-anaranjado susceptible a medición espectrofotométrica a  $\lambda=425\text{nm}$ .

Reactivo de Nessler :  $\text{K}_2\text{HgI}_4$

Reacción:



Reactivos:

De Nessler (  $K_2HgI_4$  ) alcalinizado.

Solución estándar de amoníaco.

Ácido bórico (  $H_3BO_3$  ) al 1%.

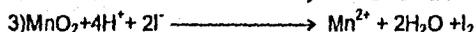
$Na_2CO_3$  o  $NaOH$  al 10%.

**OXIGENO DISUELTO:** El oxígeno es un gas poco soluble en agua y será aún menor en aguas salinas o con temperaturas altas, la solubilidad es de 14.6 mg/ L a 0°C y 7mg/ L a 35°C, de ahí que los límites sean de aproximadamente 8mg/ L.

Se utiliza un método iodométrico, basado en la adición de una sal de Mn, seguido por a adición de un reactivo alcali-yoduro, el oxígeno oxida a una cantidad equivalente de precipitado de  $Mn^{2+}$  a  $Mn^{4+}$ , en donde, en presencia de iones yoduro, se oxida a yodo y, este yodo liberado se titula con solución estándar de  $Na_2S_2O_3$ , el cual se puede detectar visualmente (uso del almidón como indicador) o espectrofotométricamente; se puede utilizar un método modificado que utiliza azida de sodio (  $NaN_3$  ).

Las reacciones que ocurren son:

Reacción de Winckler:



Modificación con azida:



Reactivos:

Solución de sulfato manganoso (  $MnSO_4$  )

Reactivo alcali-yoduro (  $KI$  -  $NaN_3$  )

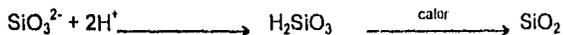
Solución indicadora de almidón.

Ácido sulfúrico (  $H_2SO_4$  ) concentrado.

Detección del punto final: Decoloración de la mezcla de reacción.

**SILICE.** Se presenta en forma soluble y coloidal (arcilla) la reacción en medio ácido da:

Reacción:



Se determina por método colorimétrico (amarillo de silicomolibdato) y por aparato Helliger, este método es muy cuantitativo, recomendable para cantidades de 0.04-25mg/L , es muy rápida y simple. A un pH de 1.2 el molibdato de amonio reacciona con la sílice para formar un heteropoliácido amarillo; la intensidad de color amarillo es proporcional a la cantidad de sílice presente, válida para todo tipo de aguas.

Reactivos:

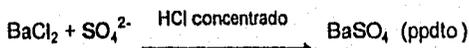
Solución de molibdato de amonio  $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}]$  al 10%.

HCl 6M.

$\text{NH}_4\text{OH}$ .

**SULFATOS.** Muy frecuente en aguas naturales, apta para consumo humano en cantidades mayores a 250mg/L , presenta el problema de corroer tuberías, dar mal olor debido al ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$  ) producido por su descomposición. Se determina por gravimetría por reacción con  $\text{BaCl}_2$  en medio clorhídrico. Este método es recomendable para concentraciones de sulfatos mayores de 10 mg/L , la precipitación se realiza a la temperatura de ebullición de la solución (digestión), el precipitado se limpia y calcina; por diferencia de pesos se determina la cantidad de sulfatos.

Reacción:

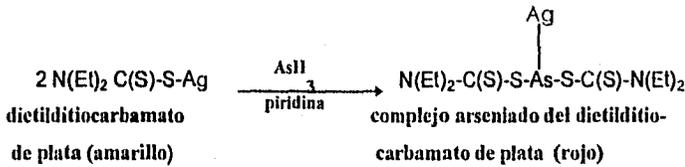


### 5.3 MODELO EXPERIMENTAL PARA LA CUANTIFICACIÓN DE ARSENICO.

#### 5.3.1 MÉTODO COLORIMETRICO DE DIETILDITIOCARBAMATO DE PLATA.<sup>34,37</sup>

Los compuestos inorgánicos de arsénico en presencia de hidrógeno nascente en medio muy ácido se reducen dando la arsina (  $AsH_3$  ), ésta a su vez forma con el reactivo dietilditio-carbamato de plata un compuesto complejo rojo, susceptible de determinación colorimétrica.

Reacción:



#### MATERIAL Y REACTIVOS:

Un generador de hidruros.

Un depurador constituido por un tubo que contiene lana de vidrio impregnada de solución de acetato de plomo  $[Pb(CH_3COO)_2]$  .

Un borboteador.

Un espectrofotómetro con celdas de 1 cm.

Zinc con un contenido de arsénico menor a 0.00001%.

Zinc activado previamente mediante con  $CuSO_4$ .

HCl concentrado.

KI al 15%, se ha de conservar en frascos color ámbar.

Solución de acetato de plomo  $[Pb(CH_3COO)_2]$  al 10%.

Solución de dietilditio-carbamato de plata al 0.5% en 200 ml de piridina.

Cloruro estannoso (  $SnCl_2$  ) al 40% en HCl concentrado.

Solución patrón de As [ 132 mg de  $As_2O_3$  en 1 lit de agua algo alcalinizada con NaOH 0.1M]

PREPARACION DE LA CURVA DE CALIBRACION: En una serie de matraces erlenmeyer de 50 ml ( frascos generadores), preparar las soluciones siguientes:

	Testigo	I	II	III	IV	V	VI
Soln.As 1mg/lit(mL)	0	1	5	10	15	20	25
Agua destilada	35	34	30	25	20	15	10
Correspondencia en $\mu\text{g/mL}$	0	1	5	10	15	20	25
As.							

**Ver tratamiento de muestra: sección siguiente**

Efectuar la determinación en el espectrofotometro a  $\lambda=535\text{nm}$

**TRATAMIENTO DE LA MUESTRA.:** Efectuar la determinación con 35 mL de muestra. Si es necesario concentrar la muestra previamente. Introducir la muestra en el generador de hidruros, añadir 5 mL de HCl concentrado, 2 mL de KI y 8 gotas de  $\text{SnCl}_2$  Esperar 15 minutos para que la reducción del arsénico inicie. Introducir en el frasco depurador y en el otro extremo del borboteador colocar 5 mL de soln. de dietiliditiocarbamato de plata, abrir el generador, añadir 3 gr de Zn activado y cerrar inmediatamente. Esperar 45 min. para que el desprendimiento de la arsina sea completo, si es necesario caliente la mezcla. Efectuar las lecturas en el espectrofotometro a  $\lambda=535\text{ nm}$  y tener en cuenta el valor leído para un testigo de agua destilada. Obtener los resultados a partir de la curva de calibración.

**EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS:** La curva patrón da la cantidad de arsénico contenido en la muestra tomada para la determinación. Para calcular los mg de arsénico por litro de muestra, se utiliza la siguiente fórmula.

$$\text{As}(\text{mg/ L})=\mu\text{g de As} \times 1000 / 35 \text{ mL.}$$

### 5.3.2 MÉTODO DE ESPECTROMETRIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.<sup>34,37</sup>

El arsénico se reduce a arsina ( $\text{AsH}_3$ ) por acción del  $\text{NaBH}_4$ . Este hidruro es arrastrado por medio de un gas portador hacia la llama de argón-hidrógeno en un espectrómetro de absorción atómica o bien hacia un horno de atomización.

## MATERIAL ESPECIAL Y REACTIVOS:

Un generador de hidruros.

Un espectrómetro de absorción atómica equipado con una lámpara de arsénico de cátodo hueco, lámpara de deuterio, conjunto nebulizador-quemador de argón-hidrógeno.

Gas argón o hidrógeno ( $Ar, H_2$ ) como gas portador.

HCl concentrado

$NaBH_4$

Solución patrón de As

PREPARACIÓN DE LA CURVA CALIBRACIÓN. En una serie de matraces aforados de 100 mL preparar las mezclas siguientes.

	testigo	I	II	III
Soln. patrón de As (0.1mg/ L)	0	10	20	40
Agua destilada (mL)	100	90	80	60
Correspondencia de $\mu g/ L$ de As	0	10	20	40

Ver procedimiento de muestras

PROCEDIMIENTO DE MUESTRA: Introducir en el reactor del generador 50 mL de muestra y 25 mL de HCl conc. Verter en un embudo de extracción 25 mL de  $NaBH_4$ . Expulsar el aire del reactor por medio del gas portador. Cerrar la llave de comunicación con el espectrómetro de absorción atómica. Abrir la llave de paso del embudo y dejar pasar el  $NaBH_4$  a la solución de As a un caudal de 1-3 mL /min; pasar a una llama de argón-hidrógeno. Efectuar las lecturas a  $\lambda=196.1$  nm. Los resultados se expresan en  $\mu g$  de As/mL.

### 5.3.3 OTROS MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE As

**Método de la arsina ( $AsH_3$ ) -azul de molibdeno:** Apropiado para determinar pequeñas cantidades de As en muestras vegetales se digiere previamente la muestra en una mezcla ácida ( $HClO_4 + H_2SO_4$ ), donde se obtiene arsina por reducción con Zn; la oxidación de la arsina con yodo y formación de un complejo azul al adicionar una solución de molibdato de amonio, utilizando sulfato de hidrazina como reductor. Es un método susceptible de determinación espectrofotométrica, los iones  $PO_4^{3-}$  y  $SiO_3^{2-}$  pueden interferir de manera que tiene que haber un tratamiento previo de eliminación de estos iones.

## **5.4 MODELO EXPERIMENTAL PARA LA REMOCION DE ARSENICO:**

### **5.4.1 METODOS DE TRATAMIENTOS DE AGUA MAS COMUNES.**

Debido a que la población rural y de escasos recursos del municipio de Zimapán está expuesta a la la ingestión crónica de As, es necesario proponer algunas alternativas de solución para controlar este problema. Una de las alternativas de solución inmediata son los procesos fisicoquímicos , que han demostrado a través del tiempo una gran eficiencia en la solución de problemas similares al que se tiene en la zona afectada , con la economía de costos y sencillos de aplicar; a continuación mencionaremos algunas de ellas.

Técnicas de desalinización más comunes:

- Desalación
- Destilación
- Extracción con solventes
- Osmosis inversa
- Congelación
- Coagulación química.
- Intercambio iónico
- Desmineralización
- Diálisis y electrodiálisis.

Técnicas alternativas para su aplicación en el distrito:

- Destiladores solares
- Cubos filtrantes
- Cartuchos domiciliarios con alúmina activada
- Tanques de precipitación con sulfato de aluminio. [  $Al_2(SO_4)_3$  ]

Técnicas más apropiadas para la zona en estudio (Zimapán,Hgo).

- Intercambio iónico
- Osmosis Inversa
- Oxidación y coagulación con sales férricas [  $FeCl_3$  ,  $Fe_2(SO_4)_3$  ]

A continuación se resumirán las técnicas antes mencionadas.

### **DESALACION:**

La remoción de los sólidos disueltos en el agua se describe como desalación o conversión de agua salada a agua dulce. La salinidad de las aguas crudas varía con su origen. El grado de salinidad se expresa generalmente en mg/ L de ión cloruro o de sal común (NaCl). La siguiente clasificación toma en cuenta el origen del agua y su salinidad relativa:

a) Agua salobre: Mezcla de agua salina con agua dulce o ligeramente salobre, con concentración de sal de 1000-5000 mg/ L.

b) Agua moderadamente salina: Agua de tierras interiores con concentraciones de sal de 2000-10,000 mg/ L.

c) Aguas muy salinas: Aguas de tierras interiores y costeras con concentraciones de sal de 10,000-30,000 mg/ L.

d) Aguas marinas: Aguas dentro del oceano y mar con concentraciones de sal de 30,000-36,000 mg/ L; incluyen 19,000 mg/ L de Cl, 10,600 mg/ L de Na, 1270 mg/ L de Mg, 880 mg/ L de S, 400 mg/ L de Ca, 380 mg/ L de K, 65 mg/ L de Bi, 28 mg/ L de C y 13 mg/ L de Sr.<sup>35,36</sup>

### **DESTILACION.**

De los procesos que remueven el agua de las soluciones salinas, la destilación es el más antiguo en relación con las plantas establecidas es el más productivo. Difiere de los otros procesos en que se hace pasar el agua a través de la fase vapor. La evaporación instantánea en etapas múltiples se efectúa a presiones y temperaturas sucesivamente bajas, solo se requiere una pequeña cantidad de energía térmica para evaporar instantaneamente el agua precalentada en la etapa de presión reducida a vapor. Una vez puesto en marcha, este proceso ya no consume energía térmica sino unicamente energía mecánica.

### **EXTRACCION POR SOLVENTES:**

Los solventes orgánicos que son parcialmente solubles en agua pueden producir: a) Una salmuera más concentrada, b) Un extracto de solvente y agua dulce del que se puede extraer agua dulce después de que el extracto se ha separado de la salmuera y se ha calentado para reducir la solubilidad del agua en el solvente.

### CONGELACION:

El agua puede transportarse desde la salmuera a la fase sólida en forma de hielo, aún cuando los cristales de hielo formado son de agua pura, el rendimiento de agua producida puede disminuir debido a:

a) Una parte de esta agua se debe utilizar para lavar la sal de la superficie del hielo.

b) Porque se requiere calor para fundir los cristales de hielo.

Existen dos tipos de congelación:

1) Congelación por contacto.

2) Congelación eutéctica (los cristales de hielo producen sus núcleos y crecen independientemente de los cristales de sal y otras sustancias existentes en el agua)

### INTERCAMBIO IONICO:

El intercambio iónico consiste en el intercambio reversible de iones entre un medio sólido de intercambio y una solución. Se emplean cambiadores tanto catiónicos como aniónicos para preparar: Agua de alimentación a calderas, desmineralizar o desionizar aguas de proceso, concentrar soluciones diluidas de electrólitos y preparar reactivos químicos.

Para hacer efectivos los intercambiadores deben :

a) Contener sus propios iones.

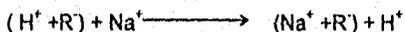
b) Ser insoluble en agua.

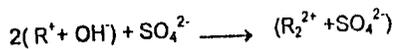
c) Proporcionar suficiente espacio en su estructura porosa para que los iones pasen libremente al interior y hacia el exterior del sólido.

Los intercambiadores catiónicos tienen una estructura cargada negativamente, pero los poros contienen cationes que mantienen su electroneutralidad. Los cambiadores aniónicos poseen cargas eléctricas opuestas. Los cambiadores sintéticos de iones son permeables, razonablemente estables y tienen alta capacidad.

El procedimiento de intercambio iónico se puede establecer de la siguiente manera:

Reacciones de intercambio más comunes:





Donde  $R^+$  y  $R^-$  simbolizan la red cargada negativa y positivamente del intercambio catiónico o aniónico respectivamente.

Dentro de la solución y del medio de intercambio iónico se debe mantener un balance de cargas (electroneutralidad); deberá mantenerse constante el número de cargas y no el número de iones dentro o en la superficie del grano del intercambiador.

35,36

La capacidad de intercambio de un cambiador iónico se expresa por el número de cargas o equivalentes necesarios de los iones para mantener la electroneutralidad dentro de la fase sólida para un peso o volumen determinado de material de intercambio iónico.<sup>35,36</sup>

Las siguientes series son típicas de afinidad creciente:

- a)  $Li^+ \cdot H^+ \cdot Na^+ \cdot K^+ \cdot NH_4^+ \cdot Rb^+ \cdot Ag^+$
- b)  $Zn^{2+} \cdot Cu^{2+} \cdot Co^{2+} \cdot Ca^{2+} \cdot Sr^{2+} \cdot Ba^{2+}$
- c)  $F^- \cdot HCO_3^- \cdot Cl^- \cdot Br^- \cdot NO_3^- \cdot I^- \cdot ClO_4^-$

#### DESMINERALIZACIÓN:

La desionización del agua se efectúa generalmente mediante un proceso de dos etapas en la que el agua pasa sucesivamente a través de un cambiador catiónico de forma protónica ( $H^+R^-$ ), y un cambiador aniónico de la forma  $OH^- (R^+OH^-)$ ; al entrar el cambiador catiónico todos los cationes se permutan por una cantidad equivalente de protones. El efluente que es en realidad una solución de los ácidos correspondientes a los aniones entra al intercambiador aniónico en donde todos los aniones se permutan por iones hidroxilo, que neutralizan la cantidad equivalente de protones formados en el intercambiador catiónico donde se produce una cantidad equivalente de agua. El efluente es superior en calidad (posee menor conductividad) este proceso es tan efectivo como la destilación.

La desmineralización produce agua de alta calidad para la industria, para el servicio de agua de repuesto en plantas generadoras de vapor. Las resinas de intercambio iónico solo se emplean para abastecimiento con menos de 500 mg/ L de sólidos disueltos.<sup>35,36</sup>

#### **DIALISIS Y ELECTRODIALISIS:**

El agua se puede desalar electroquímicamente por electrodiálisis a través de membranas selectivamente permeables respecto a los cationes o aniones. Diálisis es el fraccionamiento de solutos que es posible efectuar mediante diferencias en la velocidad de difusión de solutos específicos a través de membranas porosas. Las membranas semipermeables son barreras delgadas que ofrecen un paso fácil a algunos constituyentes de la solución, pero que son altamente resistentes al paso de otros constituyentes; se preparan membranas de alta selectividad mediante la formación de películas delgadas con resinas de intercambio iónico. Las membranas fabricadas con resinas cambiadoras catiónicas son permeables a los cationes; las que están hechas con resinas de intercambio iónico son permeables respecto a los aniones. Los procesos por diálisis son técnicas comunes de separación. Tanto en el laboratorio como en la industria.

La difusión de iones a través de membranas se puede acelerar mediante la aplicación de un voltaje a través de la membrana. La separación electrodiálítica resultante con membranas de intercambio iónico permite la desalación de aguas salada. El voltaje aplicado impulsa a los aniones hacia ánodo inerte y hacia fuera de las celdas con membranas permeables a los aniones.<sup>33,35,36</sup>

#### **DESTILADORES SOLARES:**

Existen varios tipos, permiten la obtención de 10-15 L. por día según las condiciones meteorológicas, su construcción es muy fácil: Las paredes se pueden hacer de madera, la cubierta de madera y las canaletas de PVC, todo su interior debe estar pintado en negro para asegurar mayor absorción de luz solar, se deberá revestir el fondo con una lámina de plástico negro con los extremos levantados y clavados a las paredes, el cubo colector debe tener tapa. Las medidas pueden variar según posibilidades y/o medidas de los elementos disponibles en el lugar.<sup>33,35</sup>

## **CARTUCHOS CON ALUMINA ACTIVADA**

Estos cartuchos son elementos que pueden colocarse en una conexión domiciliaria o en la entrada de la casa ( ahí se tratara toda el agua que se utilizara en la vivienda ) , esta agua se utilizara en agua de bebida, preparación de alimentos; siendo los cartuchos la variante más recomendable dada a su baja capacidad relativa de remoción de As, el cartucho puede confeccionarse con: PVC, fibra de vidrio, etc.

En todos los casos se colocará ya sea en la llave de paso o su derivación en las viviendas particulares. El volumen interno de los cartuchos puede variar de 15-60 lts., dependiendo del consumo y de los números de usuario. Las normas recomiendan una altura mínima de alumina de 60 cm. y máxima de 120 cm.. El agua dentro del cartucho debe correr en flujo hacia arriba; es recomendable tratar a la alumina en medio ácido durante 24 hrs. y colocarla en el cartucho, donde se deberá mantener humedecida.

## **OSMOSIS INVERSA:**

Cuando una solución salina y el agua están separados por una membrana semipermeable, se origina una presión osmótica natural que fuerza al agua a pasar por la membrana, diluyendo la solución salina. Pero si se aplica una presión a la solución, mayor que la presión osmótica natural, la membrana deja pasar agua de la solución salina al agua pura, mientras que la impurezas disueltas son rechazadas, de ahí que el proceso se denomine ósmosis inversa.<sup>33,35,36</sup>

Las membranas semipermeables dejan pasar el agua y retienen el 90-99% de las sales disueltas, 95-99% de todos los compuestos orgánicos y el 100% de la materia coloidal más fina.

La ósmosis inversa o ultrafiltración separa un soluto de una solución, obligando al solvente a fluir a través de una membrana mediante la aplicación de una presión mayor que la presión osmótica natural. Este término se utiliza generalmente para describir los procesos en los que las moléculas del soluto son aproximadamente del mismo tamaño que las del solvente; mientras que la ultrafiltración se utiliza para

separaciones que incluyen solutos cuyas dimensiones moleculares son 10 o más veces mayores que las del solvente y se encuentran por debajo de 0.5  $\mu\text{m}$ . Estos procesos de separación basados en diferencias de presión a través de una membrana combinan la adaptabilidad con simplicidad técnica, puede funcionar a temperatura ambiente sin cambio de fases.

La membrana adecuada para los procesos de ósmosis tiene que satisfacer ciertos requisitos, algunas propiedades importantes de las membranas en relación a la economía del proceso de desalinización son:<sup>33,35,36</sup>

- a) Selectividad de la membrana para el agua sobre los iones.
- b) Velocidad de permeación del agua por unidad de gradiente de presión.
- c) Durabilidad de la membrana.

Existen dos tipos de membrana comercialmente disponibles:

- a) Acetato de celulosa.
- b) Poliamida aromática.

Las membranas de acetato de celulosa se adaptan a un fuerte caudal por unidad de superficie, mientras que las membranas de poliamida tienen mayor caudal específico; una propiedad importante de estas membranas, es que debido a sus poros muy finos, llegan a detener bacterias y algunos virus.

#### **5.4.2 METODO DE REMOCION POR COAGULACION -FLOCULACION.**

Uno de los pasos importantes en el tratamiento de aguas, especialmente aquellas provenientes de aguas superficiales, es la remoción de material en suspensión, remoción de partículas muy finas que causan la turbidez. El proceso de sedimentación y filtración son importantes ya que preparan al agua para una purificación posterior.

##### **5.4.2.1 COAGULACION:**

La coagulación es la combinación o agregación de partículas para formar una masa, esto puede realizarse por adición de electrólitos apropiados para causar la coagulación también la agitación y eliminación de iones estabilizadores; el propósito

principal es aglomerar partículas formando grumos que pueden ser retenidos por filtros, involucra fenómenos eléctricos y mecánicos.

Un coloide se encuentra cargado eléctricamente y este es un factor que influye en su permanencia de estado de fina división, a causa de esto tales partículas tienen cargas eléctricas similares, las partículas se repelen mutuamente y por esto se mantienen en un estado de fina subdivisión, hasta que existe una neutralización de cargas, la coagulación se lleva a cabo removiendo o neutralizando el material estabilizador.<sup>35,36,49,50</sup>

Cuando un coagulante es adherido al agua a tratar, la desestabilización del coloide ocurre y el coágulo floculado es formado. Cuando este coagulante es adherido al agua (sales metálicas), los iones sufren hidrólisis, creando complejos denominados hidroxocomplejos; en la práctica común se utilizan sales de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), y sales de hierro tales como:  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ; los complejos hidroximetálicos son polivalentes, poseen altas cargas positivas y son adsorbidos en la superficie del coloide: En el proceso de agregación es importante la agitación, ya que ocasiona que las partículas desestabilizadas se acerquen, choquen y coalescen, la agitación del agua es importante ya que facilita los contactos interpartículas. Cuando el floculo se forma inicialmente, se encuentra en un estado de subdivisión, pero debido a la naturaleza de las partículas, se aglomeran y ocuyen otros sólidos suspendidos formando cuerpo cada vez mayores. Una de las funciones principales del coagulante es de suministrar iones cargados capaces de neutralizar cargas eléctricas de la mayor parte del material coloidal existente en el agua y causar su precipitación.<sup>49,50</sup>

Se puede formar una doble capa eléctrica en la interfase situada en un medio acuoso y no acuoso mediante:

- a) La suposición de una carga electrostática neta por un lado de la interfase.
- b) Creación de una capa difusa en la fase acuosa mediante un número equivalente de contraiones, esta capa tiene una gran influencia sobre la estabilidad de un coloide.

La carga superficial se acumula en 3 formas principales:

- a) Establecimiento de una pequeña carga superficial por adsorción preferencial de un tipo de ión sobre materiales químicamente inertes.

b) En el límite de las fases en sólidos, la carga es el resultado de sustituciones isomórficas dentro de la red estructural o imperfecciones, se puede acumular un exceso de iones estructurales sobre la superficie del precipitado.

c) La carga de una partícula coloidal puede provenir de la ionización de grupos ionógenos complejos situados sobre la superficie de partículas dispersas, muchas impurezas coloidales pueden contener grupos funcionales ionizables tales como:  $\text{COOH}$ ,  $-\text{PO}_4^{3-}$ ,  $-\text{SO}_4^{2-}$ , su carga depende del grado de ionización y del pH del medio.

Las propiedades eléctricas de las partículas coloidales los mantienen en estado coloidal, intervienen en su comportamiento 2 fuerzas opuestas: 1) fuerza atractiva de Van der Waals que tienden a unir las partículas y 2) fuerza electrostática repulsiva que tiende a separarlas, al adicionar electrólitos a un coloide aumenta la densidad de iones oponentes y aumenta la repulsión.

El equilibrio químico específico de las sustancias coloidales y disueltas, así como la interacción química entre las impurezas y los iones metálicos coagulantes son en algunas ocasiones más importante que las fuerzas electrostáticas que compactan la capa difusa de la doble capa, el potencial "Z" es la diferencia de potencial entre la masa del líquido y el plano deslizante o de corte del envoltorio de agua que se mueve entre las partículas, si podemos conocer el potencial "Z" podemos caracterizar el comportamiento coagulante. La estabilidad de un coloide depende del potencial "Z".<sup>49,50</sup>

Para que ocurra una coagulación es consecuencia de una disminución del potencial "Z", ya sea por una disminución de cargas o densidad iónica, esto ocurre con el aumento de concentración de iones y origina la coagulación; los iones particulares deberán de ser de signo opuesto a la carga eléctrica que actúa sobre el coloide, un ión que tiene carga doble o triple es mucho más efectivo que uno de carga simple, los coloides cargados opuestamente tienden a actuar como iones muy cargados, el uno con respecto al otro, cuando la mezcla ocurre, una coagulación mutua con neutralización de cargas, mediante cambios del pH, este es responsable de las variaciones en la facilidad de formación del floculo.<sup>49,50</sup>

La dosificación de las sales coagulantes más usadas en la técnica coagulación-floculación de tratamiento de aguas, se utiliza un exceso apreciable de la cantidad requerida para producir los hidroxocomplejos metálicos necesarios, este

exceso sirve para polimerizar y dar finalmente el hidróxido insoluble( en este caso los hidróxidos de Fe y Al ) y la solución podría estar sobresaturada con el hidróxido en la formación del precipitado. Este precipitado es enredado en el coloide negativo , este tipo de coagulación se denomina coagulación por precipitación o por arrastre, la principal acción es la absorción de un complejo hidroximetálico altamente cargado. Las especies de un complejo polivalente de un ión metálico es mucho más efectiva en la coagulación de un sistema coloidal que aquellás de complejos monovalentes ; de aquí que las sales metálicas polivalentes son siempre usadas en un proceso de coagulación- floculación.

El precipitado metálico hidratado coagulado se puede ver como un electrólito hidratado sólido capaz de tener una red estructural de espacio variable, en donde es variable la proporción de diferentes aniones dentro de los límites de la neutralidad eléctrica del sólido, la presencia de aniones coordinantes en la solución o en el color, en el caso del electrólito,  $Fe^{3+}$  influyen sobre él la presencia de : polisacáridos, proteínas y superficies microbianas que son susceptibles a coagularse. Un coagulante puede mejorar el carácter físico del floculo o acelerar la cinética del proceso , a un pH determinado , la dosis requerida de un coagulante es proporcional a los constituyentes del color.<sup>49,50</sup>

La coagulación de coloides por polímeros orgánicos ocurre por una interacción química o enlaces de puente . Los polímeros pueden tener grupos ionizables tales como:  $-COOH$ ,  $-NH_2$ ,  $-HSO_3$  , estos grupos se enlazan con sitios reactivos o grupos en la superficie del coloide , de esta manera muchos coloides pueden ser enlazados hacia una molécula simple del polímero para formar una estructura de puente.

#### **5.4.2.2 FLOCULACION:**<sup>49,50</sup>

El proceso de coagulación-floculación consiste en la adición de un reactivo químico formador de floculos en el agua para enredar o combinarse con sólidos coloidales no asentables y/o sólidos de lento asentamiento para producir un floculo de asentamiento rápido . El floculo es subsecuentemente removido en la mayoría de los casos por sedimentación. **Coagulación** es la adición rápida y mezclado inmediato del coagulante, dando como resultado una desestabilización de los sólidos finos suspendidos y sólidos coloidales: **Floculación** es el lento agitado o suave

agitación para desestabilizar partículas y formar un floculo de rápido asentamiento. Su uso principal en tratamiento de aguas es aglomerar sólidos antes de la sedimentación y una filtración rápida por arena, en procesos de aguas municipales al floculación es utilizada para aglomerar sólidos en un tratamiento fisicoquímico de aguas residuales y efluentes primarios o secundarios, en la industria la floculación es empleada para coalescer sólidos en aguas residuales que contienen un alto contenido de sólidos suspendidos.<sup>49,50</sup>

La precipitación química, la cuál esta relacionada con la coagulación consiste en la precipitación de iones indeseados en el agua. Una porción de sólidos dispersos en solución acuosa del agua a tratar son materiales suspendidos no sedimentables que poseen un tamaño de partícula entre  $0.1\mu\text{m}(10^{-4}\text{mm})$  a  $100\mu\text{m}(10^{-1}\text{mm})$ , puesto que un coloide tiene un tamaño que oscila entre  $1\text{nm}(10^{-6}\text{mm})$  a  $1\mu\text{m}(10^{-3}\text{mm})$ . Una fracción apreciable de materia no sedimentable son partículas coloidales; la fracción supracoloidal tiene un tamaño de partícula entre  $1\mu\text{m}(10^{-3}\text{mm})$  a  $100\mu\text{m}(10^{-1}\text{mm})$ , muchas de las partículas de esta fracción tienen ciertas características coloidales tales como velocidad de asentamiento imperceptible.<sup>49,50</sup>

Una dispersión coloidal son clasificadas de acuerdo a la fase dispersa o medio disperso, el principal sistema envuelto en el tratamiento de aguas es: sólido disperso en líquido (sol) y líquido disperso en líquido (emulsión); Cuando se suspende en agua material orgánico tales como microbios, material inorgánico como arcillas; estos son ejemplos de un sólido disperso en un líquido; un aceite disperso en agua es un ejemplo de líquido disperso en líquido; en tratamiento de aguas los sólidos dispersos en un líquido son de interés, una característica importante de un coloide sólido disperso en agua, es que la partícula del sólido podría no sedimentar por la fuerza de gravedad, cuando un sólido coloidal permanece en suspensión y no sedimenta, el sistema se considera como estable, un coloide posee una gran área superficial por unidad de volumen, esto es, una gran área superficial específica, donde debido a esta gran área tienden a adsorber sustancias tales como: moléculas de agua o iones presentes en el agua, los coloides también desarrollan una carga electrostática en relación al agua del exterior.

Los sólidos coloidales en agua pueden ser clasificados como hidrofílicos o hidrofóbicos, de acuerdo por su afinidad por el agua; un coloide hidrofílico poseerá

habilidad por el agua debido a la existencia de grupos polarizables solubles en agua, que están presentes en su superficie ( $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{HSO}_3$ ), que promueven la hidratación y causa una capa de agua que se recorrerá alrededor del coloide, esta capa se denomina Agua de hidratación o agua de enlace. Un coloide hidrofóbico no tiene habilidad por el agua y no forma la capa de agua. Las partículas coloidales tienen fuerzas electrostáticas que son importantes en el mantenimiento o dispersión de un coloide; la superficie de una partícula coloidal tiende a adquirir una carga electrostática debido a la ionización de grupos superficiales y/o a la adsorción de iones de la solución del alrededor, muchos coloides hidrofílicos naturales (proteínas y microbios) poseen una carga negativa si el pH está por encima del neutro, el signo y magnitud de los coloides dependerán del tipo de coloide y características del alrededor. <sup>49,50</sup>

En muchos sistemas coloidales los coloides son mantenidos en suspensión (estabilizado) debido a fuerzas electrostáticas, un coloide permanecerá en suspensión mientras posea cargas negativas y estas cargas sean repulsivas. Una partícula coloidal cargada podría atraer a su superficie iones de carga opuesta o contraiones del agua del alrededor, la capa compacta de contraiones se denomina capa fija, una suspensión coloidal es estable si las partículas permanecen en solución y no coagulan, la estabilidad coloidal depende de la magnitud de las fuerzas de atracción y repulsión.

Para conseguir una buena floculación, es preciso crear, por espacio de unos minutos, una agitación enérgica, en el momento de la introducción de reactivos con el objeto de que esto se mezclen íntimamente con el agua. A continuación de esta agitación rápida, se procede a una agitación lenta durante 5 min a más. Esto último puede tener lugar en un floculador separado o en el interior del sedimentador, en este caso se utilizan turbinas de recirculación o la acción del propio lecho de fangos, la elección del tipo de mezclador y floculador está en estrecha relación con la elección del sedimentador utilizado en la continuación del tratamiento.

#### 5.4.3 SALES COAGULANTES:<sup>50</sup>

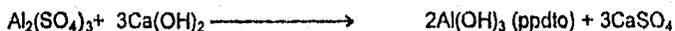
Los coagulantes más usados en el tratamiento de aguas son:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  y  $\text{FeCl}_3$ , tienen la ventaja de ser más económicas, las sales de Fe tienen

una ventaja mucho mayor: son efectivas en un amplio intervalo de pH, producen un floculo mas pesado, la cal por sí misma puede actuar como coagulador ya que produce floculos de  $\text{CaCO}_3$ , donde este precipitado posee propiedades coagulantes y floculantes : Para un tratamiento de aguas convencional se pueden utilizar en combinación: sales metálicas con cal . La mayoría de veces los auxiliares de coagulación tales como polielectrólitos son requeridos para producir un floculo de rápido asentamiento; los principales factores que afectan la floculación en aguas tratadas son: temperatura, pH, sólidos suspendidos, composición catiónica o aniónica, concentración, grado y duración de agitación, dosis y naturaleza del coagulante. La selección del coagulante requiere el uso de estudios en el laboratorio o de planta piloto; dado que un agua a tratar puede exhibir una diversidad de resultados de coagulación óptima para un coagulante en especial. Los estudios de laboratorio requieren las pruebas de jarras para la selección de un coagulante para una planta específica de tratamiento de aguas, mientras que el estudio de planta piloto son requeridos para el agua tratada.

*SALES METALICAS MAS COMUNMENTE UTILIZADAS COMO COAGULANTES:*

**Sulfato de aluminio:** Existe suficiente alcalinidad en el agua para reaccionar con esta sal y producir un floculo de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , el pH óptimo es de 4.5-8 ya que en este intervalo el precipitado es insoluble:

Reacción:



Su desventaja es que puede redisolverse para dar sales de  $\text{Al}^{3+}$  en solución (pH ácidos) y aluminatos  $[\text{AlO}_2^-]$  (pH por encima de 9).

**Sulfato ferroso:** Requiere una alcalinidad para producir una rápida reacción , a su vez requiere oxígeno disuelto en agua, su pH óptimo es de 9.5 , tambien se puede utilizar en combinación con cloro a pH= 4.

Reacción:



**Sulfato férrico:** Su reacción con la alcalinidad presente en el agua es la siguiente:

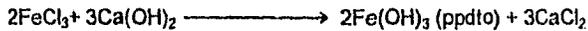
Reacción:



La reacción produce un floculo denso de rápido asentamiento, se puede usar en combinación con cal para mejorar el procedimiento, el rango óptimo de pH es de 4-12 y produce una solución sobresaturada de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

Cloruro férrico: Reacciona con la alcalinidad natural del agua de una manera semejante al sulfato, también se puede utilizar en combinación con cal para mejorar la eficacia.

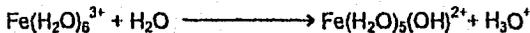
Reacción:



El pH óptimo es el mismo que para el sulfato, el floculo formado es denso y de rápido asentamiento, en un principio la solución es ácida debido a la hidrólisis.

**Hidrólisis de sales férricas:** Al añadir sales férricas a agua se produce una disminución del pH y reducción de alcalinidad, formar complejos hidroxoférricos.

Reacciones:

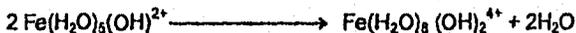


y así sucesivamente:



Estos hidroxocomplejos tienden a polimerizarse:

Reacción:



Donde estos polímeros sufren más hidrólisis y tienden a formar complejos mayores cada vez. Una secuencia de reacciones hidrolíticas, acompañadas de reacciones de deshidratación, conduce a una coordinación progresiva de  $\text{Fe}^{3+}$  con iones  $\text{OH}^-$ , conforme disminuye la carga de especies de  $\text{Fe}^{3+}$  a través de la coordinación con grupos hidroxilo, existe una menor repulsión entre iones y mayor tendencia a la polimerización, formando polímeros hidroxocoloidales y precipitados insolubles de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

#### 5.4.4 AUXILIARES DE COAGULACION:<sup>50</sup>

En cada tratamiento de aguas, los auxiliares de coagulación son algunas veces utilizados para producir un floculo denso de rápida formación y rápido asentamiento y por consiguiente lograr una coagulación óptima. La adición de alcalinidad es considerada como un auxiliar de coagulación si la alcalinidad natural es insuficiente para producir un buen floculo ; ejemplos de estos añadidores de alcalinidad son :  $\text{Ca(OH)}_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  . Los polielectrólitos también son utilizados para asegurar una coagulación óptima ,están clasificados de acuerdo a sus cargas iónicas : aniónicos (cargados negativamente ) y catiónicos (cargados positivamente) ; los polielectrólitos pueden tener un origen natural( almidón y gomas de polisacáridos) o ser sintéticos de origen , la mayoría son sintetizados ; participan en le proceso de interacción química de enlaces de puente o grupos reactivos del polielectrólito y el floculo. Adición de turbidez : tal como el lodo precipitado, es requerido para suministrar una concentración lo suficiente de partículas para una rápida coagulación. Ajuste del pH : es requerido para un ajuste de tal modo que no exista la posibilidad de redisolución del precipitado, el incremento lo da la adición de  $\text{Ca(OH)}_2$  y la disminución lo da la adición de ácido.

#### 5.4.5 PRUEBA DE JARRAS:

La técnica de laboratorios de las pruebas de jarras es usada para determinar la propiedad coagulante y del auxiliar de coagulación, la dosis de la sal requerida para la coagulación del agua en particular ; en la prueba , las muestras y el agua son colocadas en una serie de frascos y entonces varias dosis de coagulante y auxiliar son añadidos a los frascos , el contenido es rápidamente agitado, para estimular un rápido mezclado y algunos con agitación suave para estimular la floculación, después de un tiempo, la agitación se cesa y se toma el tiempo para formación del floculo, tamaño del floculo, características de asentamiento, % de turbiedad, % de color removido, pH final del agua coagulada y sedimentada; la dosificación química determinada por el procedimiento, da una estimación de la dosis requerida para una planta de tratamiento.

Debido a que las aguas varían y fluctúan ampliamente en calidad, la floculación y coagulación necesaria se determinan mejor en la práctica por ensayos; para encontrar la dosis requerida de coagulante, se precisa de las pruebas de jarras realizadas en el laboratorio. Debido a que la coagulación depende de tantas variables que son independientes entre sí, deberá mantenerse constantes todos los parámetros de prueba que sean posibles: El pH para gobernar la naturaleza del coagulante o floculante a través de la hidrólisis y ionización, para mantener o determinar la carga de impurezas coloidales. Una coagulación se puede mejorar mediante la ayuda de sustancias que aumentan la masa crítica de los coloides y por consiguiente acelera la coagulación, estas sustancias pueden mejorar el carácter físico de los flocúlos o acelerar la cinética del proceso. A un pH determinado, la dosis requerida de un coagulante es proporcional a los constituyentes de color.

## **VI.- RESULTADOS**

## 6.1 LOCALIZACION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO (POZOS)

Los pozos a estudiar se encuentran localizados dentro del Distrito Minero de Zimapán, Hgo; en la zona urbana y alrededores del pueblo.

Se realizaron pruebas fisicoquímicas a las aguas de los pozos seleccionados para determinar la concentración de As, además de otros parámetros fisicoquímicos. Ya que los pobladores de la región presentaban lesiones características muy similares a las descritas en la bibliografía acerca de hidroarsenicismo crónico regional endémico. Existen otros pozos ,pero éstos no fueron muestreados,ya que no se contó con la autorización dada por el municipio.

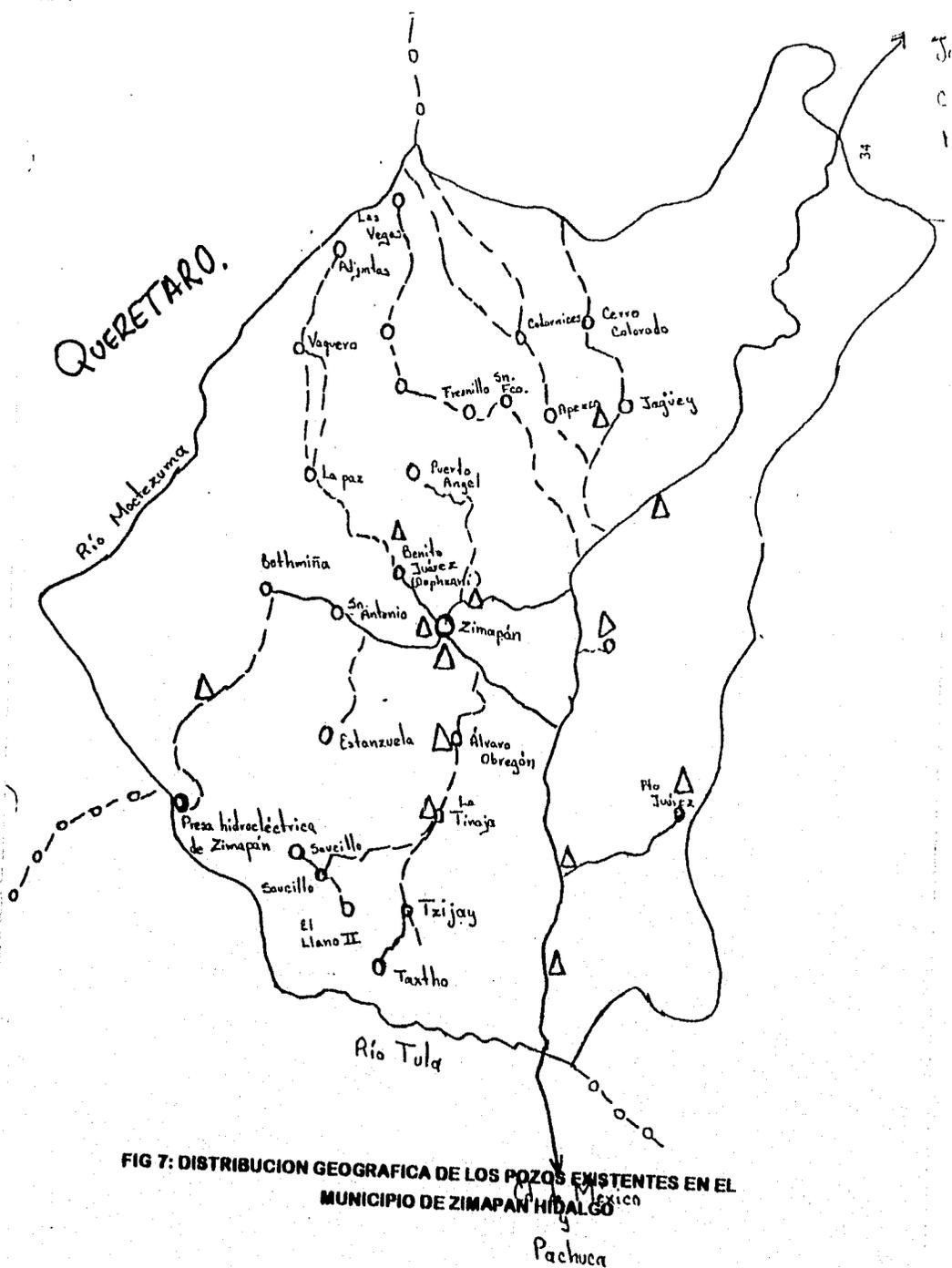
**TABLA 11: POZOS A CUANTIFICAR CONTENIDO DE As DENTRO DEL PUEBLO DE ZIMAPAN Hgo.**

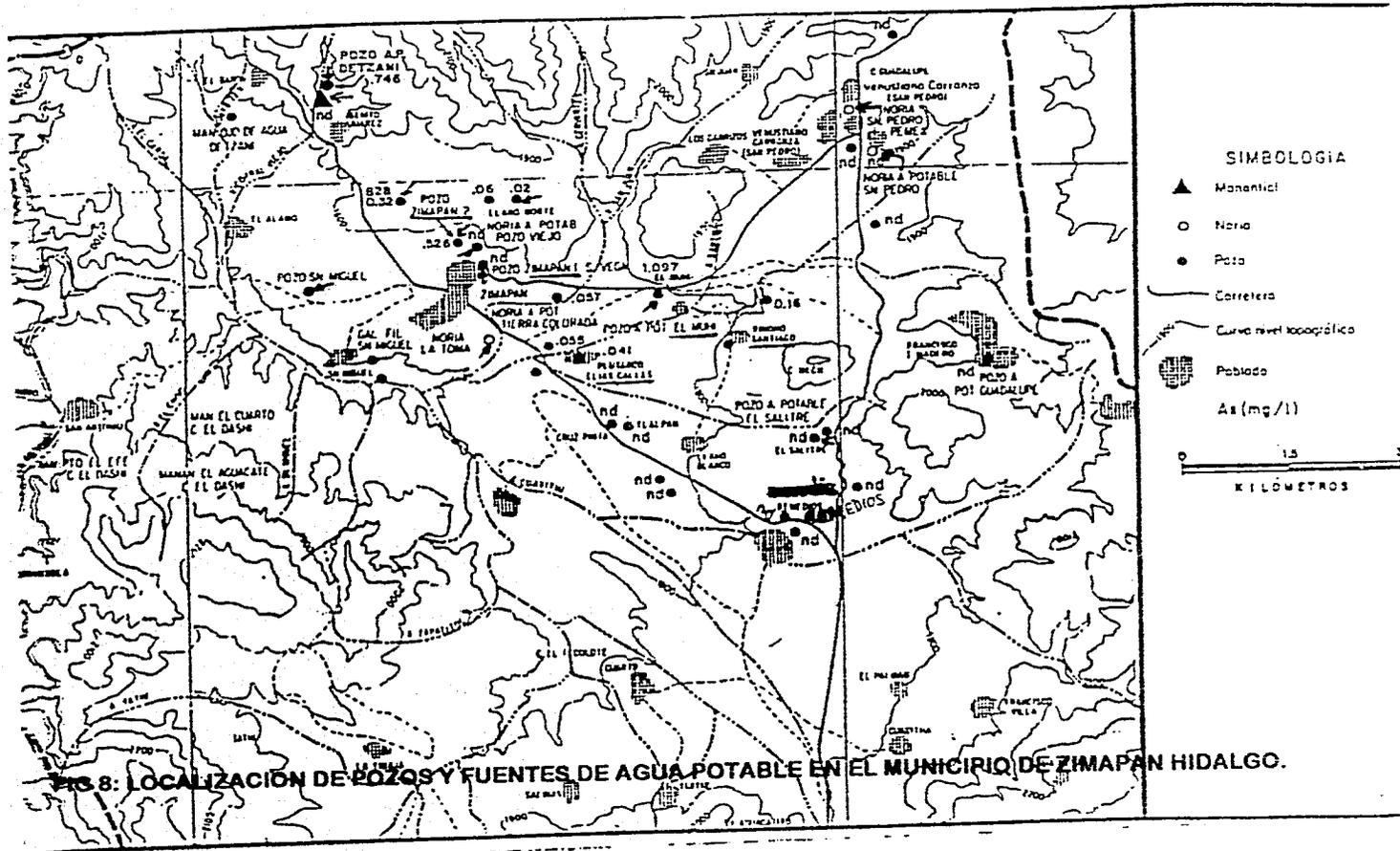
NOMBRE DEL POZO:
1.-Cerrada campo aéreo: Avenida Sóstenes Vega
2.- Salida de depósito general: dilución de pozos 1,3, 4,5
3.- Tierra colorada
4.- El Muhi
5.- Depósito llano norte
6.- Depósito llano norte- Dethzanf- Benito Juárez

## 6.2 RESULTADOS DEL ANALISIS FISICOQUIMICO

Ensayos aplicados a las muestras de agua obtenidas, para su análisis:

- 1.- Alcalinidad (Método volumétrico con el indicador mixto: rojo de metilo+ verde de bromocresol, además del método volumétrico con fenolftaleína).
- 2.-Oxígeno disuelto (Método yodométrico de Winckler modificado con azida).
- 3.-Dureza total, de Ca y de Mg (Método volumétrico con EDTA con indicador de muréxida y negro de eriocromo T).
- 4.-Cloruros (Método volumétrico de Mohr).
- 5.-Fosfatos (Método colorimétrico con reducción por  $\text{SnCl}_2$  del ácido fosfomolibdico a azul de molibdeno).
- 6.-Sílice (Método colorimétrico de Helliger).
- 7.-Nitrógeno amoniacal (Método colorimétrico de Nessler con destilación).
- 8.-pH (Lectura directa con pHmetro).
- 9.-Sulfatos (Método gravimétrico con  $\text{Ba}^{2+}$ ).
- 10.-Arsénico (Método colorimétrico con dietilditiocarbamato de plata).





Baños	Noria	9	1.5
Batallon	Pozo	150	37.0
Detzaní	Manantial	-	-
Detzaní	Pozo	180	
Fam. Ocampo	Noria	20	10.0
Gral. Trev.	Noria	15	13.0
Hotel PR	Pozo	46	7.0
Hacienda	Noria	7	5.5
F. Calvario	Noria	10	7.0
Jales Prel.	Noria	10	?
J. Ocampo	Noria	15	10.0
Lavado C.	Noria	8	3.5
Llano Norte	Pozo	25	22.0
Llano Nort2	Pozo	29	28.0
Llano Blan.	Noria	15	8.5
Llano Bla2	Noria	12	8.5
Manzana T.	Noria	22	8.0
Muhi	Pozo	180	81.0
Remedios	Pozo	25	23
P. Elias C.	Pozo	70	?
Salitre	Pozo	70	
Salitre 2	Noria	10	3.0
Salitre	Noria	15	14.0
Santiago	Noria	20	5.0
Tanque LC	Pozo	28	25.0
V. Carranza	Pozo	?	
Xindhó	Noria	15	2.0
Zimapán 1	Pozo	130	
Zimapán 2	Pozo	134	15.0
Zimapán 3	Galeria	10	

Nombre del pozo	Tipo de pozo	Profundidad (m)	Nivel (m)
-----------------	--------------	-----------------	-----------

**FIG 9: NOMBRE DE LOS POZOS Y FUENTES DE AGUA POTABLE EXISTENTES DENTRO DEL MUNICIPIO DE ZIMAPAN, HIDALGO.**

TABLA 12: RESULTADOS DEL ANALISIS FISICOQUIMICO AL AGUA POTABLE

Fecha : 8 de diciembre de 1993.

Pozos:	1	2	3	4	5
Alcalinidad a verde de bromocresol (mg/Lde CaCO <sub>3</sub> )	226.8±9.2	247.8 ± 12.2	294 ±15.4	222.6 ±8.2	201.6±6.4
Alcalinidad a fenolftaleína (mg/Lde CaCO <sub>3</sub> )	0	16.8±2	8.4±0.5	8.4±0.5	8.4±0.5
Oxigeno disuelto (mg/L de O <sub>2</sub> )	12.7±1.01	12.7±1.01	11.86±0.81	11.86±0.811	11.86±0.81
Dureza de Ca(mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	224±21.2	142±10.6	274±25.4	94±8.5	136±10.4
Dureza de Mg (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	58±5.1	76±6.8	68±6	92±8.5	72±6.6
Dureza total (mg/Lde CaCO <sub>3</sub> )	282±26.3	218±17.4	342±31.4	186±17	208±16
Cloruros (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	96.72±12.9	96.72±12.9	129.03±19.3	129.03±19.3	96.77±12.9
Nitrógeno amoniacal (mg/L de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0.206±0.03	0.074±0.005	0.498±0.05	0.172±0.01	0.172±0.01
Fosfatos (mg/Lde PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	0.5±0.05	1.05±0.2	2.41±0.4	3.78±0.6	1.04±0.2

Sulfatos (mg/L de $\text{SO}_4^{2-}$ )	390±40	1550±150	810±60	830±65	890±75
Sílice (mg/L de $\text{SiO}_2$ )	1±0.5	6±1	7±1	9±1	6±1
pH	7±0.05	7.5±0.05	7±0.05	7.8±0.05	7.5±0.05
Arsénico (mg/L de As)	0.087±0.005	0.1735±0.02	0.1126±0.01	1.153±0.2	0.1401±0.03

**TABLA 13: RESULTADOS DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA POTABLE**

Fecha : 6 de junio de 1994.

Pozos:	1	3	4	5
Alcalinidad al verde de bromocresol (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )	196 ±8.4	271.6±13.2	197.4±8.4	207.2±8.8
Alcalinidad frente a fenolftaleína (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )	21±3	0	12.6±1.6	16.8±2
Oxígeno disuelto (mg/L de $\text{O}_2$ )	8.89±0.7	1.69±0.3	8.89±0.7	6.77±0.5
Dureza de Ca (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )	213.33±17.6	274.66±25.5	140±10.5	140±10.5
Dureza de Mg (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )	70.66±6.4	67.97±6	86.64±8.4	100±9
Dureza total (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )	284±26.3	342.64±31.5	226.64±18	240±22

Cloruros(mg/ L de Cl <sup>-</sup> )	145.16±23.1	129.03±19.7	145.16±23	129±19.7
Nitrógeno amoniacal (mg/L de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0.221±0.03	0.488±0.05	0.223±0.03	0.27±0.035
Sulfatos(mg/ L de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	445±45	850±60	920±80	1030±110
Fosfatos (mg/L de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	14.16±2.1	8.69±0.7	38.76±4.3	33.2±3.6
Sílice (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	8±1	11±1	7±1	9±1
pH	6.9±0.05	6.9±0.05	7.1±0.05	7.3±0.05
Arsénico (mg/L de As)	0.101±0.01	0.1233±0.015	1.2865±0.3	0.145±0.03

**TABLA 14: RESULTADOS DEL ANALISIS FISICOQUIMICO DEL AGUA POTABLE**

Fecha: 28 de julio de 1994.

Pozos:	1	2	4	5	6
Alcalinidad al verde de bromocresol (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	151.2±6.2	157.5±6.7	184.8±7.6	165.9±6.8	184.8±7.6
Alcalinidad frente a fenolftaleína (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	14.7±1.6	10.5±1	14.7±1.6	8.4±0.5	12.6±1.2
Oxígeno disuelto (mg/L de O <sub>2</sub> )	10.16±0.7	11.86±0.8	10.58±0.75	11.86±0.8	9.3±0.6
Dureza de Ca (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	134±9.8	166±12.6	144±10.8	164±12.6	172±12.8

Dureza debida a Mg (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	86±8.2	80±7.8	76±7.4	84±8	50±4.8
Dureza total (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	220±17.6	246±20.2	220±17.6	248±20.2	222±17.8
Cloruros (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	129-03±19.7	80.64±10.4	96.77±12.8	161.29±28.6	145.1±23.2
Nitrógeno amoniacal (mg/L de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0.238±0.006	0.498±0.05	0.27±0.009	0.312±0.012	0.286±0.01
Sulfatos (mg/L de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	530±50	1350±130	1040±110	1080±120	730±50
Fosfatos (mg/L de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	8.9±0.8	11.97±1.4	14.98±2.5	8.97±0.8	13±2
Sílice(SiO <sub>2</sub> )	7±1	9±1	7±1	6±1	7±1
pH	7.95±0.05	7.7±0.05	7.9±0.05	7.5±0.05	7.1±0.05
Arsénico (mg/L de As)	0.095±0.005	0.1875±0.02	1.2305±0.2	0.1484±0.01	0.128±0.01

**TABLA 15: RESULTADOS DEL ENSAYO CUALITATIVO DE DITIZONA PARA LA DETECCION DE METALES PESADOS.**

Pozo:	color con ditizona:	metal detectado:
1 (8-Dic-93)	verde	no hay
2 (8-Dic-93)	rojo vino transparente	Zn
3 (8-Dic-93)	rojo vino transparente	Zn
4 (8-Dic-93)	rojo vino transparente	Zn
5 (8-Dic-93)	amarillo	Ag
1 (6-Jun-94)	amarillo	Ag
3 (6-Jun-94)	rojo vino transparente	Zn
4 (6-Jun-94)	rojo vino transparente	Zn

5 (6-Jun-94)	amarillo	Ag
1 (28-Jul-94)	rojo vino transparente	Zn
2 (28-Jul-94)	naranja	Hg
4 (28-Jul-94)	naranja	Hg
5 (28-Jul-94)	amarillo	Ag
6 (28-Jul-94)	verde	no hay
	amarillo	Ag
	anaranjado	Hg
	rojo cereza opaco	Pb
	rojo cereza transparente	Cd
	rojo vino transparente	Zn

### 6.3 RESULTADOS DEL METODO DE REMOCION DE As POR OXIDACION-COAGULACION

Pruebas efectuadas con o sin auxiliares de coagulación. La cantidad total de As en cada prueba es de 0.3 mg/ L, se preparó a partir de una solución de  $As_2O_3$  en agua (132 mg de  $As_2O_3$  por litro de agua).

A continuación se exhiben los resultados de las pruebas efectuadas con el coagulante  $Fe_2(SO_4)_3$  , junto con el auxiliar de coagulación  $Ca(OH)_2$  , que aceleró la precipitación al proporcionar un medio básico.

**TABLA 16: RESULTADOS DE LA REMOCION POR COAGULACION CON SULFATO FERRICO UTILIZANDO COMO AUXILIAR CAL  $Ca(OH)_2$  .**

Prueba N°:	dosis de $Fe_2(SO_4)_3$ [mg/L]	dosis de $Ca(OH)_2$ [mg/L]	As en el efluente [mg/L]	% de eficiencia	pH final de la mezcla
1	47.8	60	0.011±0.003	95.3±2	6.4
2	56	0	0.01±0.003	96±2	6.3
3	48.6	60	0.009±0.002	96±1.5	6.4
4	67.7	0	0.008±0.002	96.4±1.5	6.4

5	70.2	60	0.0075±0.001	97.2±1	6.4
6	30.2	60	0.007±0.001	97.3±1	6.4
7	56	60	0.007±0.001	97.3±0.5	6.4
8	48.6	60	0.006±0.001	97.9±0.5	6.5
9	52	0	0.005±0.001	98.2±0.35	6.1
10	50.3	0	0.005±0.001	98.3±0.35	6.2
11	47.8	60	0.005±0.001	98.3±0.35	6.5
12	68.7	0	0.004±0.001	98.4±0.3	6.2
13	57	60	0.004±0.001	98.5±0.3	6.5
14	56	0	0.0035±0.001	98.6±0.3	6.4
15	56	60	0.003±0.001	99±0.2	6.6
16	57	0	0.0025±0.001	99.1±0.2	6.4
17	65.3	0	0.0025±0.001	99.2±0.2	6.2
18	67	60	0.0025±0.001	99.2±0.2	6.2
19	60	60.	0.001	99.7	6.2

### Resultados del ensayo de remoción de As por oxidación-coagulación.

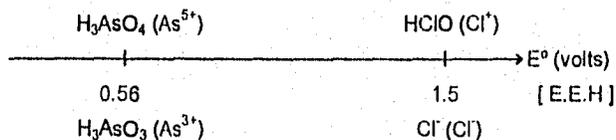
Pruebas efectuadas mediante un pretratamiento de oxidación cuantitativa con agua de cloro (NaClO) y después de la coagulación con  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ . En este caso el agua de cloro actuó como oxidante y acelera el proceso de formación del floculo de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . También la cantidad de As total en el ensayo fue de 0.3 mg/L

Reacciones efectuadas durante el proceso:

- 1.-  $\text{HClO} + \text{H}_3\text{AsO}_3 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_3\text{AsO}_4 + \text{HCl}$  (oxidación de  $\text{As}^{3+}$ )
- 2.-  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \text{ [ppdto]} + 3\text{H}_2\text{SO}_4$  (hidrólisis)
- 3.-  $\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{AsO}_4^- \longrightarrow \text{FeAsO}_4(\text{OH}) + 2\text{H}_2\text{O}$  (quimisorción)

Donde a pH= 6.7 As(V) existe como:  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$

Sistema redox de las especies que se trabajan:



**TABLA 17: RESULTADOS DE REMOCION POR COAGULACION MEDIANTE EL AUXILIAR DE COAGULACION AGUA DE CLORO (NaClO).**

Prueba N°	Dosis de Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> [mg/L]	Dosis de agua de cloro [mg/L]	As en el efluente [mg/L]	% de eficiencia
1	47.8	4	0.029±0.005	90.3±2
2	56	4	0.0275±0.005	91±1.5
3	48.6	4	0.027±0.004	91.5±1.5
4	67.7	4	0.024±0.003	92±1
5	70.2	4	0.022±0.003	92.5±1
6	56	4	0.021±0.002	93±1
7	48.6	4	0.018±0.001	94±0.5
8	52	4	0.015±0.001	95±0.5
9	50.3	4	0.013±0.001	95.7±0.3
10	47.8	4	0.012±0.001	96±0.3
11	68.7	4	0.009±0.001	97±0.3
12	57	4	0.003±0.001	99±0.3
13	56	4	0.002±0.001	99.3±0.3
14	65.3	4	0.001	99.6
15	60	4	0.001	99.6

**6.4 RESULTADOS DE REMOCION DE As EN LOS POZOS AFECTADOS.**

**TABLA 18: RESULTADOS DE REMOCION DE As EN POZOS AFECTADOS DE ACUERDO AL ENSAYO DE JARRAS APLICADO.**

Pozo analizado:	dosis de Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> [mg/L]	dosis de Ca(OH) <sub>2</sub> [mg/L]	dosis de NaClO [mg/L]	As en el efluente [mg/L]	% de eficacia.
1 ( dic 93 )	60	60	4	0.0063±0.001	92.7±1.1
2 ( dic 93 )	60	60	4	0.0156±0.005	91±2,8
3 ( dic 93 )	60	60	4	0.009±0.001	92±0.9
4 ( dic 93 )	60	60	4	0.0487±0.025	95.8±2.1
5 ( dic 93 )	60	60	4	0.0125±0.003	91.1±1.2
1 ( jun 94 )	60	60	4	0.0074±0.001	92.6±1

3 (jun 94)	60	60	4	0.011±0.002	91.1±1.6
4 (jun 94)	60	60	4	0.053 ± 0.03	95.9± 2.3
5 (jun 94)	60	60	4	0.013± 0.003	91±2
1 (jul 94)	60	60	4	0.007± 0.001	92.6±1
2 (jul 94)	60	60	4	0.017± 0.005	91±2.7
4 (jul 94)	60	60	4	0.052± 0.03	95.8±1.8
5 (jul 94)	60	60	4	0.0135± 0.003	91± 2
6 (jul 94)	60	60	4	0.0095± 0.002	92.6±1.5

FIG 10: EXPRESION GRAFICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

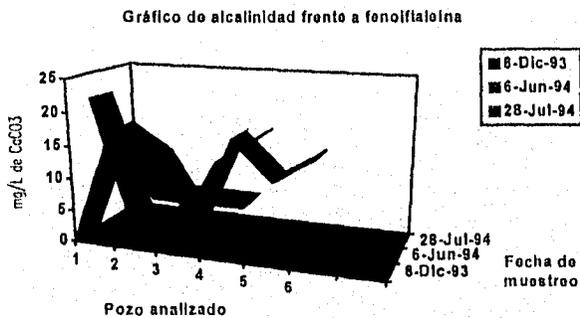
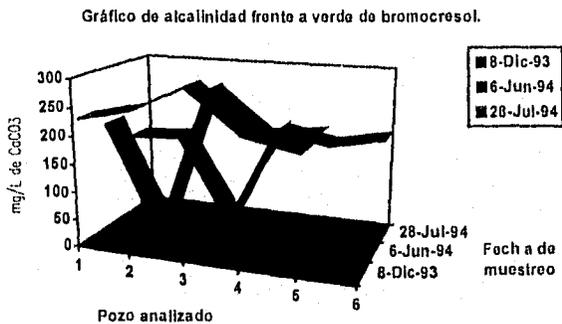


Gráfico de Oxígeno disuelto

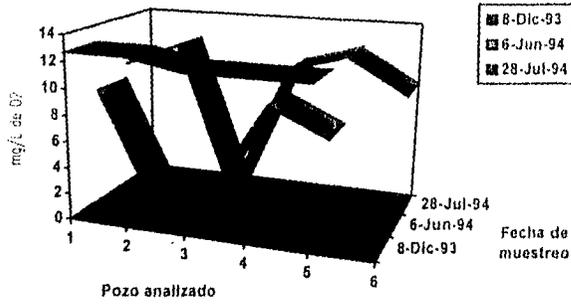


Gráfico de dureza de Ca

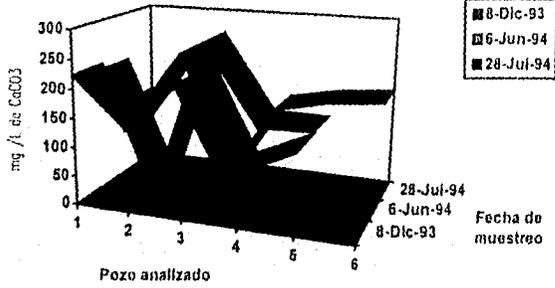


Gráfico de dureza de Mg

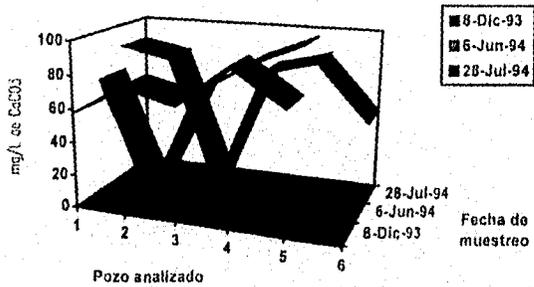


Gráfico de dureza total

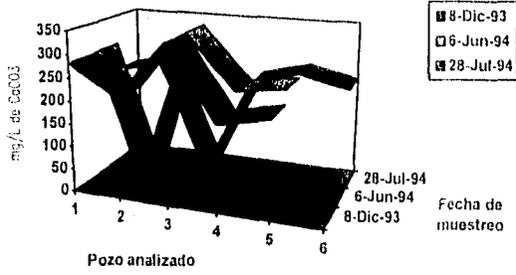


Gráfico de cloruros

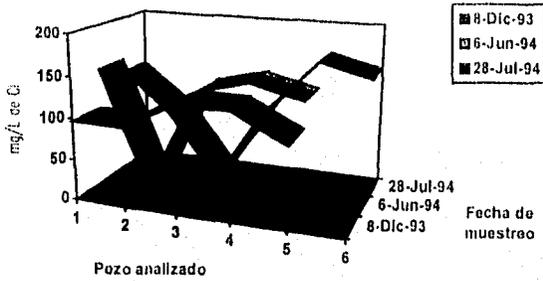


Gráfico de nitrógeno amoniacal

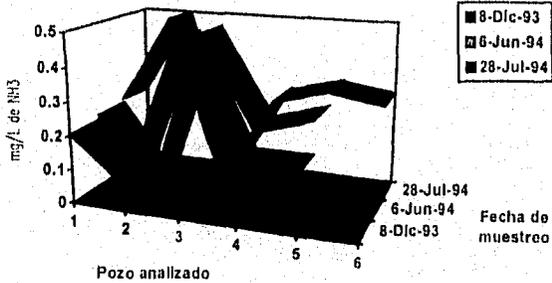


Gráfico de fosfatos

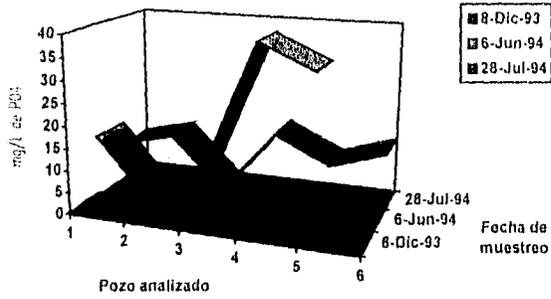


Gráfico de sulfatos.

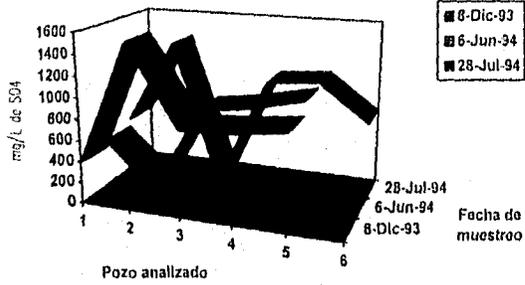


Gráfico de sílice

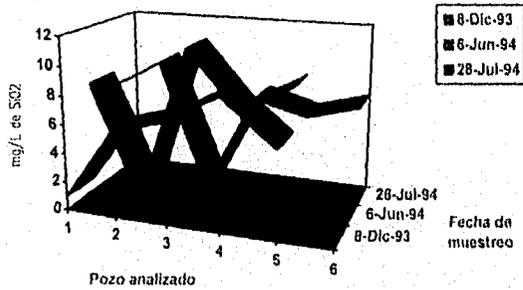


Gráfico de pH

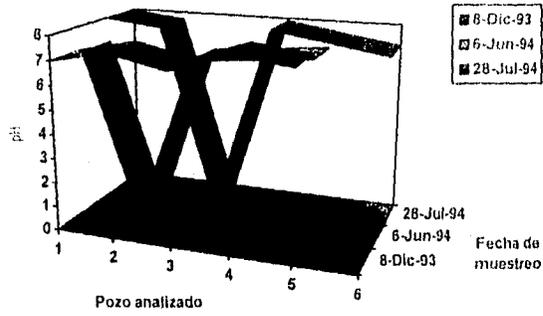


Gráfico de Arsénico

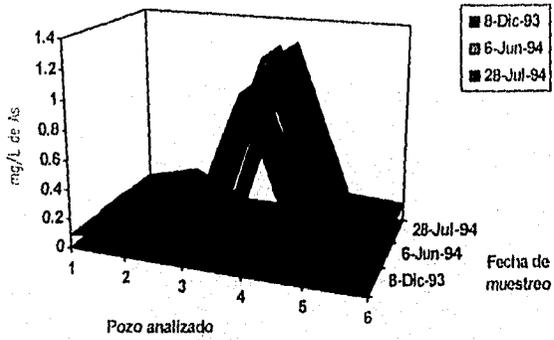


Gráfico de pH

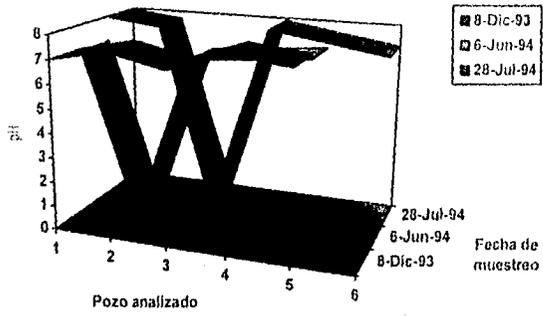
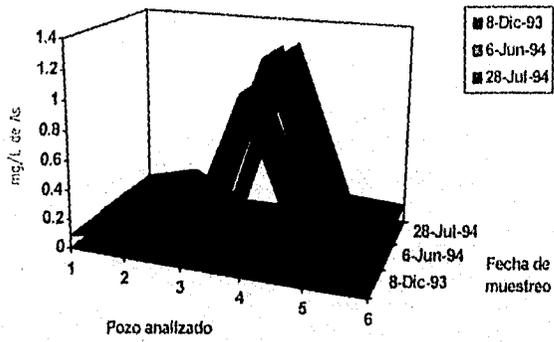


Gráfico de Arsénico



## **VII.- DISCUSION DE RESULTADOS.**

7.1 PARAMETROS FISICOQUIMICOS:

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

A continuación se presentan los parámetros normales para una agua potable:

**TABLA 19: PARAMETROS FISICOQUIMICOS RECOMENDABLES POR LAS NORMAS INTERNACIONALES PARA EL AGUA POTABLE.** 34,37,39

Parámetros:	valor mínimo:	valor máximo:
Alcalinidad	10 mg/L CaCO <sub>3</sub>	500 mg/L CaCO <sub>3</sub>
Dureza	150 mg/L CaCO <sub>3</sub>	300 mg/L CaCO <sub>3</sub>
pH	7	8.5
Sílice	1 mg/L SiO <sub>2</sub>	30 mg/L SiO <sub>2</sub>
Oxígeno disuelto	5 mg/L O <sub>2</sub>	9 mg/L O <sub>2</sub>
Fosfatos	6 mg/L PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	50 mg/L PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Nitrógeno amoniacal	0.1 mg/L NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2 mg/L NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Cloruros	0 mg/L Cl <sup>-</sup>	250 mg/L Cl <sup>-</sup>
Sulfatos	200 mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	400 mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Arsénico	0 mg/L As total	0.05 mg/L de As total (norma internacional para agua potable)

Como nuestro país es uno de los principales productores de : Ag, Zn; Cu, Pb, además de As , y sobre todo destaca el distrito minero de Zimapán en la producción minera de metales de este tipo, la exposición al As es elevada en la población en general, ya sea por contaminación industrial o por hidroarsenicismo crónico regional endémico, la población potencialmente susceptible a la exposición es numerosa y ampliamente dispersa en todo México, sobre todo en Zimapán. Donde cabe destacar que desapareció la industria minera y el As procede de un origen natural por lixiviación de minerales arseniados a través de mantos acuíferos y su paso por distintas capas geológicas del suelo de la región.

De acuerdo a la incidencia de exposición, la entrada de As al organismo puede ser por vía oral o aérea, y es excretado por orina y heces, además de acumularse en huesos , uñas y cabellos.

Con el fin de estudiar una remoción muy cuantitativa de As a bajo costo, se procedió en un principio a la cuantificación del As en muestras de agua potable , para lo cual se utilizó un método colorimétrico [método del dietilditiocarbamato de plata en

piridina], más económico y sencillo de realizar ; para evitar falseamiento de datos se trató de llevar el experimentos en condiciones semejantes a las del medio natural de la región, se repitió el ensayo para minimizar los errores posibles. No obstante se sugiere el método de espectrometría de absorción atómica con modificación para As (hidruros) para la cuantificación de As por ser más sensible.

Sensibilidad:

Método colorimétrico de arsina-dietilditiocarbamato de plata - piridina: 1-20  $\mu\text{g}$  de As en muestra.

Método de espectrometría de absorción atómica por generación de hidruros: 0.01-10  $\mu\text{g}$  de As en muestra.

Además de la medición de As, se practicó una serie de análisis fisicoquímicos de rutina para observar si hay relación entre la calidad de agua y de la presencia de As contaminante, siendo que no se observó diferencia apreciable en la variación de contenido de algún componente de acuerdo a la fecha donde se recolectó.

De acuerdo a los parámetros dados en la tabla 19 podremos decir lo siguiente:

En todos los pozos que fueron analizados, la lectura de todos los parámetros fisicoquímicos caen dentro de los niveles recomendables por las normas [ tablas 12,13,14 ] ,única excepción la del As que en todos los pozos sobrepasa los límites máximos tolerables.

En el caso de la alcalinidad , se puede observar que las muestras recolectadas en 1994 (junio-julio) tienen un valor menor con respecto a las recolectadas en dic 1993, esto se debe a que en época de lluvias se diluye el contenido de  $\text{CaCO}_3$  debido a un aumento de volumen de agua que inciden sobre las paredes y fondo del pozo. Estos resultados son confiables ya que se cuantificó siguiendo procedimientos estándar.

Así mismo describe un comportamiento similar el contenido de oxígeno disuelto ya que a temperaturas bajas se solubiliza más en agua, en temperaturas más cálidas (primavera-verano) se desprende parte de  $\text{O}_2$  disuelto, además de un aumento del caudal de agua que ocurre en temporada de lluvias . Esto se podrá comprobar al observar la tabla 13 ,ya que existe una reducción considerable en los valores ( menores de 10 mg/L), volviendo a subir poco a poco en julio.

La dureza en todas sus formas en los casos de los pozos 1 y 3 exhibe un comportamiento de reducción del contenido conforme avanza la época de lluvias ; no así los casos de los pozos 2,4 y 5 que tienden a aumentar , esto podría explicar el hecho de que estos pozos son de considerable profundidad y el proceso de erosión hídrica en época de lluvias tiende a aumentarlo. Esto es consecuencia de que en el subsuelo de Zimapán existe gran cantidad de caliza en estratos, además de que existen minerales de Ca (principalmente silicatos).

En los casos de los cloruros, se aprecia un aumento de acuerdo a lo mostrado en la tabla 13, de aquí podemos observar que dicho aumento es favorecido por la presencia de contaminación humana, infiltraciones en el subsuelo de ríos afluentes del Tula así como de los propios desechos de la población que se infiltran en el subsuelo contaminando en cierto grado los mantos freáticos. Una presencia de cloruros es indicio de actividad humana y en el caso de Zimapán no por la existencia de minerales de cloruro, cabe señalar que en Zimapán no existen industrias químicas, lo cual esto no es una razón para explicar el posible aumento de la cantidad de cloruros en el agua de consumo.

En el caso del nitrógeno amoniacal, el amoníaco se encuentra de manera natural en aguas superficiales y residuales, suele ser muy baja en aguas de origen subterráneo ya que es absorbida por las arcillas y no se puede extraer fácilmente, su presencia en el agua de Zimapán se debe al metabolismo de compuestos nitrogenados por parte de organismos animales y degradación de la urea; en un agua potable clorada no existe  $\text{NH}_3$  libre, sino cloraminas derivadas [ $\text{NH}_2\text{Cl}$ ,  $\text{NHCl}_2$  ]; las cuales son muy irritantes, resultando de la combinación de la cantidad de cloro añadido con el  $\text{NH}_3$  presente. Como en el pueblo de Zimapán el agua es extraída del subsuelo, el  $\text{NH}_3$  natural no existe , sino que es el resultado de la infiltración de productos de desecho humanos en los mantos freáticos.

La presencia de sulfatos en el agua de consumo se debe a la existencia de minerales de sulfuro ( $\text{S}^2$ ) , esto durante el proceso de erosión y lixiviación y a través de los años, sufren de un proceso de oxidación sucesiva por lo cual podemos encontrarlos como sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), el distrito minero de Zimapán es muy rico en minerales de sulfuros metálicos (principalmente de: Ag, Pb, Zn y Fe), de aquí podemos explicar las cantidades de sulfatos en el agua de consumo, estos sulfatos no son dañinos y actúan como catalizadores en el cuerpo humano por lo cual no es una

situación de alerta; pero como está íntimamente asociado con el As ( en forma de los minerales  $As_2S_3$  y  $FeAsS$ ), podemos relacionar un aumento de sulfatos con un probable aumento de As en las aguas de pozo al cuál se está analizando.

El fósforo esta íntimamente relacionado con el As pues presentan un comportamiento químico similar, la presencia de fosfatos se puede relacionar con el comportamiento del As , los fosfatos se pueden presentar en solución o como costras cristalinas sobre la superficie acuosa o paredes del pozo. Un probable origen de los fosfatos en Zimapán se debe al uso de los metafosfatos en la depuración del agua y a la contaminación de los mantos ( uso de jabones y fertilizantes basados en fosfatos), que no utilizan los propios de la región o siendo utilizados en baja escala, pero que provienen de las regiones lejanas [ Valle del Mezquital Hgo ( zona agrícola ) y Valle de México ( zona urbana y agrícola ) ] a través del Río Tula y afluentes que contaminan algunos pozos del distrito.

La presencia de sílice en el agua indica un proceso continuo de erosión hídrica de arenas y/o minerales de silicatos, especialmente en rocas ígneas, al sílice natural puede existir como suspensiones o soluciones acuosas de silicatos, como una regla general toda agua de origen geotérmico o volcánico contiene sílice, en los alrededores de Zimapán existen municipios donde existe la geotermia (Ixmiquilpan-Tecoautla, Hgo y San Joaquín-Cadereyta, Qro).

Las diferencias en el pH en muestras de agua dependen del contenido de iones:  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $S^{2-}$  presentes en solución en un pozo dado: También influyen : profundidad del pozo, cercanía de un estrato de suelo en el pozo, grado de infiltración y lixiviación sobre yacimientos minerales existentes, cercanía de un foco de contaminación (ríos contaminados por industrias o residuos humanos).

Casi todos los parámetros fisicoquímicos exhiben un comportamiento peculiar, es decir: un aumento al inicio de la época de lluvias (mayo-junio) , ocasionado por un aumento de velocidad de erosión hídrica al haber más agua que choca sobre las paredes y fondo del pozo, de ahí que todos los valores reportados en la tabla 13 , sean los más altos de todos los pozos analizados. Conforme avanza la temporada ( julio-agosto-septiembre) al disponer de un volumen mayor de agua, hay una dilución de todo el material inicialmente disuelto, aunque exista el proceso de lixiviación, de esto podemos explicar por que los resultados de la tabla 14 (época julio-agosto) sean menores en cantidad en comparación a los de la tabla 13 (época mayo-junio) , pero a su vez mayores en comparación a la tabla 12 (época noviembre-diciembre-enero), ya

que al final de cada año al disponer de poca agua los materiales disueltos al inicio de la época de lluvias se precipitan y sedimentan al fondo del pozo. Por las fórmulas de los minerales existentes en Zimapán en la actualidad, se descarta el origen natural de  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{NH}_4^+$  en el agua potable, y si una cantidad apreciable de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el medio.

Así mismo podemos confirmar que sí hay erosión de yacimientos minerales que contienen sulfuro metálico, ya que en el ensayo de detección de metales de la ditizona, se encontraron: Ag, Zn y Hg, aunado al hecho de la cantidad apreciable de sulfatos presente en el agua analizada.

## 7.2 METODOS DE REMOCION:

En el proceso de remoción por coagulación se ensayó con 3 sales:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  y  $\text{FeCl}_3$ , donde se analizó: rapidez de formación del floculo, estabilidad del floculo en función del pH y eficacia de remoción, donde se obtuvo lo siguiente.

El mejor coagulante fue sulfato férrico [ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ], ya que el floculo producido permanece inalterado en un amplio intervalo de pH (3-12), este floculo es lento en aparecer (aproximadamente 15-30 min), este precipitado no presenta el fenómeno de redisolución durante 2 días posteriores al inicio del tratamiento y adsorbe más sobre su estructura superficial en comparación a la otra sal férrica ( $\text{FeCl}_3$ ).

El intervalo óptimo de pH donde la remoción de As por coagulación con  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  es eficiente en un 90% por lo menos es de 6.2-6.7, los auxiliares de coagulación deben administrarse en dosis pequeñas, de lo contrario interfieren con el proceso de coagulación, al disminuir el número de poros y así disminuir la posibilidad de quimisorción de As sobre el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Un auxiliar de coagulación sólo acelera el proceso de formación del floculo. De aquí se escogió al  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como auxiliar ya que sólo una pequeña cantidad del sólido hizo un incremento del pH al deseado (6-7).

Para la etapa previa de oxidación de As(III) a As(V), el mejor agente oxidante resultó ser el agua de cloro ( $\text{NaClO}$ ), ya que además de oxidar cuantitativamente al As(III), es un poderoso agente desinfectante, facilitándose así el proceso de tratamiento-potabilización; la sal  $\text{KMnO}_4$  se descartó ya que oxida lentamente al  $\text{As}^{3+}$  (tiempo de reacción mayor a 2 hrs, aún con calor), dando una solución amarilla con todos los aspectos poco apetecibles para consumo [ todos de  $\text{MnO}_2$  ], la oxidación requiere de medio ácido para ser cuantitativa, pero esto plantea un posterior tratamiento para eliminar esta acidez, si se utilizara  $\text{KMnO}_4$  se requiere un tratamiento

posterior para la remoción de lodos de  $MnO_2$  y potabilización posterior, también se descartó  $CuSO_4$  por dar un aspecto similar [ lodos azules de  $Cu(OH)_2$  ].

Una vez realizada las pruebas de jarras para la remoción de As, se sugiere la dosificación siguiente para aguas potables con contenidos de As que excedan las recomendables por las normas internacionales , aplicable a las existentes en el distrito minero de Zimapán Hgo.

**TABLA 20: DOSIS RECOMENDABLES PARA EL PROCESO DE REMOCIÓN DE AS POR OXIDACION-COAGULACION**

Aplicables para aguas con contenido de As comprendido entre 0.05-0.35 mg/lt.

Dosis de $Fe_2(SO_4)_3$ [mg]	Dosis de $Ca(OH)_2$ [mg] auxiliar incrementador de pH	Dosis de $NaClO$ [mg] auxiliar oxidante
55-65	60	3.5-5

**Estas cantidades son aplicables para un litro de agua a tratar**

Una sugerencia que deberá ser advertida por el municipio de Zimapán, Hgo es que se vuelva a diluir el agua proveniente de los pozos afectados en un depósito general , en especial el agua del pozo 4 (El Muhi), como una solución básica primordial (ya que el agua del pozo 4 (El Muhi) contiene As en cantidades mayores a 1mg/L, 20 veces mayor a la cantidad máxima tolerable de As presente en aguas de consumo (según las normas internacionales de calidad del agua de uso humano) ).

Se deberá iniciar a la brevedad posible un proceso de remoción de As en el agua, se sugiere el método de oxidación-coagulación- quimisorción; ya sea por la economía de reactivos [ $Fe_2(SO_4)_3$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $NaClO$  ], sencillez y facilidad de operación , rapidez de los resultados: Ya que de no ser así seguirán apareciendo casos similares a los descritos para hidroarsenicismo crónico regional endémico , pero en personas muy sensibles [ niños y personas jóvenes (lo cual está ocurriendo ya)] ocasionando una disminución en el nivel de vida existente en la región, ya que de por sí prevalece en condiciones muy precarias, de aquí la urgencia en iniciar soluciones inmediatas de remedio a esta situación existente en la zona de Zimapán.

## **VIII.- CONCLUSIONES**

1.- Por medio de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de agua potable obtenidas en el municipio de Zimapán Hgo, en donde se sospechaba un nivel de As por encima de lo máximo tolerable, recomendado por las normas internacionales, se cuantificó el contenido de As en éstas, utilizando un método colorimétrico sencillo y rápido de realizar, donde se descubrió que los valores obtenidos fluctúan entre 0.087- 1.28 mg/L de As ; estos valores son confirmación segura de que las aguas de los pozos se encuentran contaminadas con As, procedente de infiltraciones de lixiviaciones de aguas subterráneas sobre yacimientos arseniados. En base a estos resultados, se procedió a buscar un método de remoción de As rápido, sencillo y económico. De acuerdo a los experimentos realizados se seleccionó el método de oxidación-coagulación, donde el coagulante adecuado para la remoción de As fue la sal  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , donde la cal apagada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el agua de cloro ( $\text{NaClO}$ ) son excelentes auxiliares para la coagulación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Se comprobó que el intervalo óptimo de pH para que la remoción de As sea excelente (mayor a un 95%), es de 6.2-6.7

2.- Se cumplió el propósito inicial de no alterar las propiedades organolépticas del agua de entrada, obteniéndose así un agua potable con cantidades inapreciables de As sin olores o sabores secundarios molestos debido al tratamiento, apta para un consumo inmediato.

3.- Finalmente se verificó la eficacia del proceso de remoción de As por coagulación, al obtener altos porcentajes de remoción, con la factibilidad de economía de costos con altos rendimientos, para una aplicación inmediata al problema con rapidez de resultados.

**ANEXO 1: CALCULOS PARA LA EXPRESION DE RESULTADOS DE LOS  
ANALISIS FISICOQUIMICOS PRACTICADOS A LAS AGUAS.**

**Alcalinidad:**

Alcalinidad a la fenolftaleína (alcalinidad parcial):

$$\text{Alc} = A \cdot N \cdot 50000 / \text{mL de muestra}$$

Alcalinidad al verde de bromocresol (alcalinidad total):

$$\text{Alc} = B \cdot N \cdot 50000 / \text{mL de muestra}$$

Donde:

A= mL de ácido estándar valorado usado en la determinación

B= mL de ácido estándar utilizado para el segundo vire

**Cloruros:**

$$\text{mg/L de Cl}^- = A \cdot N \cdot 35450 / \text{mL de muestra}$$

Donde: A= mL de  $\text{AgNO}_3$  consumidos

B= normalidad del  $\text{AgNO}_3$

**Dureza:**

Total:

$$\text{mg/L de CaCO}_3 = A \cdot F \cdot 1000 / \text{mL de muestra}$$

Donde: A= mL de EDTA usados para el vire

F= factor equivalente de  $\text{CaCO}_3$

De calcio:

$$\text{mg/L de CaCO}_3 = A \cdot F \cdot 400.8 / \text{mL de muestra}$$

Donde: A= mL de EDTA usados para el vire

F= factor equivalente de  $\text{CaCO}_3$

**Fosfatos :**

Dado por la curva patrón específica, de donde:

$$\text{mg/L de PO}_4^{3-} = \text{mg de PO}_4^{3-} \cdot 1000 / \text{mL de muestra}$$

**Nitrógeno amoniacal:**

Dado por la curva patrón específica de donde:

$$\text{mg/L de NH}_4^+ = \text{mg de NH}_4^+ \cdot 1000 / \text{mL de muestra}$$

**Oxígeno disuelto:**

$$\text{mg/L de O}_2 = \text{mL de Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2.03$$

**Sílice:**

Dado directamente por el medidor Hellige

**Sulfatos:**

$$\text{mg/L de SO}_4^{2-} = \text{mg de BaSO}_4 \cdot 411.5 / \text{mL de muestra}$$

## **IX.- BIBLIOGRAFIA**

- 1.- COTTON, Albert F. **Química inorgánica avanzada** Edit. LIMUSA, México, 1988 p.p 512-545.
- 2.- BARGALLO, Modesto **Tratado de química inorgánica fundamental y sistemática** Edit. Porrúa, México, 1972 p.p 524-639.
- 3.- **CRC handbook of chemistry and physics** CRC Press INC., USA, 1993, section 4-4.
- 4.- JUNCO MUÑOZ, P. **Arsénico** IMSS (Subdirección General Médica, Jefatura de Servicios de Medicina del trabajo), México, 1985.
- 5.- WORLD HEALTH ORGANIZATION **Arsenic** W.H.O, Geneva, 1981, 174 p.
- 6.- GALVAO, Luiz A.C y Germán Corey **Arsénico** Ediciones ECO, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud (O.P.S - O.M.S ), México, 1987 p.p 13-22, 33.
- 7.- DUFFUS, J.H **Toxicología ambiental** Ediciones OMEGA, España, 1983 173p.
- 8.- NIOSH **Registry of toxic effects of chemicals substances: users guide** NIOSH- U.S-Department of health and human services (Public Health Service), USA, 1987, p.p 581-597.
- 9.- INTERNATIONAL TECHNICAL INFORMATION INSTITUTE **Toxic and hazardous industrial chemicals safety manual: For handling and disposal with toxicity and hazard data** ITH, Japan, 1988 p.p 50-54.
- 10.- LEWIS, Richard J. **Hazardous chemicals: desk reference** Ed. Van Nostrand-Reinhold, U.S.A, 1993 p.p 90-100.
- 11.- TREVEHICK, R.A **Environmental and industrial health hazards: A practical guide** William Heinemann Medical Books, United Kingdom, 1973 214p.

- 12.-HUTCHINSON T.C and K.M Meema Lead, mercury, cadmium and arsenic in the environment (SCOPE-ICSU) Edit John Wiley & sons, U.S.A, 1987 p.p 61-68, 175-185.
- 13.-De FERNICOLA, Nilda y Pedro Jauge Nociones básicas de toxicología (O.P.S.-O.M.S) Ediciones ECO, México, 1985 113p.
- 14.-PEREIRA BASTOS, María Elena y Nelson Nefussi Aspectos toxicológicos de agentes químicos: Programa Internacional de seguridad de las sustancias químicas Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud (O.P.S.-O.M.S), Ediciones ECO, México, 1986 p.p 9-16.
- 15.-LEE, D.H.R. Metallic contaminants and Human Health Academic Press Inc., U.S.A, 1972 141p.
- 16.-CARLSON, Bonnie, Harry V. Ellis and Joy L. McCann Toxicology and biological monitoring of metals in humans Lewis Publishers Inc., U.S.A, 1991 p.p 27-33
- 17.-MANAHAN, Stanley E. Toxicological chemistry: A guide to toxic substances in chemistry Lewis Publishers Inc., U.S.A, 1991 p.p 109-111, 136-139.
- 18.-DREISBACH, R.H Handbook of poisoning, prevention, diagnosis and treatment Medical Publications LANGE, U.S.A, 578p.
- 19.-ASTOLFI et al Hidroarsenicismo crónico regional endémico Ediciones Cooperativa General Belgrano -Aristóbulo del Valle, Argentina, 1982 144p.
- 20.-FRIBERG, L. et al Handbook of the toxicology of metals Edit. Elsevier-North Holland Biochemical Co, Netherlands, 1979 709p.
- 21.-REYNAGA, O. Jesús y Silvia Vega G. Evaluación epidemiológica de riesgos causados por agentes químicos ambientales Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud (O.P.S.- O.M.S) Ediciones ECO, México, 1985

- 22.-WORLD HEALTH ORGANIZATION Task group on environmental health criteria for arsenic WHO(environmental health criteria),Geneva,1981.
- 23.-SQUIBB,K.S and B.A Fowler The toxicity of arsenic and its compounds : biological and environmental effects of arsenic Edit .Elsevier, Amsterdam, 1983.
- 24.-INEGI HIDALGO: Resultados definitivos tabulados básico XI censo general de población y vivienda (tomos I yII) , INEGI, México,1991, 1225p.
- 25.-CONGRESO GEOLOGICO INTERNACIONAL Geología a lo largo de la carretera entre México,D.F- Pachuca,Hgo- Zimapán,Hgo: Distritos mineros de Pachuca-Real del Monte- Zimapán, Hgo. México, 1956 p.p 11-21, 59-71.
- 26.-CARRILLO,M y Sutter M. Tectónica de los alrededores de Zimapán Hgo y Estado de Querétaro: Libro guía de la excursión geológica a las áreas de : Zimapán,Hgo y Querétaro Sociedad Geológica Mexicana, 6a. Convención Nacional, México, 1982 p.p 1-26.
- 27.-SALAS,Guillermo P. Geología Económica de México F.C.E,México,1988 p.p 383-400.
- 28.- SALISBURY DANA, Edward Tratado de Mineralogía:tratado sobre cristalografía y mineralogía física Edit CECSA, México, 1973 911p.
- 29.-DIAZ MAURINO,C. Iniciación práctica a la mineralogía Edit. Alhambra,España,1976 536p.
- 30.-CETENAL Cartas geográficas: región F-14C-58 (Zona de Tecozautla,Hgo) y región F-14C-68 (Zona de San Joaquín, Qro) CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional), México, 1976.

- 31.-GONZALEZ VILLALBAZO, Leopoldo Geología y estudio geofísico:  
 Área del Monte, Distrito Minero de Zimapán, Hgo  
 Tesis: Facultad de Ingeniería (U.N.A.M), México, 1990 51p.
- 32.-SANCHEZ CRISPIN, Alvaro La actividad minera en el municipio de  
 Zimapán, Hgo: Análisis geográfico-económico Tesis: Facultad  
 de Filosofía y Letras (U.N.A.M), México, 1991 145p.
- 33.-U.N.A.M. Tratamiento de aguas  
 residuales, municipales, industriales y de reuso División de  
 Educación Continúa, U.N.A.M- Facultad de Ingeniería, 1985, Documento N- 4°.
- 34.-A.P.H.A- A.W.W.A- W.P.C.F Métodos normalizados para el  
 análisis de aguas potables y residuales Ediciones Díaz de  
 Santos, España, 1992.
- 35.-MASKEW FAIR, Gordon ,John Charles Geyer y Daniel Alexander Okun Ingeniería  
 Sanitaria y de aguas residuales Edit. LIMUSA, México, 1987  
 p.p 369-400.
- 36.-POWELL, Shepard Acondicionamiento de aguas para la industria  
 Edit LIMUSA, México, 1986 p.p 35-52.
- 37.-RODIER, Jean Análisis de las aguas (naturales, residuales y  
 de mar) Ediciones OMEGA, España, 1989 1059p.
- 38.-GUZMAN GARCIA, Guindalinda de Jesús Enseñanza experimental del  
 curso de plantas de tratamiento de aguas Tesis: F.E.S.C-  
 U.N.A.M, México, 1988 317p.
- 39.-ORGANIZACION PANAMERICANA DE LA SALUD (O.P.S) Guías para la  
 calidad de agua potable: Recomendaciones O.P.S, U.S.A, 1985  
 136p.
- 40.-ALBORES, A. Estudio comparativo de hidroarsenicismo crónico  
 regional en 2 comunidades rurales de la región lagunera  
 de México Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana, México, vol  
 86, (3), 1979, p.p196.

- 41.-CEBRIAN,M.E et al   Chronic arsenic poisoning in the north of Mexico   Human Toxicology, U.S.A, vol 2, 1983   p.p 121-133.
- 42.-BROWN,K.G et al   A dose-response analysis of skin cancer from inorganic arsenic in drinking water   Risk analysis, U.S.A, vol 9,1989   p.p 519-528.
- 43.-U.S Environmental Protection Agency (EPA)   Special report on ingested inorganic arsenic   EPA, Washington, 1988.
- 44.-REYMANN F, R.Moller and A.Nielsen   Relationship between arsenic intake and internal malignant neoplasms   Arch Dermatology, U.S.A, vol 114,1978   p.p378-381.
- 45.-BATES,M.N A.H Smith and Rich C. Hopenhayn   Arsenic ingestion and internal cancers:a review   American Journal of Epidemiology, U.S.A, vol 135,1992   p.p 462-476.
- 46.-STOHRER,G   Arsenic: oppurtunity for risk assessment   Toxicology U.S., vol 65,1991   p.p 525-531.
- 47.-CONTRERAS PEREZ,Juan y Miguel Carrillo Martínez.   Los yacimientos de:Pb,Zn y Ag de Zimapán,Hgo y alrededores y la deformación dúctil-frágil   Revista de Ingeniería, vol 64,1994   p.p 51-58.
- 48.-NAVARRO,Ricardo   La actividad minera en Zimapán,Hgo   Revista de minería de CAMIMEX, vol 8, 1982   p.p 9-11.
- 49.-WEBER, Walter J.

- 41.-CEBRIAN,M.E et al    Chronic arsenic poisoning in the north of Mexico    Human Toxicology, U.S.A, vol 2, 1983    p.p 121-133.
- 42.-BROWN,K.G et al    A dose-response analysis of skin cancer from inorganic arsenic in drinking water    Risk analysis, U.S.A, vol 9,1989    p.p 519-528.
- 43.-U.S Environmental Protection Agency (EPA)    Special report on ingested inorganic arsenic    EPA, Washington, 1988.
- 44.-REYMANN F, R.Moller and A.Nielsen    Relationship between arsenic intake and internal malignant neoplasme    Arch Dermatology, U.S.A, vol 114,1978    p.p378-381.
- 45.-BATES,M.N A.H Smith and Rich C. Hopenhayn    Arsenic ingestion and internal cancers:a review    American Journal of Epidemiology, U.S.A, vol 135,1992    p.p 462-476.
- 46.-STOHRER,G    Arsenic: oppurtunity for risk assessment    Toxicology,U.S. vol 65,1991    p.p 525-531.
- 47.-CONTRERAS PEREZ,Juan y Miguel Carrillo Martínez.    Los yacimientos de:Pb,Zn y Ag de Zimapán,Hgo y alrededores y la deformación dúctil-fráglil    Revista de Ingeniería, vol 64,1994    p.p 51-58.
- 48.-NAVARRO,Ricardo    La actividad minera en Zimapán,Hgo    Revista de minería de CAMIMEX, vol 8, 1982    p.p 9-11.
- 49.-WEBER, Walter J.