

2
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

ESTUDIO DE LA CONTAMINACION DEL AGUA
DE LA COMARCA LAGUNERA POR ARSENICO.

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO

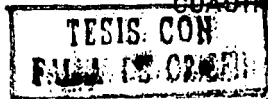
P R E S E N T A :

RAFAEL ACEVEDO PEÑA

DIRECTOR DE TESIS:
ING. MARGARITA ALONSO ESPINOSA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1988





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 está 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.

Indice

a) Resumen

1.- Introducción

2.- Objetivos

3.- Antecedentes

3.1 Nacionales

3.2 Extranjeros

3.3 Ubicación y localización del área

3.4 Población y localidades

3.5 Actividades socioeconómicas

3.6 Fuentes de abastecimiento de agua

3.7 Presencia de arsénico en el agua

3.8 Origen de la contaminación arsenical

3.9 Actividades agropecuarias

3.10 Toxicidad del arsénico

3.11 Absorción y metabolismo en las plantas

4.- Métodos de tratamiento de aguas

4.1 Técnicas de desalinización más comunes(Principios básicos)

4.2 Técnicas alternativas (Soluciones paliativas)

4.3 Técnicas más apropiadas para el caso en estudio, análisis físicoquímico y económico de cada una de ellas.

4.3.1 Intercambio iónico

4.3.2 Osmosis inversa

4.3.3 Oxidación-coagulación

5.- Recomendaciones y conclusiones

- Bibliografía

- Apéndices

a) Resumen

A continuación se presenta un estudio de un problema muy serio de contaminación del manto acuífero de la Comarca Lagunera de la República Mexicana producido por la presencia de sales solubles de arsénico. Este problema debe ser resuelto en un corto plazo por lo cual es necesario revisar algunos métodos o técnicas de tratamiento de aguas para remover las sales de arsénico.

Es importante mencionar que la Comarca Lagunera (Tlahualilo, Mapimí y Gómez Palacio en Durango; Torreón, Francisco I. Madero, San Pedro de las Colonias, Matamoros y Viesca en Coahuila) tiene concentraciones de arsénico mayores al límite permisible de la SSA (Secretaría de Salubridad y Asistencia) de 0.05 ppm ya que se encuentran pozos con concentraciones de 0.5 ppm. este exceso de arsénico en el agua ocasiona daños a la salud humana que van desde el cáncer palmo-plantar hasta la muerte.

El problema ecológico se ha hecho trascendental principalmente porque la población rural es la que está expuesta a los padecimientos de salud antes mencionados.

Se analizan las técnicas más apropiadas para solucionar el problema como el intercambio iónico, ósmosis inversa y la técnica de oxidación-coagulación, además se proporcionan técnicas alternativas o soluciones individuales.

El resultado del análisis fisicoquímico y económico muestra que la oxidación-coagulación tiene más ventajas en relación con las otras dos mencionadas, tales ventajas se refieren a la sencillez en el funcionamiento del proceso y uno muy importante el agua tratada tiene un bajo costo. Los procesos de intercambio iónico y de ósmosis inversa resultan más costosos además de su complejidad de operación y requieren de personal especializado.

1.-Introducción

1.- Introducción

Entre los problemas geohidrológicos nuestro país destaca el de la Región Lagunera, pues dadas las características ecológicas de la zona, la sobreexplotación de agua subterránea y la demanda de las actividades productivas, se ha generado el agotamiento gradual del recurso hídrico y su deterioro, al contaminarse, con arsénico. Este elemento se encuentra en el subsuelo, ahí los compuestos arsenicales son disueltos por el agua infiltrada y son arrastrados hasta los mantos acuíferos.¹⁵

El incremento en la demanda del agua, como resultado del crecimiento demográfico y económico producidos por el desarrollo industrial y en la explotación agrícola intensiva, ha originado una competencia por este recurso que, de no establecerse normas para su explotación racional, afectará el desarrollo económico de la región.

Las actividades antes mencionadas requieren grandes volúmenes de agua, así como una calidad aceptable del líquido para que en el futuro no cause daños irreversibles, provocados por el contenido de arsénico en el agua proveniente de pozos (hidroarsenicismo). Este tipo de problema afectaría a todas aquellas actividades que, de un modo u otro, requieren abastecer de agua.

El deterioro de la calidad ambiental de la Región Lagunera ha sido notorio y altamente significativo; esto puede corroborarse al comparar las condiciones ecológicas, desarrollo agrícola y urbano-industrial del área que ocupa la llanura de Wayrán, con la situación que guarda el Valle de Villa Juárez.

Los mantos acuíferos de la llanura, donde anteriormente afloraba el agua subterránea, como en Tlahualilo y Wayrán, han descendido drásticamente en su nivel varias decenas de metros, debido al volumen de agua extraída del subsuelo, para atender básicamente la demanda del sector agropecuario. Esto ha provocado el desecamiento de las grandes lagunas, el agotamiento de manantiales e inutilizado numerosos pozos. De esta forma en 40 años de explotación exhaustiva, el espejo de agua de excelente calidad que afloraba se ha abatido entre 50 y más de 100m.; ahora el agua (contaminada por arsénico) debe ser extraída de profundidades

CAPITULO TERCERO

entre 80 y 100 m., lo que tiene un costo económico y social muy alto, lo que resulta en un encarecimiento de la agricultura de riego por bombeo; al mismo tiempo la población rural que habita en esa zona tiene que abastecerse de agua proveniente de esos mismos pozos, para satisfacer sus necesidades domésticas, lo que ha provocado daños a la salud pública. De acuerdo con estudios médicos realizados en la localidad, del 30 al 60% de la población padece trastornos somáticos, así como enfermedades en la piel y manos (cáncer palmoplantar) causados por intoxicación arsenical crónica.¹⁹

En contraste con los acuíferos de la llanura, el del Valle de Villa Juárez contiene agua de excelente calidad, que se encuentra a una profundidad que no excede a los 80 m, de tal forma que está destinada como reserva para abastecer de agua potable a la conurbación de La Laguna. Esto se debe a que su recarga proviene del paso del Río Nazas, que se ve favorecido por los materiales altamente permeables que lo constituyen y por la baja demanda de agua subterránea, pues las actividades agropecuarias se abastecen también de agua superficial y no existe actividad industrial que demande este líquido, ni asentamientos humanos mayores de 10 000 habitantes.

La problemática es grave ya que la población de la zona rural principalmente, se abastece de agua extraída del subsuelo, la cual contiene cantidades de arsénico mayores al nivel permisible máximo de 0.05 ppm, la cual al ingerirse provoca serios daños, a la salud humana como la hiperpigmentación el cáncer palmoplantar padecimientos que pueden con el tiempo tener consecuencias fatales. Para evitar los problemas anteriores es necesario investigar la posibilidad de reducir, hasta límites permisibles, el contenido de arsénico en el agua para el consumo humano.

2.-Objetivos

3.- Objetivos

Con el objeto de proponer algún método de solución a éste problema, se hizo un estudio de los procesos que se han analizado de tratamiento de aguas con un contenido de arsénico relativamente elevado.

En base a lo anterior se propone un tratamiento de regeneración de las aguas contaminadas con arsénico.

3.-Antecedentes

3.- Antecedentes

3.1 Nacionales

En la Republica Mexicana la contaminación del agua subterránea por arsénico tiene lugar en la Comarca Lagunera, aunque se tienen informes de la presencia de este fenómeno en aguas provenientes de pozos de una pequeña comunidad del Estado de Puebla llamada Santa Cruz Achichipilco.²

Los municipios de la Comarca Lagunera más afectados son principalmente Francisco I. Madero, Coah., (El Venado, Oztanduri, Sofia, Finisterre, El Cantabro, La Pinta poblados que más daños han sufrido por la presencia de este elemento en el agua potable), San Pedro de Las Colonias, Coah. y Tlahualilo, Dgo.¹⁵

3.2 Extranjeros

Información reciente menciona que la localidad de Córdoba (Argentina) presenta condiciones similares a las localidades de Antofagasta (Chile), Taiwan (China) y Comarca Lagunera (México) en donde el agua potable se obtiene de formaciones geológicas con cantidades de arsénico mayores al límite permisible de 0.05 ppm. Los habitantes de estos sitios pueden sufrir la incidencia de cáncer en la piel. Estas regiones casos únicos en el mundo se les conoce como zonas de hidroarsenicismo crónico regional endémico (HCRE).²

La alternativa de solución al arsenicismo en el agua subterránea para el consumo humano ha sido la técnica de oxidación-coagulación con cloruro férrico, que en el caso de la planta de China opera satisfactoriamente desde el año de 1969.²⁰

Existen otros lugares en el mundo donde se presenta contaminación por arsénico, sólo que éste se encuentra en aguas superficiales casos de algunos rios de EUA que contienen valores menores de 0.01 ppm, en rios de Alemania Federal se encontró una concentración de 0.003 ppm y en lagos otra concentración de 0.004 ppm, en Noruega una concentración de 0.0025 ppm.¹⁹ También existen cantidades de arsénico en el agua de mar, cuyos valores se encuentran de 0.001 a 0.008 ppm.

Se han encontrado altos niveles de arsénico en aguas con actividad termal; este es el caso de las aguas termales de Nueva Zelanda que contienen una alta concentración de 8.5 ppm de arsénico. Otro caso se presenta en el agua geotérmica de Japon con niveles de arsénico de 1.8 a 6.4 ppm y las corrientes vecinas contienen más o menos 0.002 ppm.¹⁹

3.3 Ubicación y Localización del área.

La Comarca Lagunera se localiza (plano No.1) en el límite de los Estados de Coahuila y Durango, esta comprendida entre los paralelos 25°08' y 26°41' de latitud norte y entre los meridianos 101°52' y 104° de longitud oeste. Tiene como límites al Norte la Sierra de la Paila; al Sur la Sierra de las Noas; al Oriente el Desierto de Mayrán; y al Poniente el Bolsón de Mapimí. Dentro de la regionalización ecológica se localiza en el plano No. 2

Zona Ecológica: Arida

Provincia Ecológica: No. 20 Bolsón de Mapimí
 No. 22 Laguna de Mayrán
 No. 25 Sierra de la Paila
 No. 27 Sierras Transversales

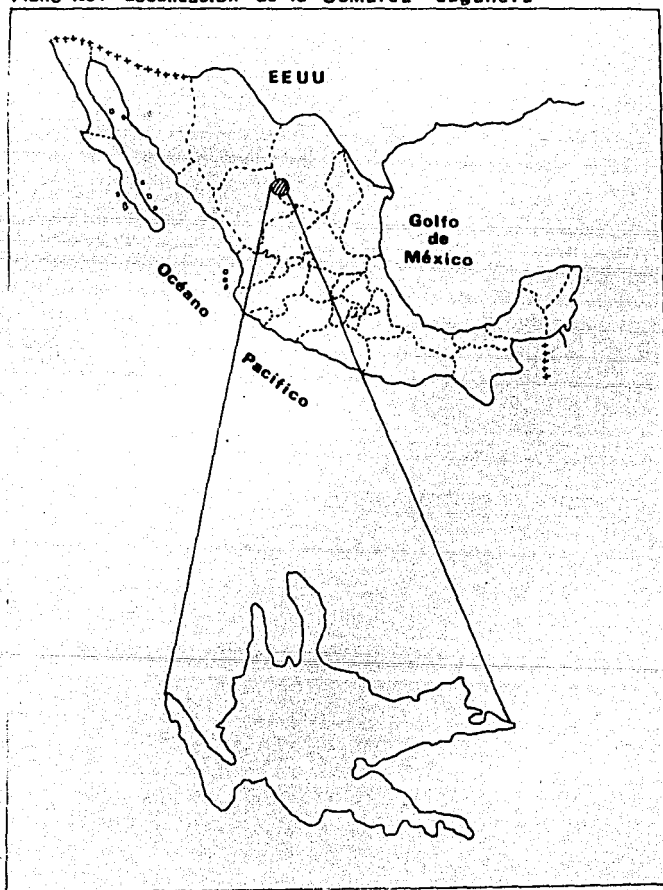
En el área de estudio predominan las llanuras aluviales y desérticas que conforman sistemas terrestres de cada una de las provincias Ecológicas antes enunciadas (plano No. 3).

3.3.1 Estados y Municipios (Superficie, plano No. 4)

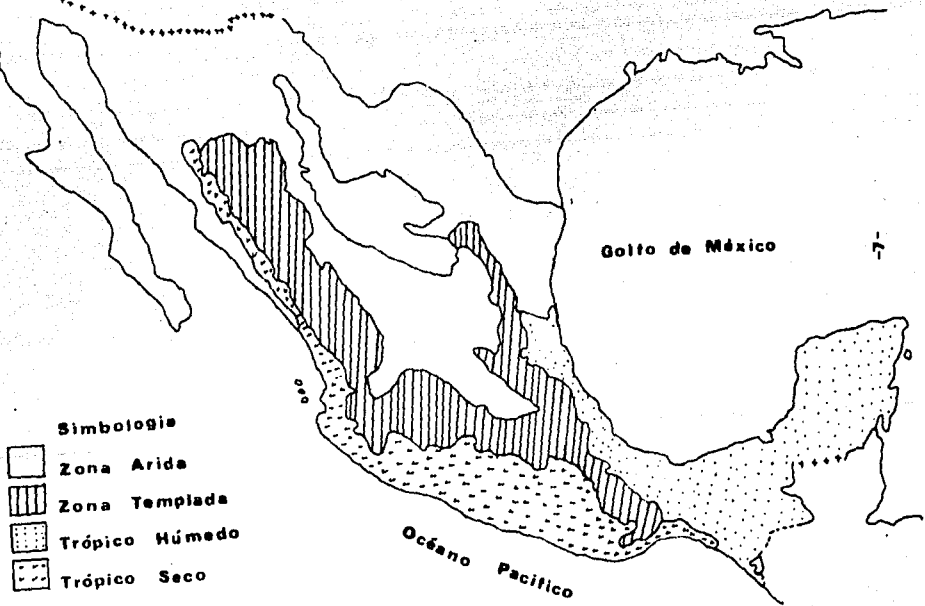
Estado	Municipio	Superficie total Km ²	Comarca Lagunera No. de municipios
Coahuila	Francisco I. Madero	21 890	5
	Sn. Pedro de las Colonias		
	Matamoros		
	Viesca		
	Torreón		
Durango	Tlahualilo Gómez Palacio Mapimí	22 000	3

Ref.14

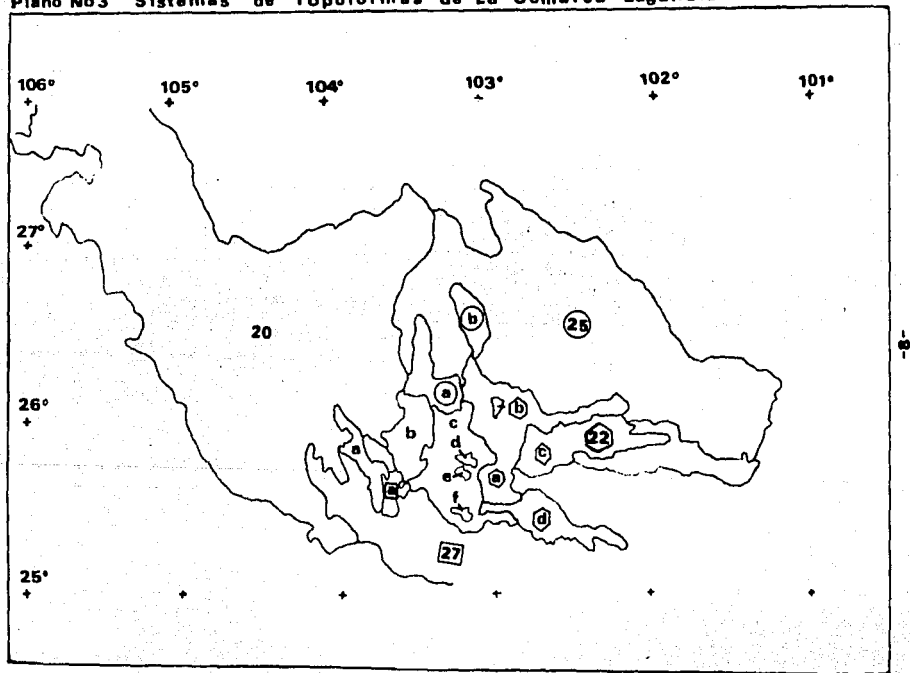
Plano No1 Localización de la Comarca Lagunera



Plano No 2 Regionalización Ecológica



Plano No3 Sistemas de Topoformas de La Comarca Lagunera



Plano No. 3 Sistemas de topoformas de la Comarca Lagunera

20 Provincia ecológica Bolsón de Mapimí

- a) Llanura Rocosa Aluvial intermontana
- b) Llanura Salino Aluvial
- c) Llanura Aluvial intermontana
- d) Llanura s/fase Aluvial intermontana
- e) Sierra Alta compleja
- f) Lomerio s/fase Ramificada

22 Provincia Laguna de Mayrán

- a) Llanura s/fase Aluvial intermontana
- b) Lomerio s/fase Ramificada
- c) Llanura Salino Desértico (Laguna de Mayrán)
- d) Llanura Salino Desértico (Viesca)

22

25 Provincia Sierra de la Paila

- a) Llanura s/fase Aluvial
- b) Llanura s/fase Aluvial

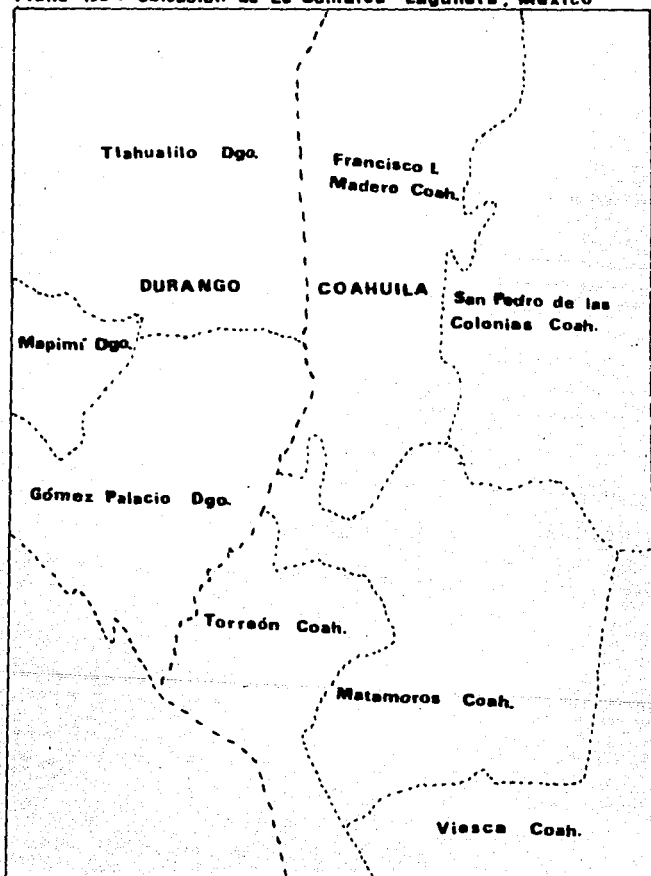
25

27 Provincias Sierras Transversales

- a) Llanura s/fase Desértica

27

Plano No4 Ubicación de La Comarca Lagunera, México



3.4 Población y Localidades

De acuerdo a los datos obtenidos del censo de población del año de 1980, se reportaron un total de 1 146 433 habitantes, distribuidos en 89 localidades.

La Comarca Lagunera que corresponde al Estado de Coahuila tiene una población de 740 889 habitantes, concentrados en 56 localidades y lo que corresponde al Estado de Durango es una población de 405 544 habitantes, ubicados en 33 localidades (cuadro No. 1).

Datos proporcionados en 1984 muestran que la Comarca Lagunera contaba con 1 171 596 habitantes, distribuidos en 1385 asentamientos de la siguiente forma:

1269	con 1 a 1000 habitantes
80	1000 a 2500 habitantes
33	2500 a 100 000 habitantes
3	720 022 habitantes, representadas por las conurbaciones de Cd. Lerdo, Gómez Palacio, Durango y Torreón, Coahuila.

Cuadro No. 1 Población de la Comarca Lazunera del Estado de Coahuila.

Municipios

<u>Francisco I. Madero</u>	H	<u>San Pedro de las Colonias</u>	H
CM Francisco I. Madero	47511	CM San Pedro de las Colonias	93410
Virginia	1800	El Retiro	2500
Buena Vista	1600	Tacubaya	1667
Las Mercedes	886	El Nilo	1200
Porvenir de Arriba	1254	Luchanas	2478
Florencia	1034	Purísima	900
Colón	1037	La Luz	170
Altamira	200	San Lorenzo	1994
Finisterre	747	San Ignacio	2243
La Pinta	1706	Mayrán	2800
Coruña	1192	San Marcos	1311
Lequeitio	3161	Emiliano Zapata	1342
B. de Londres	450	San Rafael de Arriba	2014
Covadonga	790	El Estribo	1043
Salvador de Arriba	1084	Nuevo Mundo	850
Hidalgo	1700	Gavilanes	350
		El Rubio	322
		Gabino Vázquez	548
Total	<hr/>		<hr/>
	66 152		117 142

H habitantes

CM cabecera municipal

Continuación del cuadro No. 1

Municipios

<u>Torreón</u>	H	<u>Matamoros</u>	H
CM Torreón	434 176	CM Matamoros	71 771
La Joya	3360	Granada	1510
La Partida	3160	Escuadrón 201	903
Santa Fé	2000	Monte Alegre	684
La Unión	2240	Coyote	3560
La Concha	3140	Los Angeles	1945
San Luis	890	El Fénix	1210
La Palma	1135	Buen Abrigo	2300
Ricardo Flores		Rancho Grande	379
Magón	430	La Libertad	520
		20 de Nov.	862
		Rancho de	
		Afuera	325
Total	<hr/>		<hr/>
	450 531		85 969

<u>Viesca</u>	H
CM Ignacio Zaragoza	21 095
Total	<hr/>
	21 095

Total Estado de Coahuila 740 889 Habitantes
Fuente: Censos de Población 1980, SPP

Cuadro No. 1 Población de la Comarca Lagunera Estado de Durango.

Municipios

<u>Lerdo</u>	H	<u>Gómez Palacio</u>	H
CM Cd. Lerdo	73 527	CM Gómez Palacio	180 011
León Guzmán	2145	Dolores	450
Alvaro Obregón	1369	El Vergel	1463
Juan E. García	1716	Pastor Rovsax	1239
San Jacinto	1259	La Popular	3115
La Goma	1220	El Compás	1018
La Loma	1940	Esmeralda	1122
Villa Juárez	3743	California	1031
San José	11	Arcinas Madrid	1132
Nazareno	2717	Santa Cruz	1255
		Venecia	1353
		Seis de Octubre	902
		El Barro	1127
		Dinamita	

Total

89 647

197 240

Continuación del cuadro No. 1

Municipios

<u>Mapimí</u>	H	<u>Tlahualilo</u>	H
CM Mapimí	28 093	CM Tlahualilo de	
Martha	577	Zaragoza	28 499
Florida	12	Lucero	1789
		Banco Nacional	967
Total	<hr/>		<hr/>
	28 682		31 202

<u>Pueblo Nuevo</u>		<u>Poanas</u>	
CM Pueblo Nuevo	33 530	CM Poanas	25 243
Total	<hr/>		<hr/>
	33 530		25 243

Población total Estado de Durango: 405 544 Habitantes

Fuente: Censos de Población 1980, SPP

3.5 Actividades Socioeconómicas

De los datos de población se puede concluir que el 74% de la población es urbana(866 136 Hab.) y el 26% rural(305 460 Hab.). Las principales ciudades de la Comarca Lagunera son Torreón, Coah., Gómez Palacio, Dgo., y Cd. Lerdo, Dgo., en ese orden de importancia.

Los principales productos agrícolas de la Comarca Lagunera:¹⁴ alfalfa, maíz, sorgo, nogal, jitomate, vid, legumbres, chiles, algodón y flores.

De estos productos agrícolas, el que demanda mayor cantidad de agua es la alfalfa, con el 83% del volumen total destinado al uso agrícola.

Dentro de las actividades industriales destaca la Cia. Metalúrgica Peñoles en Torreón, la empresa PALSa que fabrica plaguicidas en Gómez Palacio y una industria muy importante para el país como lo es la lechera(y derivados de la leche) que se encuentra en esta región.

3.5.1 Volúmenes de agua demandados por actividad.

La Comarca Lagunera dispone de 2 230 000 000 m³/año de agua provenientes el 55% de los ríos Nazas y Aguanaval y el 45% de los pozos profundos ubicados en la planicie donde se encuentra la metrópoli.

En base a la disponibilidad del agua, la demanda que reclama la región es la siguiente:

Uso	%	m ³ /año	m ³ /año
Agrícola	83	1 850 900 000	5 070 958.9
Industrial	10	223 000 000	610 958.9
Doméstico	07	156 100 000	427 671.2

Fuente:15

3.6 Fuentes de abastecimiento de agua.

La región se abastece principalmente de los ríos Nazas y Aguana-
naval, además de los pozos profundos.

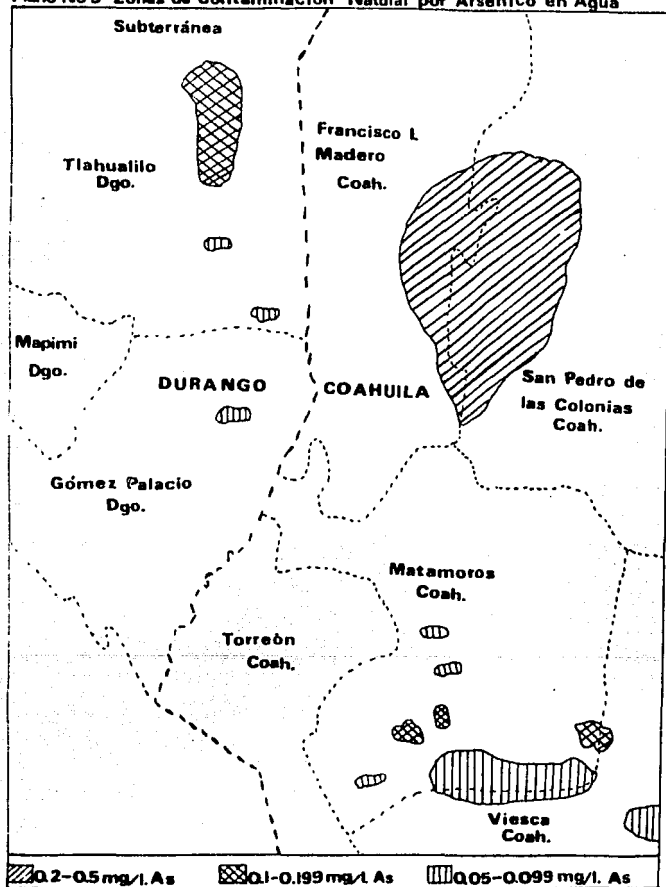
Fuente	¢	m ³ /año	m ³ /día
Ríos	55	1 226 500 000	3 360 273.9
Pozos	45	1 003 500 000	2 749 315

Fuente:15

3.7 Presencia de Arsénico en el agua.

La presencia de arsénico en el agua de los pozos de la región es de origen natural. La contaminación que ha venido experimentando los mantos acuíferos con el transcurso del tiempo, ha sido provocada por el lixiviado a que han sometido las distintas capas geológicas del subsuelo, lo que trae como consecuencia un aumento en la concentración de sales arsenicales.¹⁴

Plano No 5 Zonas de Contaminación Natural por Arsénico en Agua



3.8 Origen de la contaminación arsenical.

3.8.1 Geología

Las distintas capas geológicas del subsuelo de la región, contienen altas concentraciones de arsénico que se encuentra como sales arsenicales.

El mineral con mayor contenido de arsénico es la arsenopirita ($AsFeS$), el rejalgar (As_4S_4) y el oropimente (As_2S_3). El contenido de arsénico en la corteza terrestre es 1.5 a 2 mg/kg; es el 20vo en abundancia en relación a otros elementos.¹⁹

La siguiente tabla muestra el contenido de arsénico de algunos materiales de la corteza.

Arsénico en materiales de la corteza

Tipo	Intervalo(mg/kg)	
<u>Rocas Igneas</u>		
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 Arcilla	0.3	- 490
Fosfóricas	0.4	- 188

Fuente:19

3.8.2 Hidrología

La Comarca Lagunera se encuentra al final de la cuenca hidrológica que conforman los ríos Nazas y Aguanaval.

Sin embargo lo anterior es sólo para mencionar la hidrología ya que estos ríos no contienen arsénico en sus aguas.

Cabe mencionar como información que el arsénico en el agua

se encuentra en dos formas, orgánica e inorgánica. Las principales especies orgánicas del arsénico son el ácido metilarsénico y el ácido dimetilarsénico que generalmente se presentan en concentraciones menores que las formas inorgánicas arsenito y arseniato.¹⁹

3.8.3 Edafología

Los límites de la Comarca Lagunera están establecidos por un carácter de llanuras desérticas al Noreste y Sureste, las cuales presentan características edafológicas muy diferentes al compararse con la llanura de tipo aluvial de la zona, al Sur y Oeste se presenta un límite muy bien definido como es la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental.¹⁵

Una información referente a la comarca lagunera, Méx., se localizaron valores entre 3 y 9 mg de As/kg en una superficie del suelo y en zonas más profundas una concentración de más de 20 mg de As/kg. Ver cuadro No. 2

El nivel natural de arsénico en sedimentos normalmente se encuentra por debajo de 10 mg de As/kg de peso seco.¹⁹

**Cuadro No. 2 Indices de contaminación del suelo de la
Comarca Lagunera.**

Contaminación	Contenido(mg de As/kg)	Poblaciones
Alta	41.5 a 17.12	Francisco I. Ma- dero, Coah. San Pedro de las Colonias, Coah. Tlahualilo, Dgo. Mapimi, Dgo.
Mediana	17.12 a 13.79	Torreón, Coah. Matamoros, Coah. Viesca, Coah. Simón Bolívar, Dgo. San José de Guada- lupe, Dgo.
Baja	13.79 a 8.78	Gómez Palacio, Dgo. Cd. Lerdo, Dgo. Nazas, Dgo. San Pedro del Ga- llo, Dgo. Rodeo, Dgo. San Luis del Cor- dero, Dgo.

Fuente:14

3.9 Actividades Agropecuarias

En la agricultura compuestos tales como el arseniato de plomo, acetoarsenito de cobre, arseniato de sodio y compuestos orgánicos de arsénico se usan como pesticidas. Una cantidad sustancial de ácido metilarsénico y ácido dimetilarsénico se emplean como herbicidas selectivos.

Estos herbicidas particularmente necesarios para el control de hierbas (sorghum halepense sp.) en los campos de algodón, también empleados a otras hierbas nocivas como el sanbur (cenchrus), cocklebur (xanthium).¹⁹

Una clasificación de vegetales y frutas pequeñas de acuerdo a su tolerancia de arsénico soluble en agua, es la siguiente:

Muy tolerables	Medianamente tolerables	No tolerables
Tomate	Betabel	Gebolla
Zanahoria	Maíz	Alfalfa
Uvas		Cebada
Rábanos		Otras legumbres

Algunos compuestos fenilarsénicos como el ácido arsanílico es utilizado en la manufactura de aditivos alimenticios para aves de corral y cerdos; éste para combatir ciertas enfermedades en los pollos. Aunque si el tiempo de exposición es largo, los animales eliminan el arsénico en la orina o se acumula en las plumas de las aves, en el pelo de los cerdos, en las uñas de las aves y pezuñas de los cerdos principalmente, pero también se acumula en los riñones, pulmones e hígado de estos animales.¹⁹

3.10 Toxicidad del Arsénico

Arsénico del griego arsenikon (audáz, valiente), la existencia de este metal es referida desde hace 2400 años en Grecia y Roma como agente terapéutico.²

El arsénico se encuentra en la naturaleza combinado con muchos metales, así como con azufre; todos sus compuestos son venenosos y éste es el problema que se tiene en la Comarca Lagunera, donde el agua de pozos contiene arsénico en forma de arsénico III

(As₂O₃), el cual es altamente soluble en agua y puede causar deterioros en las mucosas de la boca, irritar la piel y afectar las vías respiratorias.¹⁹

3.10.1 Arsénico Inorgánico

El As inorgánico causa efectos agudos y subagudos, puede afectar muchos órganos, sistemas como el respiratorio, gastrointestinal, cardiovascular y nervioso central periférico.

Estudios experimentales con animales indican que el As III es más tóxico que el As V, es evidente que el arsénico en solución es más peligroso que el arsénico insoluble, esto probablemente porque es mejor la absorción en solución.

Una dosis de ingestión de 70 a 180 mg de As III como óxido arsenioso para el hombre, puede tener consecuencias fatales.

El As III puede causar lesiones en la piel especialmente hiperqueratosis palmoplantar. Esto se puede observar en pacientes bajo medicación prolongada con la solución Fowler que contiene una dosis de más de 10 mg de As.

La hiperqueratosis palmoplantar ha sido reportada siguiendo una ingestión de arsénico en agua potable, éste caso se presenta en Argentina, China(Taiwan) y México. Otros síntomas dermatológicos son hiperpigmentación que también aparece en los habitantes de las áreas mencionadas anteriormente.

Perturbaciones vasculares periféricas se han reportado en zonas del mundo donde existe una pesada exposición por ingestión de As inorgánico, como Chile, China(Taiwan) y la Republica Federal de Alemania.

Varios estudios indican que el arsénico inorgánico afecta los mecanismos dirigidos al DNA(ácido desoxirribonucleico).¹⁹

3.10.2 Arsénico Orgánico

Algunos compuestos orgánicos de arsénico alteran principalmente al sistema nervioso central. Estos incluyen atrofos en encefalopatía y óptica.

Estos efectos han sido reproducidos experimentalmente en animales

alimentados con altas dosis de ácido arsánico, el cual se utiliza en aditivos alimenticios para aves de corral y cerdos.¹⁹

3.10.3 Clasificación de los compuestos de arsénico

Arsénico Inorgánico

As III

Nombre: óxido de arsénico

Sinónimo: trióxido arsénico, óxido arsenioso, arsénico blanco.

Fórmula: As_2O_3 (As_4O_6)

Peso molecular: 197.82 g/gmol

Propiedades: blanco o transparente, muy venenoso, empleado en parasitismo, enfermedades de la sangre, reumatismo y asma.

Nombre: ácido arsenioso

Fórmula: H_3AsO_3

Peso molecular: 125.93

Propiedades: preparado con 1 g. de As_2O_3 , 5 ml de HCl y agua hasta 100 ml, venenoso; empleado para enfermedades de la piel y alteraciones en la sangre.

Nombre: arsenito ácido arsenioso

Fórmula: $HAsO_2$

Peso molecular: 107.93

Nombre: sales de ácido arsenioso

Fórmula: $H_2AsO_3^-$ $HAsO_3^{--}$ AsO_3^{---}

Nombre: cloruro de arsénico

Sinónimo: tricloruro de arsénico, tricloruro arsenioso.

Fórmula: $AsCl_3$

Peso molecular: 181.28

Propiedades: líquido fumante, aceitoso, intensamente venenoso; se usa en la industria de la cerámica.

Nombre: sulfuro de arsénico

Sinónimo: trisulfuro de arsénico oropimente

Fórmula: As_2S_3

Peso molecular: 246.0

Propiedades: arsénico amarillo, oropimente, insoluble en agua soluble en alcalis, empleado en juegos pirotécnicos.

Nombre: disulfuro de arsénico

Sinónimo: sulfuro de arsénico rojo, rojo oropimente.

Fórmula: As_4S_4

Peso molecular: 427.68

Propiedades: insoluble en agua, soluble en alcalis, se usa como pigmento en pinturas, en la fabricación de municiones.

Nombre: arsina

Fórmula: AsH_3

Peso molecular: 77.93

Propiedades: gas neutral, incoloro, olor desagradable, muy venenosa, soluble en agua, una inhalación de 0.5 ppm puede ser fatal.

As V

Nombre: óxido de arsénico

Sinónimo: pentóxido de arsénico

Fórmula: As_2O_5

Peso molecular: 229.82

Propiedades: venenoso, gradualmente delicado expuesto en el aire, usado para colorear vidrio, adhesivo para metales, como fungicida, preservativo para la madera.

Nombre: ácido arsenioso

Sinónimo: ácido ortoarsénico

Fórmula: H_3AsO_4

Peso molecular: 141.93

Propiedades: venenoso, soluble en agua, alcohol, glicerol, se usa en la fabricación de arseniatos.

Nombre: ácido arsénico
Sinónimo: ácido metaarsénico
Fórmula: HAsO_3
Peso molecular: 123.93

Nombre: arseniatos, sales de arsénico (orto)
Fórmula: H_2AsO_4^- HAsO_4^{--} AsO_4^{---}

Arsénico Orgánico

Nombre: ácido metilarlésnico
Sinónimo: ácido metaarsénico
Fórmula: $\text{CH}_3\text{AsO}(\text{H})_2$

Peso molecular: 139.96

Propiedades: soluble en agua, en alcohol, se usa para la preparación de sal disódica de arsénico, como herbicida.

Nombre: ácido dimetilarlésnico
Sinónimo: ácido cacodílico
Fórmula: $(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$

Peso molecular: 137.99

Propiedades: venenoso, higroscópico, muy soluble en alcohol, se emplea como herbicida.

Nombre: ácido arsanílico
Sinónimo: ácido p-aminobenzenarsonico
Fórmula: $\text{H}_2\text{N}-\langle \bigcirc \rangle -\text{AsO}(\text{OH})_2$

Peso molecular: 216.9

Propiedades: preparado por calentamiento de anilina y ácido arsénico, se usa en aditivos alimenticios para cerdos, soluble en agua fría, alcohol o ácido acético, insoluble en acetona, benceno, cloroformo y éter, promueve el crecimiento para mejorar la eficiencia de la alimentación.

Nombre: óxido de trimetilarsina

Fórmula: $(\text{CH}_3)_3\text{AsO}$

Peso molecular: 135.93

Nombre: metilarsina

Fórmula: CH_3AsH_2

Peso molecular: 91.93

Nombre: dimetilarsina

Fórmula: $(\text{CH}_3)_2\text{AsH}$

Peso molecular: 105.93

Nombre: trimetilarsina

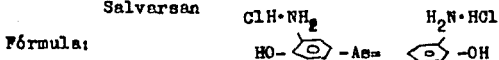
Fórmula: $(\text{CH}_3)_3\text{As}$

Peso molecular: 109.93

Nombre: arsofenamina

Sinónimo: 4,4-arsenobis(2-aminofenol)dicloruro ácido

Salvarsan



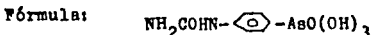
Peso molecular: 438.99

Propiedades: tiene algún poder higroscópico, ligeramente amarillo, inodoro, venenoso: soluble en agua, alcohol o glicerol a pH=3 es una solución ácida acuosa, para uso medicinal primero se neutraliza con una solución de NaOH.

Nombre: carbarsona

Sinónimo: ácido(4-amino carbonilamino)fenil arsonico

ácido N-carbamoil arsénico

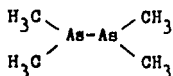


Peso molecular: 260.07

Propiedades: muy soluble en agua, alcohol en soluciones de alcali y carbonatos, es un antiasmbo.

Nombre: tetrametil diarsina

Fórmula:



Peso molecular: 209.96

Propiedades: líquido aceitoso, olor insoportable a ajo, inflamable espontáneamente en aire seco.

Nombre: arsacetina

Sinónimo: ácido 4-(acetil amino) fenil arsonico

ácido N-acetil arsanilico

Fórmula:

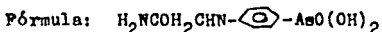


Peso molecular: 258.9

Propiedades: venenoso, soluble en agua, con la sal de sodio se usa como antisifilitico.

Nombre: triarsamida

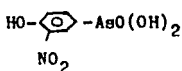
Sinónimo: ácido 4-(2-amino-2-oxoetil)(amino)fenil arsonico



Peso molecular: 273.9

Nombre: ácido 3-nitro-4-hidroxifenil arsonico

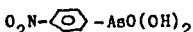
Fórmula:



Peso molecular: 262.9

Nombre: ácido 4-nitrofenil arsonico

Fórmula:



Peso molecular: 246.9

Nombre: arsenobetaina
Fórmula: $(\text{CH}_3)_3\text{As}+\text{CH}_2\text{COOH}$

Peso molecular: 178.9

Nombre: arsenocolina
Fórmula: $(\text{CH}_3)_3\text{As}+\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$

Peso molecular: 164.9

Nombre: dialquilcloroarsina

Fórmula: $\text{R}-\text{AsCl}$

Nombre: alquildicloroarsina

Fórmula: $\text{R}-\text{AsCl}_2$

Referencias: 17,19

3.10.4 Compuestos inorgánicos de Arsénico V

Compuesto	Fórmula	Ks	pKs
Arseniato de bario	$\text{Ba}_3(\text{AsO}_4)_2$	8×10^{-51}	50.1
Arseniato de bismuto	BiAsO_4	4×10^{-10}	9.4
Arseniato de cadmio	$\text{Cd}_3(\text{AsO}_4)_2$	2×10^{-33}	32.7
Arseniato de calcio	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$	6.4×10^{-19}	18.2
Arseniato de cobre	$\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$	8×10^{-36}	35.1
Arseniato de fierro	FeAsO_4	6×10^{-21}	20.2
Arseniato de plomo	$\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$	4×10^{-36}	35.4
Arseniato de magnesio	$\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2$	2×10^{-20}	19.7
Arseniato de mangane so II	$\text{Mn}_3(\text{AsO}_4)_2$	2×10^{-29}	28.7
Arseniato de plata	Ag_3AsO_4	1×10^{-23}	23.0
Arseniato de estron cio	$\text{Sr}_3(\text{AsO}_4)_2$	1×10^{-18}	18.0
Arseniato de zinc	$\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2$	1.3×10^{-28}	27.9

Ref. 4

3.11 Absorción y metabolismo en plantas

Informes recientes indican que en las plantas crecidas en suelos que nunca han sido tratados con pesticidas que contienen arsénico, tuvieron concentraciones entre 0.01 y 5 mg/kg peso seco ésto se debe a que las plantas toman del suelo compuestos de fierro y aluminio que han adsorbido iones arseniato. Sin embargo en suelos contaminados por arsénico las plantas presentan altos niveles de contaminación principalmente en las raíces.¹⁹

Los puntos anteriores se confirman revisando el estudio que llevó a cabo la SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos) en 1986 sobre la Comarca Lagunera, en el cual menciona que el arsénico no se acumula en las hojas de las plantas sino que se acumula generalmente en las raíces, lo que produce la pudrición de ellas cuando se tienen altos niveles de contaminación.

También se menciona que las puntas de las raíces nuevas se ven afectadas en primer término, y que la contaminación puede llegar al grado de impedir la germinación de las semillas. Esto nos lleva a la conclusión de que en suelos muy contaminados por arsénico tendrá vegetación que contenga este elemento y en suelos no contaminados el contenido de arsénico en la vegetación será insignificante.

Los síntomas iniciales de toxicidad en suelos contaminados son:

- i) Marchitamiento de las hojas del nuevo ciclo.
 - ii) Retardo en el crecimiento de las raíces y tallos de la planta.
- Un experimento efectuado en arena contaminada por arsénico en el cultivo de arroz, mostró los siguientes fenómenos:
- a) Enroscamiento de las hojas.
 - b) Muerte de los tejidos, tomaron una coloración de rosa a rojo brillante.
 - c) Cambio de coloración rojo brillante a amarillo brillante.
- Sin embargo, los compuestos arsenicales se han utilizado para mejorar la producción y acelerar la maduración de frutas como cítricos, videdos y algunos otros.

Pero si se requiere contrarrestar la contaminación de arsénico en suelos, se puede utilizar el sulfato ferroso (FeSO_4) que obtiene excelentes resultados para resolver el daño en el crecimiento de árboles y plantas. Otra recomendación para disminuir la contaminación arsenical en el follaje de las plantas consiste en la aplicación de quelato de zinc.

Debido a que la alfalfa es uno de los productos agrícolas de la Comarca Lagunera, se debe tratar el suelo con sulfato de amonio (NH_4)₂ SO_4 adicionando 3 toneladas de abono por acre, esta experiencia traerá buenos resultados al desarrollo de la alfalfa.¹⁴

3.11.1 Intoxicación al ganado

Datos de animales muestran que algunos retienen una gran cantidad en diferentes órganos después de una exposición al As III sin embargo una exposición a As V no muestra esta retención. Una de las causas de intoxicación del ganado de la región se debe a que los alimentos contienen aditivos alimenticios, éstos poseen cantidades apreciables de arsénico en forma de ácido arsenilico. Este problema será más grave porque además el ganado de la zona está expuesto a As en el agua potable.

El estudio sobre la concentración de As en las plantas, mostró que en las hojas no se acumula este elemento por lo que se puede descartar que la intoxicación del ganado aumente por la ingestión de pastos y otros forrajes.

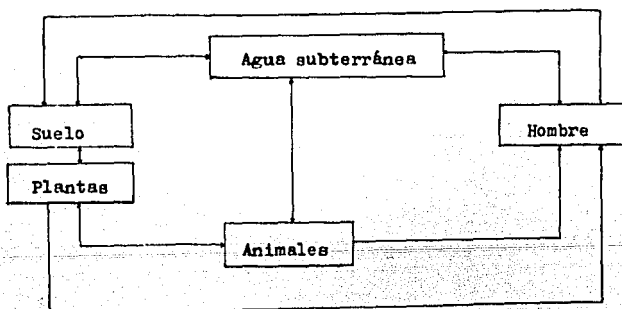
El As ingerido por el ganado es desechado por medio de la orina, otra porción de este elemento se acumula en algunos órganos, como el hígado, riñones y pulmones, aunque la mayor cantidad de arsénico se deposita en el pelo, uñas, plumas y pezuñas.¹⁹

3.11.2 Ciclo del Arsénico en el ecosistema

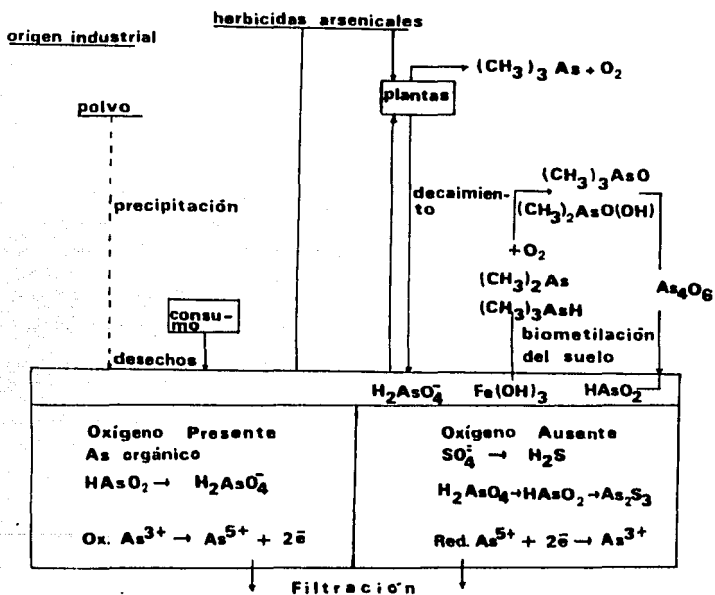
De acuerdo con las condiciones que presenta la Comarca Lagunera como clima, agua, suelos, agricultura, ganadería y la industria ahí establecida, se puede proponer la existencia de un ciclo ecológico.

Se podrá observar que en este ciclo el eje principal es el agua subterránea ya que como se ha mencionado ésta contiene sales solubles de arsénico que afectan el desarrollo del hombre, animales plantas y suelo. El ciclo muestra que el hombre es el más afectado debido a que está expuesto directamente (agua subterránea) e indirectamente (plantas y animales). La solución a la que se puede llegar para disminuir la exposición directa del hombre al agua contaminada, es controlar los niveles de concentración abatiéndolas al permisible (menos de 0.05 ppm) en el fluido para el consumo humano, por medio de un tratamiento fisicoquímico.

Ciclo general de arsénico en el ecosistema.



Ciclo Suelo - Aire del Arsénico



Fuente 19

El desarrollo de este ciclo se debe principalmente al arsénico transportado por el aire, este arsénico es un subproducto de la industria metalúrgica; además tiene la aplicación de herbicidas arsenicales que provocan una cierta contaminación del suelo.

Este ciclo se puede establecer en la Comarca Lagunera, ya que ahí funcionan fundidoras de metales que tienen como subproducto al arsénico, y fabricas de herbicidas, pesticidas, silvicias arsenicales que han sido utilizados en terrenos agrícolas. Este ciclo da como resultado la filtración del As hasta el manto acuífero que posteriormente será explotado por el hombre para cubrir sus necesidades (agrícolas, ganaderas y de consumo) y así provocar problemas graves de salud.

La existencia del hidroarsenicismo en la Comarca Lagunera se debe principalmente a que en la corteza terrestre de la región se localizan materiales como las rocas fosfóricas, la arenisca, los basaltos y otras que contienen altas concentraciones de arsénico (con rangos de 113 a 188 mg de As/kg).

Se presume que los compuestos arsenicales predominantes en la zona de estudio son el óxido arsenioso y los arsenitos de varios metales, ambos pertenecen al As III inorgánico.

El óxido arsenioso o trióxido de arsénico As_2O_3 es un compuesto intensamente venenoso. Los arsenitos son derivados del ácido arsenioso (H_3AsO_4) como el arsenito de potasio $KAsO_2$ (Solución de Fowler) estos compuestos también son venenosos.

El arsénico proviene de las diferentes capas geológicas de la región, que mediante el proceso de lixiviación de las capas geológicas llega al agua subterránea.

La forma en la que se encuentra el arsénico en el agua subterránea es como óxido arsenioso (As III) ya que este compuesto es muy soluble, se descartan los compuestos sulfurosos de arsénico porque estos son insolubles en agua.

4.- Métodos de tratamiento de aguas

4.- Métodos de Tratamiento de aguas

Debido a que la población rural de la Comarca Lagunera está expuesta a la ingestión crónica de arsénico, es necesario proponer algunas alternativas de solución para controlar este problema.

Una de las alternativas de solución inmediata son las técnicas o 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, es por ello que se llevará a cabo el análisis fisicoquímico y de costos de las mejores técnicas de remoción de arsénico soluble en agua, se cuenta así mismo con alternativas que aportan una solución paliativa o individual que también serán analizadas.

4.1 Técnicas de desalinización más comunes(Principios Básicos).

4.1.1 Desalación

4.1.2 Destilación

4.1.3 Extracción por solventes y ósmosis inversa

4.1.4 Congelación

4.1.5 Coagulación química

4.1.6 Intercambio Iónico

4.1.7 Desmineralización

4.1.8 Membranas para intercambio iónico y diálisis

4.2 Técnicas alternativas (Soluciones paliativas).

4.2.1 Destiladores Solares

4.2.2 Cubos Filtrantes

4.2.3 Cartuchos Domiciliarios con Alúmina Activada

4.2.4 Tanques de Precipitación con sulfato de aluminio

$Al_2(SO_4)_3$ Técnica Nalgonda

4.3 Técnicas más apropiadas para el caso en estudio, análisis fisicoquímico y económico de cada una de ellas.

4.3.1 Intercambio Iónico

4.3.2 Ósmosis Inversa

4.3.3 Oxidación y Coagulación con Cloruro Férrico ($FeCl_3$)

4.1.1 Desalación

La remoción de los sólidos disueltos del agua se describe como desalación o conversión de agua salada. La salinidad de las aguas crudas varía con su origen. El grado de salinidad se expresa generalmente en mg por litro de sólidos disueltos; del ión Cl^- o de sal común NaCl . La siguiente clasificación toma en cuenta el origen del agua y su salinidad relativa:

- i) Aguas salobre: mezcla de aguas salinas con aguas dulces o ligeramente salinas, con concentraciones de sal de 1000 a 5000 ppm.
- ii) Aguas moderadamente salinas: aguas de tierras interiores con concentraciones de sal 2000 a 10000 ppm.
- iii) Aguas fuertemente salinas: aguas de tierras interiores y costeras con concentraciones de sal de 10000 a 30000 ppm.
- iv) Aguas marinas: aguas mar adentro de los océanos y sus mares con concentraciones de sal de 30000 a 36000 ppm, incluyendo 19000 ppm de Cl, 10600 ppm de Na, 1270 ppm de Mg, 880 ppm de S, 400 ppm de Ca, 380 ppm de K, 65 ppm de Bi, 28 ppm de C, 13 ppm de Sr, 4.6 ppm de B y otros.

Clasificación de los procesos de conversión de agua salada.

Constituyente removido	número y clase del proceso	fase a la que se transporta
Sal	1.- (Ninguno conocido)	vapor
	2.- Electrodialisis	
	Osmoiónica	líquido
	Difusión térmica	
	3.- Intercambio iónico	
	adsorción sobre	sólido
	electrodo de carbón	
Agua	1.- Destilación	vapor
	2.- Extracción por solvente	líquido
	Osmosis inversa	
	3.- Congelación	
	Congelación por contacto	sólido
	Adsorción	

Ref. 22

4.1.2 Destilación

De los procesos que remueven el agua de las soluciones salinas, la destilación es el más antiguo y, en relación con las plantas establecidas, el más productivo. Difiere de otros procesos en que hace pasar el agua a través de la fase vapor. Es interesante el hecho de que es fácil calcular el potencial de esta operación en relación con el trabajo mínimo que se va a efectuar mediante la energía térmica aplicada. Por ejemplo, si la energía necesaria se deriva del vapor, como generalmente sucede, el requerimiento mínimo de trabajo es una función de la temperatura del vapor. Debido a que el vapor saturado puede suministrar cerca de 205 Btu por libra (114 cal por kg) de energía en forma de trabajo cuando se condensa a presión atmosférica y se descarga a una temperatura alrededor de 70°F (21.1°C), el volumen esperado de agua producido es de 100 gal (378.51 litros), cuando se utilizan eficientemente 47 lb (21.4 kg) de vapor. Se puede concluir que el valor comercial del vapor a presión atmosférica es, por lo tanto, igual al precio de 2.5 kWh de energía eléctrica, aproximadamente.

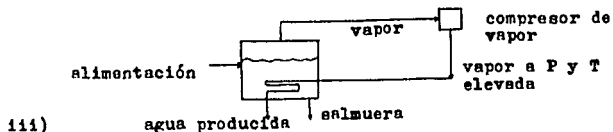
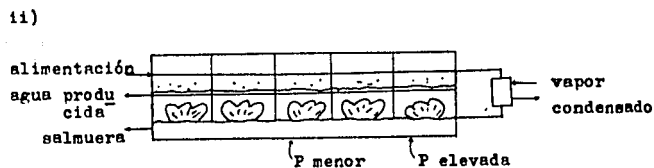
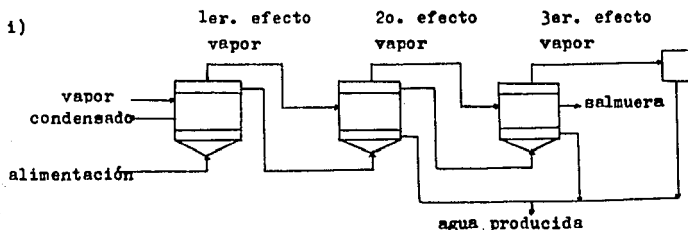
Por consiguiente, el diseño de las plantas se dirige i) a captar las fuentes más económicas de energía térmica, y ii) a explotar los procesos más eficientes de transferencia de calor.

i) Los evaporadores de efecto múltiple son relativamente eficientes, mientras que los de simple efecto lo son de menor grado. Cada unidad componente de un evaporador de efecto múltiple se mantiene a una presión y temperatura ligeramente menores que la anterior, para que el vapor producido por un efecto, constituya la fuente de calor del siguiente paso. Libra por libra, la cantidad de agua producida se aproxima entonces al número de efectos (ver la figura).

ii) También la evaporación instantánea en etapas múltiples se efectúa a presiones y temperaturas sucesivamente bajas. El agua entrante se calienta por el calor de condensación y sólo se requiere una pequeña cantidad de energía térmica para evaporar instantáneamente el agua precalentada en la etapa de presión reducida, a vapor (ver la figura).

iii) El proceso de compresión de vapor se basa en la compresión mecánica del vapor para elevar suficientemente su temperatura, debido a que $p_v = RT$, para suministrar a través de su propia condensación el calor necesario para evaporar el agua alimentada. Una vez puesto en marcha, este proceso ya no consume energía térmica sino únicamente energía mecánica.²²

Figura: Disposición esquemática de la evaporación; i) evaporación de múltiple efecto; ii) evaporador instantáneo de etapas múltiples; iii) destilación por compresión de vapor.



4.1.3 Extracción por solventes y ósmosis inversa

Los solventes orgánicos que son parcialmente solubles en agua pueden producir: i) una salmuera más concentrada y ii) 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.

La presión osmótica, al buscar el equilibrio, impulsa a las moléculas de agua a través de una membrana permeable, desde una solución diluida hacia otra concentrada. Esta respuesta natural se puede invertir al colocar el agua salina a presiones hidrostáticas mayores que la presión osmótica. De ahí proviene el término ósmosis inversa.

4.1.4 Congelación

El agua puede transportarse desde la salmuera a la fase sólida, en forma de hielo. Parece una ventaja el hecho de que el calor latente de fusión que es de 144 Btu por lb (80 Kcal por kg), sea pequeño en comparación con el calor latente de vaporización. Sin embargo, aun cuando los cristales de hielo formados son esencialmente de agua pura, el rendimiento de agua producida disminuye i) debido a que una parte de ésta se debe utilizar para lavar la sal de las superficies del hielo y ii) porque se requiere calor para fundir los cristales de hielo. En la congelación, como en la destilación, la operación a contracorriente conserva la energía térmica - en este caso, lb. por enfriamiento del agua alimentada hasta el punto de congelación después del cual se evapora un refrigerante en contacto directo con la alimentación, y 2o. por lavado a contracorriente y fusión de los cristales de hielo.

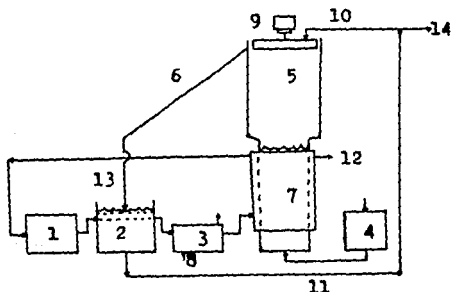
La congelación por contacto utiliza dos circuitos de transferencia de calor de hidrocarburos en recirculación. El primer circuito absorbe calor del agua salina entrante, lo transfiere en parte al agua dulce, y lo pierde, en la salmuera desechada. El segundo circuito vaporiza al hidrocarburo líquido en contac-

-to con el agua salada para congelarla; a continuación, se comprime el vapor, y la energía térmica desprendida se emplea para fundir el hielo. El vapor separado del agua dulce se bombea nuevamente a través de la cámara de congelación.

La congelación eutéctica opera a la temperatura eutéctica del agua. Hasta el punto eutéctico, únicamente en forma de hielo. En este punto eutéctico, los cristales de hielo producen sus núcleos y crecen independientemente de los cristales de sal y de las otras sustancias existentes en el agua.

La remoción adicional de calor ya no disminuye la temperatura. Se congelan tanto el agua como la sal. Entonces éstas se pueden separar porque el hielo flota y la sal se sumerge.²²

Diagrama de flujo para un proceso de congelación directa.



- 1) Compresor del refrigerante
- 2) Licuador del hielo y precondensador
- 3) Condensador final del refrigerante
- 4) Tanque de alimentación
- 5) Columna de lavado
- 6) Canal para el hielo
- 7) Congelador 31.9°F (0°C)
- 8) Agua de enfriamiento
- 9) Raspador de hielo y elemento motriz
- 10) Agua de lavado
- 11) Producto y agua de lavado
- 12) Salmuera
- 13) Ciclo de refrigeración
- 14) Agua producida

4.1.5 Coagulación química

Desde el punto de vista ingenieril la coagulación se ha proyectado en: i) la conjunción de las partículas o floculación, con o sin beneficio de productos químicos formadores de flóculos o de precipitados, ii) la sedimentación de precipitados floculentos y de partículas discretas y iii) la filtración de aguas coaguladas y sedimentadas. Sin embargo, el control químico de la coagulación ha llegado a ser tan idóneo, que en algunas ocasiones se puede omitir la sedimentación o la filtración, con impunidad operacional y justificación económica. No obstante, puede resultar conveniente, económicamente, retener la secuencia convencional de la coagulación, sedimentación y filtración para beneficiar la flexibilidad de operación y la oportunidad de optimizar económicamente el rendimiento junto con los cambios o fluctuaciones en la calidad del agua cruda.²²

4.1.6 Intercambio iónico

El intercambio iónico consiste en el intercambio reversible de iones entre un medio sólido de intercambio y una solución. En la industria se emplean cambiadores tanto catiónicos como aniónicos para preparar agua de alimentación a calderas, desionizar o desmineralizar aguas de proceso, concentrar soluciones diluidas de electrolitos y preparar reactivos químicos.

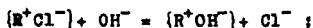
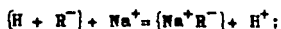
Para ser efectivos, los intercambiadores de iones deben: 1o. contener sus propios iones; 2o. ser insolubles en agua, y 3o. proporcionar suficiente espacio en su estructura porosa para que los iones pasen libremente al interior y hacia el exterior del sólido. Los cambiadores catiónicos tienen una estructura cargada negativamente, pero sus poros contienen cationes que mantienen su electroneutralidad. Los cambiadores aniónicos poseen las cargas eléctricas exactamente opuestas.

Los suelos son cambiadores importantes de iones, especialmente los suelos arcillosos y el humus producido por la vegetación en descomposición. La alúmina, los fosfatos y sulfuros metálicos, la lignina, proteínas, carbón y resinas, tienen propiedades de intercambio iónico.

La tecnología moderna del intercambio iónico comenzó en 1935 con el descubrimiento de las resinas sintéticas. Sin embargo tanto las zeolitas naturales como las sintéticas siguen en el comercio.

Los cambiadores sintéticos de iones son permeables, razonablemente estables y tienen altas capacidades.

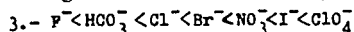
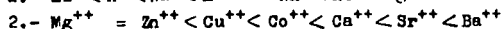
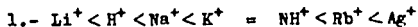
El procedimiento de intercambio iónico se puede establecer de la siguiente forma:



en donde R^- y R^+ simbolizan a 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); debe mantenerse constante el número de cargas y no el número de iones dentro o en la superficie del gránulo del cambiador. Por ejemplo, un ion Ca^{++} desplaza a 2 iones Na^+ . Por lo tanto, la capacidad de intercambio de un cambiador iónico se expresa por el número de cargas, es decir, de los equivalentes necesarios de los iones para mantener la electroneutralidad dentro de la fase sólida para un peso o volumen determinados de material de intercambio iónico.

Para una serie determinada de iones similares, existe un orden general de afinidad hacia el cambiador. Para resinas cambiadoras sintéticas, las siguientes series son series típicas de afinidad creciente:



Ref.22

4.1.7 Desmineralización

La desionización del agua se efectúa generalmente mediante un proceso en dos etapas, en la que el agua pasa sucesivamente a través de un cambiador catiónico en la forma H^+ , H^+R^- , y un cambiador aniónico en la forma OH^- , R^+OH^- . Al entrar al cambiador catiónico, todos los cationes se permutan por la cantidad equivalente de iones H^+ . El efluente que en realidad es una solución de los ácidos correspondientes a los aniones, entra al intercambiador aniónico en donde todos los aniones se permutan por iones hidróxido que neutralizan a la cantidad equivalente de H^+ formada en el cambiador catiónico. Se produce una cantidad equivalente de agua. Los cambiadores de lecho mezclado constituyen un desarrollo más creciente en la desmineralización del agua. Una sola columna contiene una mezcla de cantidades equivalentes de cambiadores catiónico y aniónico.

Generalmente el efluente es superior en calidad (de menor conductividad). La desmineralización puede ser tan efectiva como la destilación.

Las resinas cambiadoras catiónicas empleadas en el proceso de desmineralización son regeneradas con ácidos fuertes. Generalmente se utiliza el ácido sulfúrico, aún cuando este precipita $CaSO_4$ en el lecho de intercambio. Si van a removerse ácidos débiles como ácido silícico $Si(OH)_4$, se deben emplear cambiadores aniónicos fuertemente básicos. Estos se deben regenerar con hidróxido de sodio. Algunos cambiadores aniónicos débilmente básicos pueden regenerarse con carbonato de sodio.

La desmineralización produce agua de alta calidad para la industria, especialmente para servicio como agua de repuesto en plantas generadoras de vapor. Las resinas de intercambio iónico sólo se emplean para abastecimientos con menos de 500 mg por litro de sólidos disueltos.²²

4.1.8 Membranas para intercambio iónico y diálisis

El agua se puede desalar electroquímicamente por electrodiálisis a través de membranas selectivamente permeables respecto a los cationes o los 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 delgadas barreras que ofrecen un paso fácil a algunos constituyentes de una 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 aniónico son permeables respecto a los aniones. Los procesos por diálisis son técnicas comunes de separación tanto en el laboratorio como en la industria.

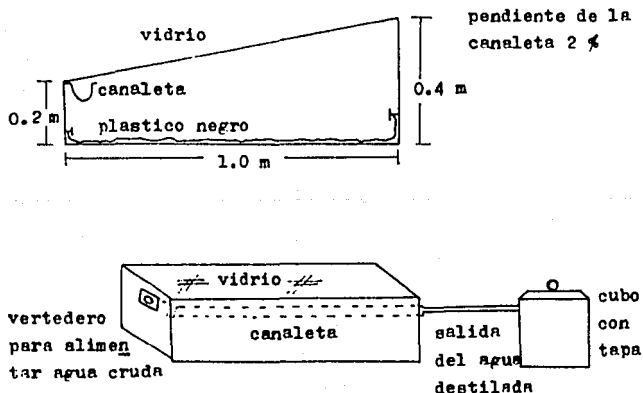
La difusión de iones a través de membranas se puede acelerar mediante la aplicación de un voltaje a través de la membrana. La separación electrodialítica resultante con membranas de intercambio iónico permite la desalación de aguas salobres. El voltaje aplicado impulsa a los aniones hacia el ánodo inerte y hacia afuera de las celdas con membranas permeables a los aniones.

4.2 Técnicas alternativas (Soluciones Paliativas)

4.2.1 Destiladores Solares

Existen varios tipos de destiladores solares. El más sencillo de los probados con éxito es el que muestra la figura y permite la obtención de 10 a 15 litros por día según las condiciones meteorológicas.

La construcción es muy fácil; las paredes se pueden hacer de madera, la cubierta de madera y la canaleta de PVC. Todo el interior debe estar pintado de negro para asegurar la mayor absorción de luz solar. En el piso se debe colocar una bandeja o bien revestir todo el fondo con una lámina de plástico (polietileno) negro con los extremos levantados y clavados a las paredes de madera. El cubo que se coloca como colector tendrá tapa. Las medidas pueden variar según posibilidades y/o medidas de los elementos disponibles en el lugar. Sin embargo es conveniente cambiar la pendiente del vidrio ya que si es menor que la que indica la figura (20%), el agua condensada sobre el vidrio puede volver a caer en el fondo.

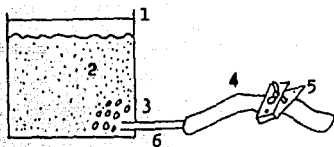


4.2.2 Cubos Filtrantes

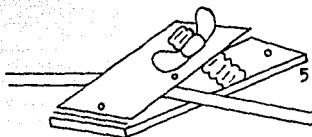
Equipo

Se trata de un sistema muy sencillo; un filtro con medio de intercambio que puede ser fácilmente construido con un cubo de veinticinco a treinta litros de volumen.

Sobre uno de los lados y a la altura del fondo se hace un agujero de 1/2" y a través de él, se coloca cualquier trozo de tubo rígido que sella con mastique. El tubo requiere de una válvula (puede utilizarse como prolongación del tubo rígido un tubo plástico flexible y una válvula de bisagra). Ver dibujo.



- 1) Nivel del agua
- 2) Medio
- 3) Arena para prevenir el escape de medio
- 4) tubo flexible
- 5) válvula o bisagra
- 6) tubo rígido



tuerca mariposa

Se llena el cubo con veinte litros de medio. Puede utilizarse hueso molido, carbón de hueso o alúmina activada.

Operación

- a) Llenar el cubo de agua cruda.
- b) Abrir la válvula de salida y dejar que fluya lentamente el agua (aproximadamente 35 ml/min).

Nota.- Especialmente cuando se usa hueso molido no hay que dejar el cubo sin uso por más de dos días; ya que en ese caso las primeras nuevas porciones tendrán sabor y olor a sopa.

4.2.3 Cartuchos domiciliarios con alúmina activada

Los cartuchos son elementos que pueden colocarse luego de la conexión domiciliaria o bien a la entrada de la casa (ahí tratará toda el agua que va a la vivienda) o bien en una derivación hacia la cocina, con lo que sólo tratará el agua de bebida y preparación de alimentos, siendo esta la variante más recomendable dada la baja capacidad relativa de remoción de arsénico. El cartucho puede confeccionarse con cualquier elemento útil como PVC, fibra de vidrio, etc.

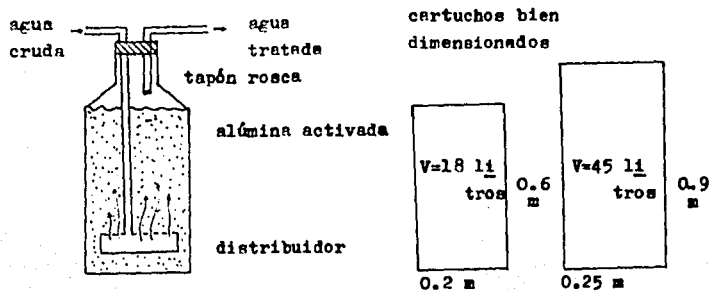
En todos los casos se colocará luego de la llave de paso en la derivación a las viviendas particulares.

El volumen interno de los cartuchos podría variar desde 15 a 60 litros, dependiendo del consumo y del número de usuarios. La presión de trabajo necesaria debe ser del orden de 1.4 a 1.75 kg/cm².

La altura mínima de alúmina debe ser de 0.6 m y la máxima 1.20 m.

El agua dentro del cartucho, corre en flujo hacia arriba. La alúmina debe ser Alcoa grado F-1, malla 24-48. Es recomendable tratarla previamente dejándola en remojo en una solución ligeramente ácida (p.e. H₂SO₄ 0.05 - 0.01 N) durante 24 horas y luego colocarla en el cartucho.

El cartucho se debe enviar al lugar de destino y uso conteniendo dentro la alúmina previamente humedecida.



4.2.4 Tanques de precipitación con sulfato de aluminio

$Al_2(SO_4)_3$ Técnica Nalgonda

Este método en su mayor parte desarrollado en la India, y conocido como técnica Nalgonda, basada en el tratamiento de agua cruda con alto contenido en fluoruros, primero con cal y después con alumbre (sulfato de aluminio).

El tratamiento permite especialmente el diseño de tanques; para áreas rurales o parecidas por razones económicas pueden usarse tanques o recipientes de diferentes volúmenes o tipos. El fluor removido por esta técnica se encuentra en forma de anión, esto nos permite deducir que el arsénico en solución acuosa se presenta como anión en combinación con el oxígeno y el hidrógeno.

El método es ideal para agua con alta turbidez, ya que está favorece la floculación, utilizando al aluminio como coagulante.

La calidad de compuestos químicos así como cantidad para ser alimentados deberán determinarse para algunos tipos de aguas, porque las dosis dependen de los fluoruros, alcalinidad y sólidos disueltos presentes en el agua.

Se recomienda el uso de desinfectante (hipoclorito de calcio) al mismo tiempo que se alimentan los otros compuestos químicos.

Equipo

El tamaño del equipo depende de la cantidad de agua para ser tratada en cada batch.

Como el proceso es discontinuo, este puede tratar sólo el agua para bebida y preparar los alimentos (considerando 5 litros/persona x día).

Un equipo básico deberá tener las siguientes características:

diámetro	0.45 m
altura del cilindro	0.70 m
altura del cono inferior	0.05 m
longitud de la salida de lodo	0.05 m
diámetro de la salida de lodo	1.5 in

altura del soporte de la base	0.65 m
altura total	1.35 m
diámetro de salida del agua	0.50 in
número de palas	3
ancho de pala	0.10 m
longitud de la pala	0.30 m
diámetro de la válvula en la salida del agua	0.5 in
diámetro de la válvula en la salida de lodo	1.5 in
volumen total	115 litros
volumen de lodo	4 litros
volumen neto para agua	100 litros

Con el volumen anotado de 100 litros/batch, y con una entrada diaria de 5 litros/persona x día: con cada batch puede ser tratada agua para 20 personas, o el agua para una familia (5 personas) para cuatro días.

Para tratar mayor cantidad de agua, se pueden diseñar tanques grandes, siguiendo las siguientes condiciones:

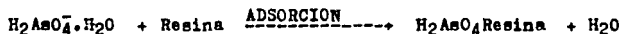
altura del tanque	>1 m
diámetro que depende del volumen y adoptando la altura	
altura del cono inferior	diámetro/10
longitud de pala	2/3 x diámetro
ancho de pala	0.10 m
diámetro de la salida del agua	0.5 - 1 in
diámetro de la salida de lodo	1.5 - 2 in

Equipos de gran capacidad podran tener mezclado mecánico con una velocidad de 60 - 80 rpm.

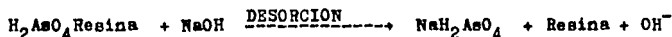
4.3 Técnicas más apropiadas para el caso en estudio el análisis fisicoquímico y económico de cada una de ellas.

4.3.1. Intercambio Iónico

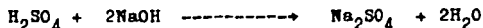
El principio de este método es la adsorción del anión de arsénico ($H_2AsO_4^-$) por un medio o resina intercambiadora aniónica. El agua cruda pasa a través del medio de acuerdo con la siguiente reacción:



Cuando la resina se ha saturado con el arsénico ($H_2AsO_4^-$) se requiere regenerar la resina con una solución diluida de hidróxido de sodio (NaOH) siguiendo la reacción:



El siguiente paso es la neutralización de la resina con una solución ácida preparada con ácido sulfúrico (H_2SO_4), para de esta forma recircular la resina:



Para este caso el medio o resina será Alúmina Activada (A.A.) producida por ALCOA, Arkansas, EUA con las siguientes especificaciones:

A.A. Alcoa

Grado F - 1 (estado de oxidación del anión a intercambiar)

Malla 28 x 48

Forma de las partículas: Granular

Porosidad interna x, % : 25 a 30

Densidad de masa en seco: 50

Capacidad de adsorción g/g sólido seco: 0.15

Área superficial m^2/g : 235

Nombre industrial registrado: Alcoa F-1

Reynolds R 2101

RA 1

R 2101

RA 3

Fuente: 13

Capacidad de intercambio

La capacidad de intercambio es la cantidad de arsénico ($H_2AsO_4^-$) que el volumen de la unidad retiene del agua tratada con el residuo óptimo a lo largo de un ciclo de trabajo. Está expresada como gramos de arsénico ($H_2AsO_4^-$) retenidos/ m^3 de medio. El residuo óptimo es obtenido de la tabla de Gallaghan-Vermillion, la cual enlista temperaturas medias máximas con la dosis media a ser aplicada.

T 1/2 Máx. (°C)

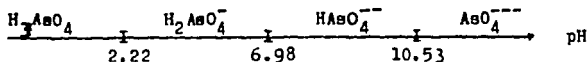
$H_2AsO_4^-$ (mg/l)

La obtención de la capacidad de intercambio es importante para calcular el volumen de medio (resina) a ser empleada en la planta de tratamiento.¹⁶

Diseño de parámetros

Deben considerarse siempre las características de la Alúmina Activada (A.A.) siguiendo las recomendaciones de Rubel y Wosley (los investigadores con más experiencia en el campo de la A.A.).

a) El pH de operación (del agua de entrada) debe estar entre 5 y 6 siendo el óptimo 5.5. En este valor de pH existe la especie $H_2AsO_4^-$ de acuerdo al siguiente diagrama de zonas de predominio:



Si el agua de entrada no es ácida deberá acidificarse con d6-

sis de ácido sulfúrico 0.05 N antes de entrar al tanque intercambiador.

b) La altura del lecho de A.A. no deberá ser menor de 0.6 m el valor óptimo será 1.5 m.

c) El tiempo mínimo de contacto 5 minutos.

Los autores mencionados anteriormente proponen la siguiente secuencia operacional para obtener mejores resultados.

Retrolavado.

Un sobreflujo de retrolavado durante 10 minutos, con una velocidad de 18-22 m/h, deberá expandirse el lecho para una mejor regeneración.

Regeneración

Después del retrolavado, una solución al 1% de NaOH es pasada a través del medio o resina también en una dirección de sobreflujo.

Tiempo de paso 35 minutos

Velocidad 6 m/h.

Volumen de NaOH 1% $1.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ A.A.

Después de este paso, el medio es lavado con agua, también en sobreflujo, durante 30 minutos a una velocidad de 12 m/h.

Entonces un segundo paso con NaOH 1%, pero ahora en dirección bajoflujo.

1.35 m^3 NaOH 1% / m^3 A.A. a una velocidad de 6 m/h durante 35 minutos.

Neutralización

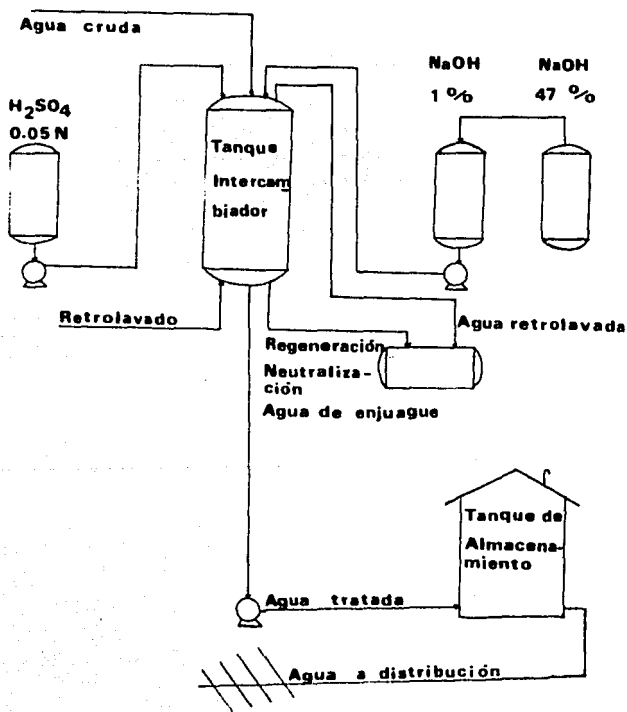
Para neutralizar el exceso de NaOH, es pasado H_2SO_4 0.05 N a una velocidad de 6 m/h. El volumen de la solución ácida es 1 m^3 de H_2SO_4 0.05 N / m^3 A.A. En algunas corrientes, lo mejor es analizar el pH del efluente. Alcanzando un pH de 7.5 el paso del ácido es detenido y el pH del agua cruda deberá

ser ajustado a 5.5 . Sin embargo también puede ser empleado ácido carbónico H_2CO_3 , preparado por el paso de CO_2 a través de agua.

Diseño Básico

El diseño básico de un sistema en el cual el agua cruda es pasada a través de un medio intercambiador en un recipiente adecuado. Este recipiente tiene entradas y salidas como un filtro a presión. Dos tanques contienen solución de hidróxido de sodio, otro de ácido sulfúrico y un tanque de almacenamiento, con sus correspondientes bombas de alimentación.¹⁶

Diagrama de Proceso (Remoción de Arsénico por Intercambio Iónico empleando Alúmina Activada como medio intercambiador).¹⁶



Costos

Capacidad de la planta : 150 m³/día

Inversión de equipo

Columna con instrumentación	\$ 4948
Tanques auxiliares(4)	\$ 11814

Total \$ 16762

Instalación 30%	\$ 5028
Ingeniería 15%	\$ 2517

Ref. 23

Reactivos químicos

NaOH 1% , 1350 litros

$$\frac{1000 \text{ g. Agua} \times 1 \text{ g. NaOH}}{99 \text{ g. Agua}} = 10.10 \text{ g. NaOH}$$

$$\frac{10.10 \text{ g. NaOH} \times 1 \text{ mol NaOH}}{1000 \text{ g. Agua} \times 40 \text{ g. NaOH}} = 0.2525 \text{ mol/kg}$$

densidad NaOH = 2.31 g/ml
Perry 3-26

$$\frac{0.2525 \text{ mol} \times 2.130 \text{ kg}}{\text{kg} \times \text{litro}} = 0.5378 \text{ mol/litro}$$

$$\frac{0.5378 \text{ mol} \times 40 \text{ g. NaOH} \times 1350 \text{ litros}}{\text{litro} \quad 1 \text{ mol}} = 29.042 \text{ kg de NaOH}$$

H₂SO₄ 0.05 N(0.025 M), 1000 litros

$$\frac{0.025 \text{ mol ácido} \times 1000 \text{ litros}}{\text{litro}} = 25 \text{ moles de ácido}$$

$$\frac{25 \text{ mol ácido} \times 98 \text{ g. ácido}}{1 \text{ mol de ácido}} = 2.45 \text{ kg de ácido}$$

Alúmina Activada

Para conocer el volumen del medio es necesario obtener la capacidad de intercambio (esto se efectúa experimentalmente). Sin embargo tomamos en cuenta un dato bibliográfico.²³

$$\text{Consumo } 0.0033 \text{ kg/m}^3$$

Energía

Se manejan velocidades relativamente bajas lo que produce requerimientos de energía bajos, puede considerarse un consumo de 3 HP (un HP por cada bomba).

$$(3)(0.746) = 2.238 \text{ Kw (24 h)} = 53.712 \text{ Kwh}$$

$$(53.712)(0.5) = 26.856 \text{ \$/día}$$

$$\frac{26.856 \text{ \$ día}}{150 \text{ m}^3 \text{ día}} = 0.18 \text{ \$/m}^3$$

Costo del agua

$$\text{agua cruda } 10.64 \text{ \$/m}^3$$

1.5 litros de alimentación y sale 1 litro de agua tratada.

$$(10.64)(1.5) = 15.96 \text{ \$/m}^3$$

$$\text{Supervisión } 8.00 \text{ \$ diarios (Ref. 23)}$$

$$\frac{8 \text{ \$ día}}{150 \text{ m}^3 \text{ día}} = 0.053 \text{ \$/m}^3$$

Anualidad

Se toma 1.25 como el factor de carga en el proceso.

320 días del año laborables.

\$ 16762 (1.25) = 20 952.5 \$/año

$\frac{20\ 952.5\ \$\ \text{año}}{320\ \text{días año}} = 65.47\ \$/\text{día}$

$\frac{65.47\ \$\ \text{día}}{150\ \text{m}^3\ \text{día}} = 0.436\ \$/\text{m}^3$

En resumen

Inversión de equipo	\$ 16 762
Instalación 30%	\$ 5 028
Ingeniería 15%	\$ 2 517

Reactivos químicos

	\$/kg	\$/m ³	\$/m ³
NaOH	5.0	29.04	145.20
H ₂ SO ₄	7.5	2.45	18.37
A.A.	31.25	0.0033	0.103
			<hr/>
			163.67 \$/m ³

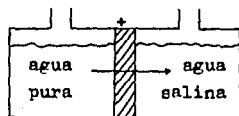
Energía	0.18 \$/m ³
Costo del agua	15.96 \$/m ³
Supervisión	0.053 \$/m ³
Anualidad	0.436 \$/m ³

Total 180.29 \$/m³

4.3.2 Osmosis Inversa

Principio

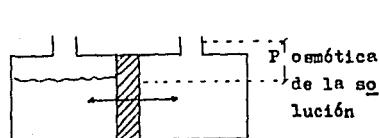
Cuando un agua salina y un agua pura están separados por una membrana semipermeable, se origina una presión osmótica natural que fuerza al agua a pasar por la membrana, diluyendo al agua salina.



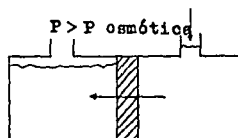
+ membrana semipermeable

Osmosis directa

Pero si se aplica una presión a la solución de sal, mayor que la presión osmótica natural, la membrana deja pasar agua de la solución de sal al agua pura, mientras que las impurezas disueltas son rechazadas, de ahí que el proceso se llame ósmosis inversa.



Equilibrio osmótico



Osmosis inversa

Las membranas semipermeables dejan pasar el agua y retienen el 90 y 99% de todas las sales disueltas, del 95 a 99% de la mayoría de los compuestos orgánicos y el 100% de materia coloidal más fina.¹⁶

Definición de ósmosis inversa

La ósmosis inversa o ultrafiltración separa un soluto de una solución, obligando al disolvente a fluir a través de una membrana, mediante la aplicación de una presión mayor que la

presión osmótica normal. El término de ósmosis inversa se utiliza generalmente para describir los procesos en los que las moléculas de soluto son de aproximadamente el mismo tamaño que las del disolvente, mientras que la ultrafiltración se utiliza para separaciones que incluyen solutos cuyas dimensiones moleculares son diez o más veces mayores que las del disolvente y se encuentran por debajo de un tamaño de 1/2 micra. Esos procesos de separación basados en diferencias de presión a través de una membrana, combinan la adaptabilidad con la simplicidad técnica. A diferencia de los procesos de destilación y congelación, pueden funcionar a temperaturas ambiente sin cambio de fases.¹³

• Membranas

Una membrana adecuada para los procesos de ósmosis tiene que satisfacer requisitos estrictos. Por ejemplo algunas propiedades importantes de las membranas en relación con la economía del proceso de desalinización son:

- a) Selectividad de la membrana para el agua sobre los iones, que determina el número de etapas a presión que se requieren para producir agua potable.
- b) Velocidad de permeación del agua por unidad de gradiente de presión, que determina el tamaño del equipo por una unidad de velocidad de producción de agua potable.
- c) Durabilidad de la membrana, que determina la frecuencia con que se deben reemplazar las membranas.¹³

Existen en el mercado dos tipos de membrana:

- 1) Acetato de celulosa (mezcla mono, di y tricetato).
- 2) Poliamidas aromáticas.

Las membranas de acetato de celulosa se adaptan a un fuerte caudal por unidad de superficie y se utilizan en forma tubular, plana arrollada en espiral y de fibras huecas.

Las membranas de poliamida tienen mayor caudal específico se fabrican en forma de fibras huecas para obtener un máximo de

superficie por unidad de volumen, aproximadamente 15 veces más que las membranas enrolladas en forma espiral.

Características principales de los dos tipos de membrana

Membrana	Acetato de celulosa	Poliamida aromática
Configuración	Espiral o fibras huecas	Fibras huecas
P normal de funcionamiento	30 a 42 bar.	20 bar.
T máxima de funcionamiento	30 °C	35 °C
T máxima de almacenamiento	30 °C	40 °C
pH tolerados	4.5 a 6.5	4 a 11
Hidrólisis	muy sensible	insensible
Ataque bacteriano	muy sensible	insensible
Cloro libre (dosis máxima admisible continuada)	0.5 - 1 mg/l	pH ≤ 8: 0.1 mg/l pH > 8: 0.25 mg/l
Otros agentes oxidantes	mediana resistencia	buena resistencia
Duración	2 a 3 años	3 a 5 años

Estos valores son promedio, pero existen algunas membranas especiales que aún mejoran las características anotadas. Una propiedad importante es que estas membranas, debido a sus poros tan finos, detienen las bacterias y algunos virus. ¹⁶

Instalaciones de ósmosis inversa

Una unidad de ósmosis inversa consiste en una yuxtaposición de módulos elementales seguidos con una geometría determinada, lo que conduce a una gran facilidad de extrapolación de unidades.

El esquema de montaje más sencillo consiste en el montaje en paralelo. Todos los módulos trabajan a las mismas condiciones de presión y conversión. Este sistema se emplea en la mayoría de las unidades de pequeña capacidad.

El agua que se va a procesar debe ser pretratada según la impureza del agua. Sin embargo, en general, el agua pasa primero por un filtro de malla en el cual separan arena y otras partículas mayores de 100 micras.

Después el agua pasa por un filtro intermedio para remover sólidos mayores y por fin por un cartucho (polipropileno) de 5 micras para la purificación del agua antes de que sea alimentada a la unidad de ósmosis inversa.

Dos manómetros en la entrada y a la salida de los módulos permiten conocer permanentemente la pérdida de carga en el interior del sistema. Dos caudalímetros en el agua tratada y el efluente indican la conversión, la cual se ajusta de dos válvulas de regulación. La conversión es la relación entre el caudal de agua depurada y el caudal del agua cruda, ya que no toda el agua que entra en el equipo reduce su salinidad.

Ciertos equipos analizan la calidad del agua producto, en base a mediciones de conductividad. El medidor de conductividad opera una válvula de tres pasos. Si la corriente del efluente se mantiene entre los límites predeterminados, la válvula dirige al tanque de almacenamiento o a la red. En caso contrario, el agua es rechazada y la dirige al desagüe.¹⁶

Dimensionamiento

El dimensionamiento del equipo depende del caudal a tratar, al contenido de arsénico presente en el agua cruda o influente y al deseado en el efluente, al factor de conversión del equipo previsto (dato que provee el fabricante) y al % de reducción del ión en estudio, dato característico del equipo.

Por ejemplo:

Agua cruda As 0.2 ppm
 F 4.0 ppm

Si la conversión es del 75% con una reducción en el agua tratada del 95% por cada litro de agua tratada, la concentración de salida será:

$$\text{As } (0.2) (0.05) = 0.01 \text{ ppm}$$

$$\text{F } (4.0) (0.05) = 0.20 \text{ ppm}$$

Si se juntara el total de agua que pasa por el equipo, al tener una conversión del 75% de acuerdo con esto, de cada 4 litros que pasen se tendrán los siguientes efluentes:

$$4 \text{ litros} \left\{ \begin{array}{l} 3 \text{ litros}(75\%) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{As } 0.01 \text{ ppm} \\ \text{F } 0.20 \text{ ppm} \end{array} \right. \\ 1 \text{ litro}(25\%) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{As } 0.20 \text{ ppm} \\ \text{F } 4.0 \text{ ppm} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Juntando los dos efluentes se tendrá:

$$(3) (0.01) = 0.03 \text{ ppm de As}$$

$$(3) (0.20) = 0.6 \text{ ppm de F}$$

$$(1) (0.20) = 0.2 \text{ ppm de As}$$

$$(1) (4.0) = 4.0 \text{ ppm de F}$$

En total:

$$\text{As } (0.03 + 0.20) / 4 = 0.05 \text{ ppm}$$

$$F (0.6 + 4.0) / 4 = 1.5 \text{ ppm}$$

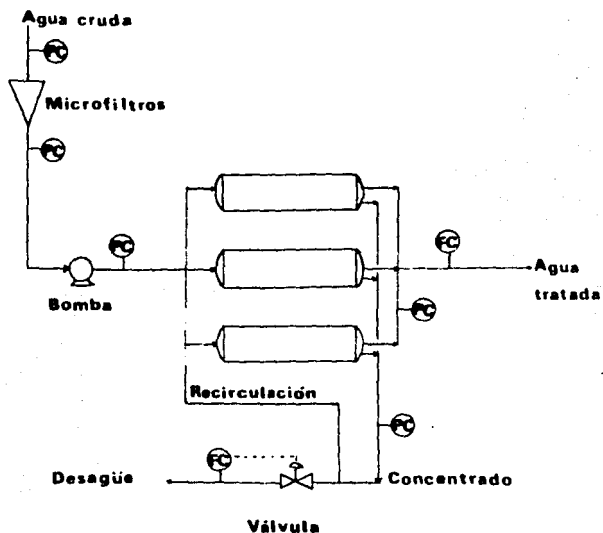
Ref. 16

Aplicaciones de la ósmosis inversa

Aún cuando la ósmosis inversa se utiliza con la mayor frecuencia para la desalinización de agua de mar y las aguas salobres, se puede usar también para el fraccionamiento de mezclas de materiales que sean difíciles de separar por otros medios, como los polímeros sintéticos o naturales.

La separación de concentraciones muy altas de sólidos suspendidos también puede ser factible si se utiliza una agitación suficiente para evitar la formación de tortas sobre la membrana.¹³

Esquema de Instalación de Osmosis Inversa.¹⁶



PC controlador de presión (Mandmetro)

FC controlador de flujo (Caudalimetro)

Costos

Las grandes plantas piloto para la desalinización, se han construido con una capacidad hasta de 10 millones de gal/día. El costo de la membrana por unidad de área es independiente de la capacidad de la planta; por lo tanto el costo relativo de la membrana aumenta al incrementarse el tamaño de la planta, disminuyendo los costos de operación y el capital. Los diseños se basan en una presión de 750 lb/in² manométricas, una reducción de sal de 5000 a 500 ppm.

La membrana utilizada en las estimaciones de costo es de acetato de celulosa, con una vida promedio de 1 año, una velocidad de transferencia de 10 a 15 gal/ft² día en una membrana plana y tubular en un intervalo de 0.1 a 0.2 gal/ft² día en fibras huecas y finas.¹³

Tomando en cuenta el análisis de costos para una planta con una capacidad de 3 780 m³/día, se lleva a cabo el análisis de costos para una planta de ósmosis inversa con una capacidad de 150 m³/día.

Estimación detallada de costos de una planta de ósmosis inversa con una capacidad de 3 780 m³/día. Ref. 13

Agua salobre 5000 ppm
80% de recuperación

Costo de instalación a largo plazo	\$ 4.0/ft ²
Costo de membranas	\$ 1.0/ft ²
Presión	1000 lb/in ²
Duración de las membranas	13 608 litros/ft ²
Costo de capital (excluyendo las membranas)	\$ 240 000

Costo centavos/ 3 780 litros

Energia	8.0
Suministros y materiales de mantenimiento	0.5
Mano de obra	1.7
Mano de obra de mantenimiento	2.5
Reemplazamiento de membranas	27.6
Extras en la nómina	1.8
Gastos generales y de administración	1.2
Amortización	7.2
Impuestos y seguro	2.0
Total	52.5

Estimación detallada de costos de una planta de ósmosis inversa con una capacidad de 150 m³/día.

Agua salobre 560 ppm
80% de recuperación

Costo de instalación a largo plazo	\$ 0.158/ft ²
Costo de membranas	\$ 0.04/ ft ²
Presión	39.68 lb/in ²
Duración de las membranas	540 litros/ft ²
Costo de capital (excluyendo las membranas)	\$ 9 524

Costo centavos/ 150 litros

Energía	0.318
Suministros y materiales de mantenimiento	0.020
Mano de obra	0.067
Mano de obra de mantenimiento	0.099
Reemplazamiento de membranas	1.095
Extras en la nómina	0.071
Gastos generales y de administración	0.048
Amortización	0.285
Impuestos y seguro	0.080
Total	<hr/>
	\$ 2.083

Costo del agua efluente

$$\frac{\text{cts. } 2.083}{150 \text{ litros}} \times \frac{1000 \text{ litros}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \$}{100 \text{ cts.}} = \$ 0.1388 / \text{m}^3$$

4.3.3 Oxidación y coagulación con cloruro férrico $FeCl_3$

Principio

El principio de esta técnica de remoción de As es la adsorción física que ejerce el Fe III sobre el As V.

Se utiliza el cloruro férrico que en solución acuosa produce hidróxido férrico $Fe(OH)_3$ que es el compuesto químico que adsorbe al arsénico.

Debido a que el As en el agua esta como As III (óxido arsenioso As_2O_3) y para llevar a cabo una remoción eficiente es necesario realizar una oxidación para pasar del As III al As V (este último se adsorbe mejor que el As III).

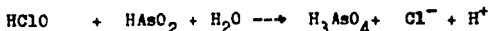
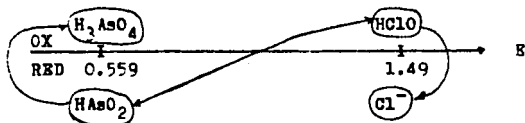
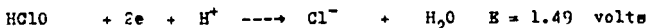
La oxidación se efectua en el agua empleando una precloración o mediante cloro ozonizador.¹⁶

Reacciones

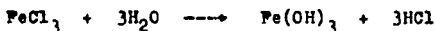
1.- Oxidación del As III a As V por precloración con ácido hipocloroso $HClO$.

Reacción general $As\ III \rightarrow As\ V + 2e$

Datos:



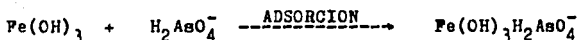
2.- Formación de hidróxido férrico



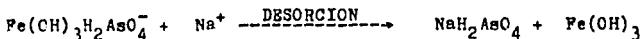
3.- Adsorción física



Ya que el medio es ligeramente ácido 5.5 de acuerdo con el diagrama de zonas de predominio el compuesto de As V que se tiene es el H_2AsO_4^- con lo que la adsorción es la siguiente:



4.- Desorción mediante NaOH 0.25 %



Se puede observar que el proceso de oxidación es importante para tener mejores resultados cuando se tienen casos parecidos al anterior, ésto se puede ver en la siguiente experiencia:

Resultados de oxidación y coagulación, prueba para remover As (hoja siguiente 70 B)

Resultados de oxidación y coagulación, prueba para remover arsénico

Propiedad	sulfato de cobre, CuSO_4		sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$		sulfato férrico, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$		cloruro férrico, FeCl_3		Observaciones
Oxidante	Cl_2	KMnO_4	Cl_2	KMnO_4	Cl_2	KMnO_4	Cl_2	KMnO_4	As en el agua cruda 0.8 mg/l
Dosis de oxidante mg/l	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	
Flóculo	Regular	Regu	Regular	Regu	Regular	Bueno	Bueno	Bueno	T del agua 26.5°C
As en el sobrenadante	0.72	0.62	0.70	0.65	0.65	0.50	0.45	0.35	
% de remoción As	10	22	12	30	19	38	44	56	pH del agua 7.4

De la tabla anterior se concluye que el mejor agente oxidante es el cloro (Cl_2), que se utiliza antes de realizar la coagulación con cloruro férrico FeCl_3 .²⁰

Equipo de la planta de oxidación-coagulación

- a) Cámara de carga
- b) Aforador
- c) Dosificadores de cloro (oxidante ácido hipocloroso) y cloruro férrico.
- d) Floculador
- e) Sedimentador
- f) Filtro
- g) Tanque de almacenamiento (Reserva)

Diseño

- a) Cámara de carga

Puede eliminarse si se bombea con un flujo constante y fijo. Puede ser de cualquier tipo. Para su diseño se requiere el tiempo de residencia del agua en la cámara.

θ tiempo de residencia 30 a 45 segundos.

El volumen se conoce con la ecuación $V = Q \theta$

C flujo volumétrico en ft^3/seg

- b) Aforador

Puede ser de cualquier tipo en tubo o canaleta (Parshal).

Es ideal que existan dos medidores de flujo: uno instantáneo y otro totalizador.

En caso de usar tubería, se puede emplear los nuevos cloro-ozonizadores que a partir de agua, aire y sal común (H_2O , N_2 , O_2 y NaCl) producen una mezcla de gases oxidantes (H_2O_2 , Cl_2 , ClO_2).

Si se usa ác. hipocloroso (HClO), lo mismo que para la solución de cloruro férrico (FeCl_3) se puede utilizar cualquiera de los dosificadores.

Debido a la necesidad de una mezcla rápida y homogénea, se puede aprovechar la turbulencia de la cámara de carga o del

aforador para dosificar ahí el coagulante y el oxidante.

d) Floculador

Se recomienda el más sencillo como el hidráulico, constituido por una cámara con chicanas o paletas divisorias internas.

$\theta = 30$ minutos.

e) Sedimentador

La referencia bibliográfica 16 recomienda en base a experiencias un $\theta = 120$ minutos.

El sedimentador debe tener de preferencia una tolva en su primera porción para concentrar los lodos. Deberá tener un aquietador de aguas a la entrada.

El mantenimiento del equipo será manual.

Relación largo/ancho = 4 a 6/1

f) Filtro

Es recomendable por razones de costos y facilidad de operación el filtro lento convencional (filtro lento de arena).

Velocidad de filtración $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

g) Tanque de almacenamiento (Reserva)

Conviene una reserva equivalente a un día de consumo cuando menos, es importante que tenga tapa.

La postcloración se lleva a cabo a la entrada de la reserva.

Es conveniente disponer de un tanque lavador de arena (del filtro). Se venden ya hechos o se puede construir. En ese recipiente se lavará la arena con la solución de NaOH .¹⁶

Esquema de la Planta

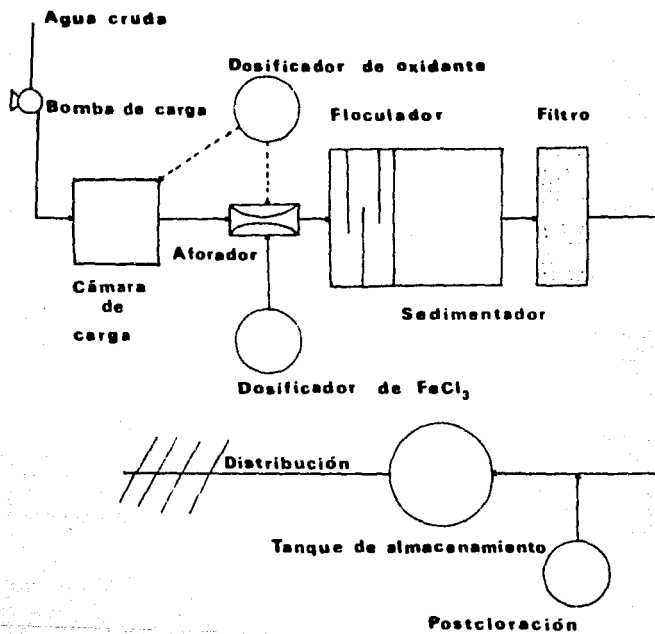


Diagrama de Proceso

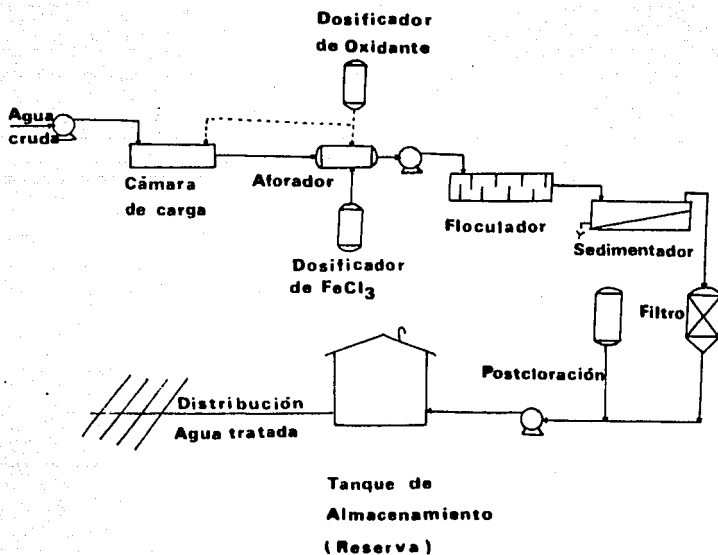
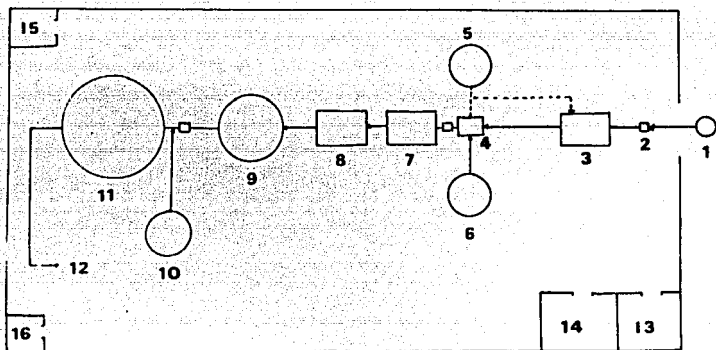


Diagrama de Distribución y Localización de Equipo



Equipos

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 1 Pozo | 9 Filtro de arena |
| 2 Bomba de carga | 10 Postclorador |
| 3 Cámara de carga | 11 Tanque de almacenamiento |
| 4 Aforador | 12 A red de distribución |
| 5 Dosificador de oxidante | 13 Oficinas |
| 6 Dosificador de cloruro férrico | 14 Laboratorio |
| 7 Floculador | 15 Almacén de reactivos |
| 8 Sedimentador | 16 Baños |

Costos

El costo de tratamiento para la planta de remoción de As se calculó de acuerdo a lo siguiente:

Cantidad de agua tratada: $150 \text{ m}^3/\text{día}$ (promedio)

Costo de FeCl_3 utilizado/día

$$V = 150 \text{ m}^3$$

Dosis de FeCl_3 32 mg/litro

Pureza del FeCl_3 80%

Costo de FeCl_3 \$0.50/kg

$$\text{Costo} = \frac{(V) (\text{Dosis}) (\text{Costo del cloruro férrico})}{\text{Pureza}}$$

$$\text{Costo} = \frac{(150 \text{ m}^3) (0.032 \text{ kg/m}^3) (\$ 0.50/\text{kg})}{0.80} = \$ 3.00$$

Costo del cloro utilizado/día

$$V = 150 \text{ m}^3$$

Dosis de cloro 12 mg/litro

Pureza del cloro 50%

Costo del cloro \$ 0.75/kg

$$\text{Costo} = \frac{(150 \text{ m}^3) (0.012 \text{ kg/m}^3) (\$ 0.75/\text{kg})}{0.50} = \$ 2.70$$

Energía por día \$ 1.50

Salario por día \$ 1.00

Total de costos = \$ 8.2

Costo total del tratamiento del agua efluente:²⁰

$$\text{Costo total} = \$ 8.2 / 150 \text{ m}^3 = \$ 0.055/\text{m}^3$$

Este costo está basado en información bibliográfica referida a trabajos realizados en Taiwan donde se construyó una planta para servir a 1500 habitantes con una capacidad de $150 \text{ m}^3/\text{día}$, éste se efectuó en marzo y abril de 1969.

Consideraciones generales del proceso

- 1.- Si se produce la oxidación del agua a tratar, los resultados de la coagulación son mejores.
- 2.- Se debe filtrar el agua proveniente de la sedimentación ya que los flocs de hidróxido férrico son más pequeños que los tradicionales de hidróxido de aluminio y algunos escapan a la sedimentación.
- 3.- La filtración lenta es más eficiente que la rápida.
- 4.- La dosis óptima de cloro o de oxidante es de 10 a 30 mg/l.
- 5.- Si se elimina la oxidación descrita en el inciso No.1, las corridas de los filtros son muy cortas (5 días).
- 6.- La dosis óptima de cloruro férrico debe estimarse para cada agua mediante una prueba de jarras, aunque se estima entre 30 y 60 mg/l.
- 7.- Al finalizar una corrida se deben lavar las arenas del filtro lento, utilizando una solución de NaOH 0.25% (2.5 g. de NaOH/ 1 litro) el arsénico se remueve muy eficientemente de las mismas.
- 8.- Para lograr mejores remociones, el pH debe mantenerse entre 5.5 y 6.5

5.- Recomendaciones y conclusiones

- Bibliografía
- Apéndices

5.- Recomendaciones y conclusiones

Se han analizado tres técnicas para la remoción de As desde el punto de vista económico y fisicoquímico, intercambio iónico, ósmosis inversa y oxidación-coagulación estas son las más apropiadas para resolver el problema.

La técnica de intercambio iónico es muy efectiva pero presenta la desventaja de el costo, no existen plantas a gran escala y su manejo es complejo.

La ósmosis inversa es una técnica que ofrece excelentes resultados para el tratamineto de aguas salobres pero nuestro problema no es de aguas salobres, además este proceso produce grandes flujos de desagüe que no es conveniente inyectar al subsuelo (esta experiencia se viene realizando en la Comarca Lagunera ya que ahí opera una planta de ósmosis inversa con capacidad de 15 m³/día), aumentando la concentración de As en el agua teniendo en consecuencia un ciclo nocivo para la solución del hidroarsenicismo.

La técnica de oxidación-coagulación con cloruro férrico tiene la ventaja de un funcionamiento práctico, existen antecedentes en este problema en especifico con la instalación de la planta de Taiwan en 1969, requiere de poco personal especializado, el costo es el más bajo de las técnicas analizadas, produce desechos en menor cantidad y poco peligrosos para el ambiente.

En conclusión la mejor técnica de acuerdo al análisis fisicoquímico y económico es la de oxidación-coagulación.

Costo del agua	tratamiento
180.2 \$/m ³	Intercambio Iónico
0.138 \$/m ³	Osmosis inversa
0.055 \$/m ³	Oxidación-coagulación

Bibliografía

- 1.- Callejón Canalda, Alfredo del
1974
Obtención de agua desmineralizada a partir de ósmosis in-
versa.
T - 1965 ESICIB, IPN, México.
- 2.- Cantú Brito Carlos Gerardo
1982
Arsénico y mutagenesis. Estudio de la frecuencia de inter-
cambio de cromátides hermanas en individuos residentes en
zonas de arsenicismo endémico.
T - 1321 UAC, Pac. de Medicina, Torreón, Coah. Méx.
- 3.- Devore G. Muñoz Mena
1975, 4a. reimpresión
Química orgánica
Ed. Publicaciones Cultural, Méx.
- 4.- P. Ayres
Análisis químico cuantitativo
Ed. Mc. Graw Hill, Méx.
Apendice
- 5.- Herbert F. Lund
Manual para el control de la contaminación industrial
Ed. Mc. Graw Hill, Méx.
- 6.- Ibarra Rodríguez Nora Neyla
1980
Diseño de una planta de tratamiento para deflouración de
agua potable
T - 900 Instituto Tecnológico de Durango, Dgo. Méx.
- 7.- Información científica y tecnológica
1968 Vol. 4 No. 60
El arsénico, las plumas de gallina y la cadena alimenti-
cia
México

- 8.- Maier Franz
1971
Flouración del agua potable
Ed. Limusa, Méx.
- 9.- American Waters Works Association Manual
1951
Water quality and treatment, a manual prepared by AWWA
2nd. Ed. New York, USA
- 10.-Marín Cortés Cesar
1975
Proyecto de práctica para desmineralización de agua en columnas de intercambio iónico en el laboratorio de operaciones unitarias
T - 1935 ESIQIE, IPN, México
- 11.-Mejía Ramirez Ma. de Lourdes
1979
Sistema de tratamiento de aguas residuales, lagunas de estabilización
T - 2228 ENCB, IPN, México
- 12.-Olguín Portillo Rogelio
1977
Comportamiento del cat-floc con un coagulante ácido y un alcalino en el tratamiento del agua
T - 1940 ENCB, IPN, México
- 13.-Perry, Chilton
1980, 5a. Ed.
Manual del Ingeniero Químico
Ed. Mc. Graw Hill, México
- 14.-Ordoñez Patricia
1986
Estudio de la contaminación del suelo de la Comarca Lagunera
SARRH, México

- 15.-Sedus, DGNRE
1986
Datos estadísticos de la Comarca Lagunera
México
- 16.-Solsona Felipe
Solución al hidroarsenicismo
OPS - OMS, México
- 17.-The Merck Index Handbook
1975
5a. Ed. USA
- 18.-Weber Jr. Walter J.
1979
Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos
Ed. Reverte, España
- 19.-World Health Organization
1981
Arsenic, Environmental Health
Genova, Italy
- 20.-Y. S. Shen
Study of arsenic removal from drinking water
Journal American Water Works Association
Vol. 65 No. 8
USA
- 21.-Woo Rosas Jorge
Anteproyecto de una planta desaladora de ósmosis inversa
para agua de mar de $30 \text{ m}^3/\text{día}$
Fac. de Química, UNAM, México
- 22.-Gordon M. Fair, John G. Geyer
Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas
residuales
Tomo 2 Capítulos 29-30
Ed. Limusa Wiley SA, 1971

. 23.-Lazarín Ortega Luis Guillermo

Evaluación económica de procesos para obtener agua de
alta calidad en química del Rey S.A.

T- 1174 ESIQIE, IPN, México

Apendice

Funcionarios entrevistados y comunidades de la Comarca Lagunera.

Comunidades

Francisco I. Madero

Batopilas

Pinisterre

San Pedro

Luchana

Nuevo Mundo

Yucatan

Funcionarios entrevistados

Dr. Carlos Ortega ⁺	SSA Durango
Ing. Raúl García Meraz ⁺	SARH Durango
Ing. Alejandro García G.	SEDUE Durango
Bio. Francisco Ruiz ⁺	SEDUR Durango
Dr. Javier García Salcedo ⁺	Universidad de Coahuila
Ing. Sergio Becerra Winkler	SSA México
Q. Isabel Corona	SSA México
Dr. Pablo Pérez Quintanilla	DGRS
Dr. Luis Araujo Longoria ⁺	IMSS Coahuila
Dr. Carlos López Moreno	IMSS Coahuila
Dr. Roberto Santos	IMSS Durango
Dr. Daniel Rodríguez	IMSS Durango
C. Bulmaro Valdez Anaya	Universidad de Coahuila
Ing. Guillermo Bueno ⁺	JEAPA Durango
Ing. Edith Salazar	JEAPA Durango
Ing. Raúl Chavez Beltran	SEDUE Coahuila
Inf. Joaquín Arias Cortéz ⁺	SEDUE Coahuila
Lic. Hugo Araujo	Unión Ejidos Felipe Angeles

+ Integrantes del subcomite para el estudio del hidroarsenicismo.

Concentraciones de arsénico en la Comarca Lagunera

Tabla No. 1 Contenido de arsénico mg/l La Laguna-Coahuila 1986

No. de muestra	Municipio	Población	As mg/l	Fuente de abastecimiento
28	Sn. Pedro	Santa Ana	0.517	pozo propio
3	Fco. I. <u>Ma</u> dero	El Dorado	0.483	pozo
8	Fco. I. <u>Ma</u> dero	La Pinta	0.305	sistema Finis- terre
12	Fco. I. <u>Ma</u> dero	Batopilas	0.300	pozo
24	Sn. Pedro	El Cantabro	0.284	pozo
5	Fco. I. <u>Ma</u> dero	Sn. Isidro	0.271	sistema Finis- terre
21	Sn. Pedro	Luchana	0.264	sistema Finis- terre
2	Fco. I. <u>Ma</u> dero	Otzanduri	0.263	sistema Finis- terre
30	Sn. Pedro	Sn. Rafael de Arriba	0.245	sistema Finis- terre
23	Sn. Pedro	Sn. Fco. de la Fé	0.240	sistema Finis- terre
29	Sn. Pedro	Sofía de Arriba	0.235	sistema Finis- terre
4	Fco. I. <u>Ma</u> dero	Finisterre	0.232	sistema Finis- terre
26	Sn. Pedro	Vega Larga	0.228	sistema Finis- terre
27	Sn. Pedro	Begoña	0.225	sistema Finis- terre
25	Sn. Pedro	Nuevo Mundo	0.224	sistema Finis- terre
6	Fco. I. <u>Ma</u>	Sn. Salvador	0.221	sistema Finis- terre

No. de muestra	Municipio	Población	As m ² /1	Fuente de abastecimiento
7	Fco. I. Ma <u>dero</u>	Covadonga	0.217	sistema Finis- terre
22	Sn. Pedro	Alejo Gon- zalez	0.215	sistema Finis- terre
11	Fco. I. Ma <u>dero</u>	Lequeitio	0.197	pozo
154	Matamoros	Sn. Felipe Estrella	0.177	pozo
9	Fco. I. Ma <u>dero</u>	Sta. Maria de Arriba	0.143	pozo
153	Matamoros	Filipinas	0.135	pozo
36	Viesca	Gabino Vaz- quez	0.106	pozo
152	Matamoros	Sacrificio	0.088	sistema rural Matamoros
155	Matamoros	Congregación Hidalgo	0.086	pozo
34	Viesca	Viesca	0.080	sistema Viesca
151	Matamoros	Sto. Niño Aguanaval	0.069	pozo
35	Viesca	Viesca	0.064	sistema Viesca
32	Sn. Pedro	Sn. Pedro	0.061	Sn. Pedro
37	Matamoros	Matamoros	0.053	sistema Matsu- moros
33	Sn. Pedro	Sn. Pedro	0.051	Sn. Pedro
157	Matamoros	Corona	0.051	pozo
19	Fco. I. Ma <u>dero</u>	Santo Niño	0.050	pozo

Total de muestras 59

Contenido de arsénico mg/l		muestras	%
intervalo			
0.300	- 0.517	4	6.7
0.250	- 0.299	4	6.7
0.200	- 0.249	10	17
0.150	- 0.199	2	3.3
0.100	- 0.149	3	5
0.050	- 0.099	10	17
0.000	- 0.050	36	44

Tabla No. 2 Sistema rural Finisterre

No. de muestra	Municipio	Población	As mg/l	Conductividad eléctrica mhos/cm
2	Fco. I. Madero	Otzanduri	0.263	550
4	Fco. I. Madero	Finisterre	0.232	555
5	Fco. I. Madero	Sn. Isidro	0.271	560
6	Fco. I. Madero	Sn. Salvador	0.221	560
7	Fco. I. Madero	Govadonga	0.227	550
8	Fco. I. Madero	La Pinta	0.305	560
21	Sn. Pedro	Luchana	0.264	565
22	Sn. Pedro	Alejo Gonzalez	0.215	565
23	Sn. Pedro	Sn. Francisco de la Fé	0.240	570
25	Sn. Pedro	Nuevo Mundo	0.224	570
26	Sn. Pedro	Vega Larga	0.228	570
27	Sn. Pedro	Begoña	0.225	570
29	Sn. Pedro	Sofia de Arriba	0.235	570
30	Sn. Pedro	Sn. Rafael de Arriba	0.245	570
		Promedio	0.242	563

Gráfica No1 Contenido de Arsénico en mg/l. vs. o/o de muestras
La Laguna, Estado de Coahuila, México.

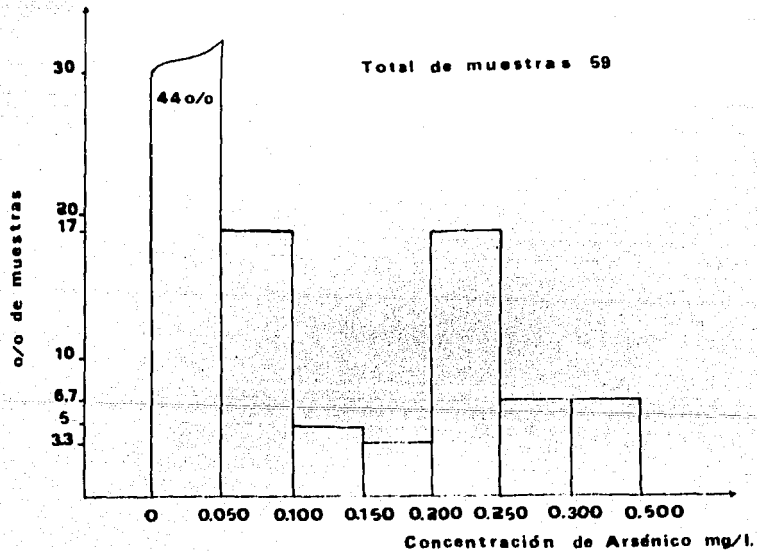


Tabla No. 3 Contenido de arsénico mg/l La Laguna-Durango 1986

No. de muestra	Municipio	Población	As mg/l	Fuente de abastecimiento
58	Tlahualilo	Ceceda	0.197	sistema Tlahualilo
55	Tlahualilo	Tlahualilo	0.178	sistema Tlahualilo
57	Tlahualilo	Pamplona	0.176	sistema Tlahualilo
56	Tlahualilo	Tlahualilo	0.149	sistema Tlahualilo
54	Tlahualilo	Tlahualilo	0.142	sistema Tlahualilo
59	Tlahualilo	Lucero	0.085	pozo
53	Tlahualilo	Horizonte	0.074	pozo
68	Gómez Palacio	Arcinas	0.067	pozo

Total de muestras 37

Contenido de arsénico mg/l intervalo	muestras	%
0.150 - 0.200	3	12.3
0.100 - 0.149	2	5.4
0.050 - 0.099	3	12.3
0.001 - 0.049	29	78.3

Tabla No. 4 Sistema Tlahualilo

No. de muestra	Municipio	Población	As mg/l	Conductividad eléctrica mhos/cm
54	Tlahualilo	Tlahualilo	0.142	450
55	Tlahualilo	Tlahualilo	0.178	440
56	Tlahualilo	Tlahualilo	0.149	440
57	Tlahualilo	Pamplona	0.176	440
58	Tlahualilo	Ceceda	0.197	440
Promedio			0.168	442

Gráfica No 2 Contenido de Arsénico en mg/l. vs. o/o de muestras
La Laguna, Estado de Durango, México.

