

# INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE GRADUADOS E INVESTIGACION  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN AGRICULTURA



VARIABILIDAD ESPACIAL DEL HIDROARSENICISMO  
EN LA REGION LAGUNERA

DISERTACION

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN USO Y CONSERVACION  
DEL AGUA

046.54  
TEC.2  
1993  
c.1

MIGUEL ENRIQUEZ SANCHEZ

MAYO DE 1993

# INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE GRADUADOS E INVESTIGACION

PROGRAMA DE GRADUADOS EN AGRICULTURA



VARIABILIDAD ESPACIAL DEL HIDROARSENICISMO  
EN LA REGION LAGUNERA

DISERTACION

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN USO Y CONSERVACION  
DEL AGUA

MIGUEL ENRIQUEZ SANCHEZ

MAYO DE 1993

INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE  
MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY  
DIVISION DE GRADUADOS E INVESTIGACION  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN AGRICULTURA

VARIABILIDAD ESPACIAL DEL HIDROARSENICISMO EN LA REGION  
LAGUNERA

DISERTACION

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

ESPECIALIDAD EN USO Y CONSERVACION DEL AGUA

MIGUEL ENRIQUEZ SANCHEZ

1993

INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE  
MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY  
DIVISION DE GRADUADOS E INVESTIGACION  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN AGRICULTURA

VARIABILIDAD ESPACIAL DEL HIDROARSENICISMO EN LA REGION  
LAGUNERA

DISERTACION

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

ESPECIALIDAD EN USO Y CONSERVACION DEL AGUA

MIGUEL ENRIQUEZ SANCHEZ

1993

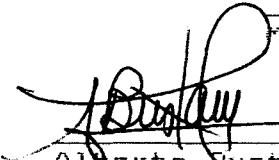


INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE  
MONTERREY  
CAMPUS MONTERREY  
DIVISION DE GRADUADOS E INVESTIGACION  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN AGRICULTURA

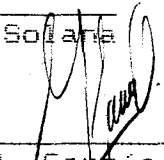
Los miembros del jurado examinador recomendamos que la presente disertación sea aceptada como requisito parcial para optar el grado académico de Doctor en Ciencias Agrícolas especialidad en :


USO Y CONSERVACION DEL AGUA

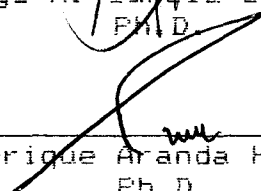
El Jurado Examinador :

  
Alberto Sustani Adem  
Ph.D.


M.S. Antonio Carlos Elizondo Solana  
Asesor

  
Jorge H. García Drozco  
Ph.D.

  
Oscar Aguirre Luna  
Ph.D.

  
Enrique Aranda Herrera  
Ph.D.

APROBADO

  
Ph.D. Enrique Aranda Herrera  
Director del Programa de Graduados en Agricultura

Mayo de 1993

## A G R A D E C I M I E N T O S

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de beca académica cuyo financiamiento hizo factible concluir satisfactoriamente los estudios del Programa Doctoral en el ITESM Campus Monterrey.

Al Dr. Enrique Rivera Camarena y al M.C. Juan E. Grajeda Gómez de la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria por la confianza, amistad y apoyo brindado durante el desarrollo de los estudios de Posgrado.

Al personal académico del Programa de Graduados en Agricultura del ITESM por sus valiosas experiencias compartidas y de manera especial al M.S Antonio Elizondo Solana y Ph.D. Enrique Aranda Herrera de quienes siempre recibí muestras de comprensión, amistad y atenciones durante mi estancia en el ITESM.

A los Físicos Luis Gonzáles Hita, Ismael Mata Arellano e Ing. Luis F. Sánchez Días del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por la información proporcionada para la consecución de la presente tesis.

## DEDICATORIA

A mis padres Sr. José Enríquez P.(+) y Sra. Benita Sánchez B., con la satisfacción de la responsabilidad cumplida .

A mi esposa, Lic. Ma. Concepción Silva Martínez por su amor , comprensión apoyo y entereza en los momentos difíciles de nuestra vida.

A mis hijos Dennis, Mitchell y Leslie que fueron la motivación principal a la superación personal.

A mis compañeros del Programa de Graduados en Agricultura: Ma. del Refugio Peña, Ignacio Luján, Jorge Leyva, Jose Luis Ramírez, Manuel Can, Eduardo Padrón, Adán Nolasco y especialmente a mi amigo Guillermo García Legaspi.

## INDICE GENERAL

	PAGINA
INTRODUCCION	1
OBJETIVOS E HIPOTESIS	3
LITERATURA REVISADA	
Características y calidad del agua.	4
Normas para la calidad del agua.	5
Fuentes de contaminación del agua.	6
Factores naturales de contaminación del agua.	10
Factores humanos de contaminación del agua.	18
Ciclo biogeoquímico del arsénico.	24
Minerales arsenicales.	30
El arsénico en aguas naturales.	40
Metilación del arsénico.	45
Arsénico en los vegetales.	53
Pesticidas arsenicales.	56
Toxicología de los compuestos arsenicales.	62
Hidroarsenicismo en la Región Lagunera.	64
Remoción del arsénico.	66
Teorías sobre el arsénico en la Región Lagunera.	71
Geología de la Región Lagunera.	79
Acuíferos de la Región Lagunera.	93



## MATERIALES Y METODOS

Localización del área de estudio.	100
Metodología.	105
Descripción general del método " KRIGING "	106
Técnicas de muestreo suelo-planta-producto.	112
Técnicas de análisis químicos para arsénico.	112

## RESULTADOS Y DISCUSION

Variabilidad espacial del hidroarsenicismo.	116
Identificación de la principales fuentes de arsénico en la Región Lagunera.	118
Identificación de la fuente principal de As., en el área noroeste (NW) de la Región Lagunera.	125
Identificación de la fuente principal de As., en el área sureste (SE) de la Región Lagunera.	136
Identificación de la fuente principal de As., en el área noreste (NE) de la Región Lagunera.	146
Acumulación de arsénico en el sistema suelo-planta producto.	152
Acumulación de arsénico en el suelo.	153
Acumulación de arsénico en alfalfa.	159
Acumulación de arsénico en leche.	164

CONCLUSIONES	170
RESUMEN	172
LITERATURA CITADA	173
ANEXO	182

## INDICE DE CUADROS

Cuadro número		Página
1.-	Factores que influyen en la calidad de las fuentes de agua.	9
2.-	Concentración promedio de arsénico en diferentes tipos de rocas	25
3.-	Abundancia del arsénico. Antimonio y Bismuto en los meteoritos y rocas ígneas.	26
4.-	Minerales que contienen arsénico como constituyente principal.	31
5.-	Algunos minerales que conllevan arsénico	32
6.-	arsénico en depósitos minerales arsenicales.	38
7.-	Abundancia del arsénico en aguas naturales.	40

8.-	Concentración de arsénico en agua potable de lugares que presentan enriquecimiento geológico	41
9.-	Resultados de análisis físicoquímicos de agua contaminada por arsénico y tratada mediante ósmosis inversa.	70
10.-	Análisis físicoquímicos del agua subterránea de los pozos de la sulfatera de Viesca Coah.	137
11.-	Indices comparativos del agua de mar y agua de la sulfatera de Viesca Coahuila.	139
12.-	Relación de pozos en el área A con máxima concentración de arsénico.	146
13.-	Concentración promedio de arsénico en suelo,alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> L) y leche.	152



## INDICE DE FIGURAS

Figura número		Página
1.-	Relación típica temperatura-oxígeno durante el verano e invierno en agua superficial.	17
2.-	Transferencia del arsénico al ambiente.	29
3.-	Tres mecanismos que podrían participar en la metilación de metales y metaloides.	47
4.-	Biosíntesis de metilarsina a partir de arsenato por metanobacterio.	50
5.-	Mecanismo propuesto para la metilación de compuestos de arsénico en el ambiente.	51
6.-	Localización de la Región Lagunera.	100
7.-	Localización del área de estudio.	101

8.-	Localización de pozos muestreados.	107
9.-	Configuración tridimensional del arsénico en el agua subterránea de la Región Lagunera.	117
10.-	Isoconcentraciones de arsénico en el agua de la Región Lagunera.	119
11.-	Profundidad al nivel estático.	122
12.-	Elevación del nivel estático.	123
13.-	Esquema mostrando la variación vertical de los grupos minerales de la Región de Santa Bárbara Chihuahua.	128
14.-	Distribución de sólidos totales disueltos en el agua subterránea de la Región Lagunera.	138
15.-	Diagrama de Stiff para clasificación de aguas de acuerdo a sus iones dominantes.	142

16.-	Concentración de arsénico total en tres	154
17.-	sitios de textura de suelos diferente.	155
18.-	Concentración de arsénico extractable	157
19.-	en tres sitios de textura de suelo	158
	diferente.	
20.-	Concentración de arsénico acumulado	160
21.-	en alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> L.)	161
22.-	Concentración de arsénico acumulado	165
23.-	en leche.	166

## ANEXO

INDICE DE CUADROS		Página
A1	Lista clasificada por iones dominantes de los arsenatos minerales.	83
A2	Indice alfabético de arsenatos y minerales asociados.	205
A3	Datos químicos e isotópicos de la Comarca Lagunera, México.	212
INDICE DE FIGURAS		
A1	Diagrama ilustrativo del origen de los minerales.	216
A2	Diagrama que muestra algunas rocas ígneas y sus relaciones con sedimentaria y metamórficas.	217
A3	Diagrama que muestra la proyección de un dique batolito.	218



A4	Perfil típico de suelos de serie Coyote.	219
A5	Perfil típico de suelos de serie Bermejillo	220
A6	Perfil típico de suelos de serie San Pedro.	221

## INTRODUCCION

Se identifica como Región Lagunera al área geográfica situada en la parte septentrional de la República Mexicana y ocupa las porciones suroeste del Estado de Coahuila y noreste del Estado de Durango.

Esta Región se localiza entre los paralelos 25° 15' 00" y 26° 15' 00" de latitud norte y entre los meridianos 102° 40' 00" Y 104° 00' 00" al oeste de Greenwich .

Cuenta con una extensión territorial de 54,967.5 Km<sup>2</sup> ; Conformada por una área montañosa y una superficie plana donde se localizan los predios agrícolas y pecuarios, así como los sectores urbanos. La población estimada para 1992 es de 1,260,063 habitantes.(INEGI, Censo de 1990).

En los últimos 30 años se ha detectado una contaminación significativa por arsénico en el acuífero de la Región Lagunera en concentraciones muy superiores a los límites establecidos para consumo humano desconociéndose en la actualidad el origen y distribución del arsénico.

Estudios epidemiológicos han registrado una relación directa de la ingesta crónica del arsénico disuelto en el agua (Hidroarsenicismo) con la magnitud en el incremento de tasas de mortalidad debidas principalmente a enfermedades cardiovasculares y cáncer, ésta última atribuible directamente al hidroarsenicismo crónico endémico que afecta aproximadamente a 300,000 habitantes de esta Región. (Maeda, 1992).

La importancia de este problema desde el punto de vista social, técnico y económico se deriva de la naturaleza tóxica del arsénico, particularmente por ser un elemento carcinogénico, este problema de salud se magnifica además al creciente interés de su explotación en la industria metalúrgica y electrónica (Ramana , James y Queneau 1988).

La solución al hidroarsenicismo, se complica en virtud de la gran cantidad de compuestos arsenicales (Aproximadamente 300), que se pueden formar como resultado de las múltiples valencias del arsénico. Esta situación hace difícil y complejo la evaluación de su comportamiento; más aún, la información disponible relativa a registros sistemáticos de la calidad del agua

en la región son limitados e insuficientes debido a restricciones económicas y técnicas.

Bajo la hipótesis de que existe una fuente puntual de compuestos arsenicales que genera una tendencia definida de distribución espacial del hidroarsenicismo en la Región Lagunera, el presente estudio estableció como objetivos identificar la fuente principal de contaminación arsenical, determinar la variabilidad espacial del hidroarsenicismo en la Región Lagunera analizar la situación de la la acumulación actual de este contaminante en el sistema suelo-planta, ruta potencial de toxicidad para los seres vivos.

## LITERATURA REVISADA

Características y calidad del agua.

El agua pura es un líquido sin sabor, color y olor, formado por hidrógeno y oxígeno. Como el agua es casi un solvente universal, muchas sustancias naturales y artificiales son en cierto grado solubles. En consecuencia, el agua en la naturaleza contiene sustancias disueltas, además como producto del ciclo hidrológico el agua contiene otras diversas sustancias, así como gases. Estas sustancias se identifican con frecuencia como impurezas o contaminantes que contiene el agua. Los contaminantes se clasifican como:

Iónicas y disueltas; No iónicas y no disueltas; Gases.

Los contaminantes disueltos, además se clasifican en dos grupos que dependen de si los iones son positivos o negativos.

Los contaminantes no iónicos y no disueltos, se caracterizan con frecuencia por el tamaño y se identifican como impurezas en suspensión o coloidales.

El color y la materia orgánica se pueden clasificar ambos como iónicos y disueltos y también como iónicos y no disueltos, dependiendo de la naturaleza de las moléculas.

En la evaluación de la calidad del agua, generalmente los contaminantes se clasifican como físicos, químicos y biológicos.

La presencia o ausencia de contaminantes, depende de la fuente de agua. Por ejemplo, la materia orgánica en suspensión, comunmente se encuentra en el agua superficial, pero no se esperaría hallarla en el agua del subsuelo debido a la acción filtrante del acuífero.

Para evaluar si las impurezas específicas son dañinas se debe determinar :

- 1.- La naturaleza y cantidades de los contaminantes presentes
- 2.- Los usos a los que se vaya a destinar el agua.
- 3.- La tolerancia de los diversos usuarios a los diversos contaminantes.

Calidad y normas para el agua .

La calidad del agua se evalúa en términos de sus características físicas, químicas y biológicas y por los usos que se intente hacer con el líquido.

Con frecuencia se ha demostrado que el agua que contiene algunos constituyentes disueltos es mucho más sabrosa o paladeable que el agua "pura " .

Los valores de los parámetros de calidad que se utilizan para evaluar la utilidad de una agua determinada para cierta aplicación se llaman

generalmente criterios están basados en la experiencia y en la evidencia científica que pueden ser aplicados por el usuario para juzgar sobre los méritos relativos de una agua, en tanto que las normas o estándares de calidad del agua, usualmente son establecidas por dependencias reguladoras para definir los niveles limitantes para los varios constituyentes que pueden ser tolerados y que sean compatibles con el uso o usos que se pretendan .

Las concentraciones de los diversos constituyentes que sean mayores de los límites aprobados para proteger la salud humana, constituyen causas para el rechazo de un abastecimiento de agua.

Fuentes de contaminación del agua.

Si la calidad del agua se evalúa por sus impurezas físicas, químicas y biológicas, la calidad dependerá de la historia previa del agua .

El agua recoge impurezas desde el momento mismo de su formación en las nubes, en consecuencia, los contaminantes pueden ser introducidos al agua desde varias fuentes a través del ciclo hidrológico. Los contaminantes pueden ser diluidos, concentrados, o acarreados con el ciclo del agua.

fuentes de agua superficial.

Agua superficial es un término usado para describir el agua sobre la superficie del suelo abierta a la atmósfera y sujeta a escurrimientos superficiales. Las fuentes de agua superficial más comunes son los ríos, lagos y estanques.

La calidad del agua superficial está notablemente influenciada por los puntos de contacto en el caso de escurrimientos superficiales. En el caso del agua estática sobre la superficie la calidad es fluctuante de acuerdo a los flujos estacionales como la lluvia, presentan menos sedimentos que los ríos, sin embargo están más sujetos a mayores impactos microbiológicos.

Agua subterránea.

El agua del subsuelo es una fuente vital de abastecimiento, especialmente en las zonas en donde los veranos secos ó las sequías prolongads originan que el escurrimiento fluvial cese o se agote.

Muchas aguas superficiales reciben una porción principal de su escurrimiento del agua del subsuelo , que a su vez son la fuente principal de la recarga del agua del subsuelo. Estas dos fuentes de abastecimiento se encuentran íntimamente relacionadas y la utilización irracional de una de ellas puede afectar el agua disponible de la otra (USEPA,1989).



Custodio y Llamas (1976) indican que la calidad del agua del subsuelo o subterránea, depende mucho de las condiciones del acuífero, de su litología, de la velocidad de circulación, de la calidad del agua de infiltración, de la relación con otras aguas o acuíferos y de las leyes del movimiento de las sustancias transportadas por el agua.

Además las aguas subterráneas tienen la oportunidad de absorber materiales por las lentas velocidades de circulación, mayor presión y temperatura a la que están sometidas y facilidad de disolver  $\text{CO}_2$  del suelo no saturado. Por ello sus concentraciones salinas son mayores a las de aguas superficiales en general.

Benitez (1973) expresa que el agua subterránea al atravesar las rocas ígneas, sólo se disuelven pequeñas cantidades en virtud de la reducida solubilidad de estas rocas. Lo inverso con las rocas sedimentarias que generalmente son muy abundantes y constituidas por la mayor proporción de sales.

La calidad de las dos fuentes de agua, superficial y subterránea dependen de factores naturales y humanos que pueden actuar de manera aislada o conjunta y el grado de impacto de los factores operativos varía de acuerdo con el tipo y características de la fuente involucrada, por lo que es importante identificarlos.

Cuadro 1. Factores que influyen en la calidad de las fuentes de agua

<u>Factores naturales</u>	<u>Factores humanos</u>
	<u>Puntuales</u>
clima	aguas residuales
escurrimiento superficial	descarga industriales
geología	desechos peligrosos
desarrollo microbial	drenaje de minas
fuego	derrames y escapes
intrusión de agua de mar	
densidad termal	<u>No puntuales</u>
	escurrimientos agrícolas
	ganadería
	escurrimientos urbanos
	desarrollo de suelos
	erosión
	deposición atmosférica

### Factores naturales.

Los factores naturales no se controlan fácilmente y pueden tener un impacto significativo sobre la calidad de una fuente de agua.

### Clima.

El factor principal del clima que afecta la calidad del agua es la precipitación pluvial. Las altas precipitaciones generan incremento en los flujos de escorrentía que a su vez inducen el arrastre de partículas en suspensión, turbidez, color, metales u otros contaminantes .

Bajo condiciones de sequía , las reducidas tasas de escurrimiento que alcanzan a llegar a los cuerpos receptores con tiempos grandes de residencia, aceleran la actividad microbiológica y el crecimiento de algas.

La reducción del flujo de escorrentía también hace más vulnerable las fuentes de agua, considerando que los niveles de dilución se reducen incrementandose la concentración de contaminantes.

La temperatura , también es un factor climatológico importante , que afecta directamente las tasas de actividad biológica, la saturación de oxígeno, y los coeficientes de transferencia de masas.

Características de la cuenca de captación de agua de lluvia.

Las diversas características de una cuenca de captación puede tener efectos significativos sobre la calidad del agua. La topografía por ejemplo afecta las tasas de escorrentia, las pendientes pronunciadas provocan erosión introduciendo restos de materiales y nutrientes que pueden incrementar poblaciones de algas, color y turbidez.

Los tiempos de residencia en los reservorios de agua dependen también de la topografía y afectan la calidad del agua através de la sedimentación y la actividad microbiológica.

La cubierta vegetal afecta a la calidad del agua de diferentes formas: la descomposición de la cubierta vegetal produce cambios de color y es una fuente de compuestos fúlvicos y húmicos , también la cubierta vegetal es un filtro natural a la acción de escorrentia para las fuentes no puntuales de contaminación a la vez que ofrece una reacción amortiguadora de las actividades de contaminación generadas por el hombre.

La vida silvestre que habita en las áreas de captación afectan la calidad del agua, principalmente desde el punto de vista microbiológico. Por ejemplo el ganso canadiense con su intensa actividad metabólica

genera contaminación por producción de bacterias coliformes, de igual manera, los castores, venados, amizcleros y otros animales de sangre caliente se conocen que son vectores de *Giardia lamblia*, que es un patógeno protozoario que induce riesgos considerables a las fuentes de abastecimiento que están sujetas a tratamientos insuficientes.

#### Geología.

La geología local impacta directamente la calidad del agua superficial y subterránea. Por ejemplo, las aguas "duras" derivan su naturaleza de los altos contenidos de calcio y magnesio presentes en la geología del subsuelo. La presencia de radionúclidos en el agua subterránea es otro ejemplo de la influencia de la geología local sobre la calidad del agua.

Longtin, (1987) reportó la presencia de Rodón (radionúclido degenerativo del uranio) en suministros de agua a través del noreste de los Estados Unidos. Un ejemplo más evidente del impacto de la geología local sobre la calidad del agua, lo ofrece Hindin, (1981) citado por Reinert, y J.A. Hroncich.(1990) y se refiere a la contaminación de aguas superficiales por la gran cantidad de materia suspendida arrojada por la erupción del volcán Santa Elena en 1980.

La importancia de los suelos se basa en la capacidad "Buffer" que estos presentan durante las lluvias ácidas o derrames que afectan directamente las actividades biológicas en lagos y estanques, pudiendo crear problemas en el tratamiento.

Desarrollo microbiológico.

El deterioro de un cuerpo de agua, depende del nivel de nutrientes presentes, así como la actividad microbiológica.

El ciclo natural de un cuerpo de agua involucra tres fases conocidas como niveles tróficos : .  
Oligotrófico ( bajo en nutrientes y bajo en actividad microbiológica ) . , Mesotrófico (niveles intermedios) . , y Eutrófico ( alto nivel de nutrientes e intensa actividad microbiológica ) .

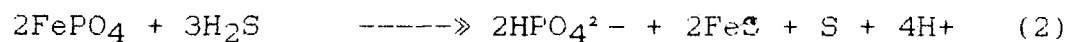
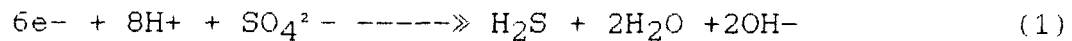
Los efectos de la calidad del agua de la fase eutrófica se relacionan con una reducción en los niveles de oxígeno consumida por la intensa actividad microbiológica, cambio de color y alta turbidez así como la formación de compuestos precursores de trihalometano (THM) ( Walker, 1983 ).

El indicador más común de una eutroficación es la presencia significativa de algas. organismos omnipresentes de los medios acuáticos .

Conteos estimados indican la existencia de más de 21,000 especies de algas que muestran una amplia diversidad en sus ecosistemas.

La reducción de oxígeno, causada por la actividad microbiológica genera una reducción química del medio acuoso que solubiliza los minerales como puede ser el caso del Hierro y el Manganeso lo que induce problemas en la calidad del agua.

Geney, (1988) Describe las dos reacciones químicas más importantes que ocurren en condiciones anaeróbicas y que afectan la calidad del agua.



La ecuación (1), representa la reducción del sulfato para formar sulfuro de hidrógeno que es muy tóxico para los organismos vivos y puede causar problemas de olor y sabor en el agua; El sulfuro de hidrógeno puede reaccionar con fosfatos de hierro para formar Sulfuros de hierro, liberando fosfatos.

Fuego.

El fuego, considerado como un factor natural que provoca la deforestación, afecta la calidad del agua al eliminar los filtros naturales que representan las cubiertas vegetales induciendo incrementos en las tasas de escorrentía y erosión que arrastran sedimentos y cargas orgánicas que afectan adversamente los cuerpos de agua receptores.

Intrusión de agua salina .

La intrusión de agua salina ocurre principalmente en regiones costeras donde el agua fluye por gradientes hidráulicos hacia las zonas de agua dulce incrementando la salinidad de las mismas , el mismo fenómeno también se puede presentar en áreas con fisuras geológicas conectando dos cuerpos de agua.

Densidad termal del agua.

Geney. (1988) muestra en la figura 1 , una relación típica temperatura - oxígeno durante las estaciones de verano e invierno.



En las profundidades próximas a los 6 metros o menos, las temperaturas de verano y los niveles de oxígeno pueden variar en función de la mezcla de aire presente. Durante períodos largos de calma, la temperatura en la superficie es relativamente mayor que la del fondo.

Se puede observar una estratificación de acuerdo con las diferentes densidades y sus consecuentes diferentes niveles de oxígeno.

En invierno, las temperaturas son típicamente uniformes y los niveles de oxígeno son adecuados, sin embargo, las cubiertas de hielo sí pueden afectar los procesos aeróbicos.

En cuerpos de agua profundos (6 metros o más) se pueden apreciar estratificaciones bien definidas que se conocen como:

Epilmnión (estrato superior), hypolmnión (estrato inferior) y termoclinal o metalmnión referente al estrato intermedio.

Estas estratificaciones pueden causar problemas significativos en la calidad del agua .

En el verano el epilmnión puede contener niveles adecuados de oxígeno debido a una buena aereación y fotosíntesis.

El hypolmnión, presenta en el fondo una deficiencia de oxígeno. la más alta deficiencia de oxígeno durante los meses de verano , se estima que es de 0 mg/L .

En invierno, el hypolimnión no presenta deficiencia de oxígeno con la excepción de cuerpos de agua muy degradados debido al incremento de la solubilidad del oxígeno en el agua fría y una menor actividad microbiológica.

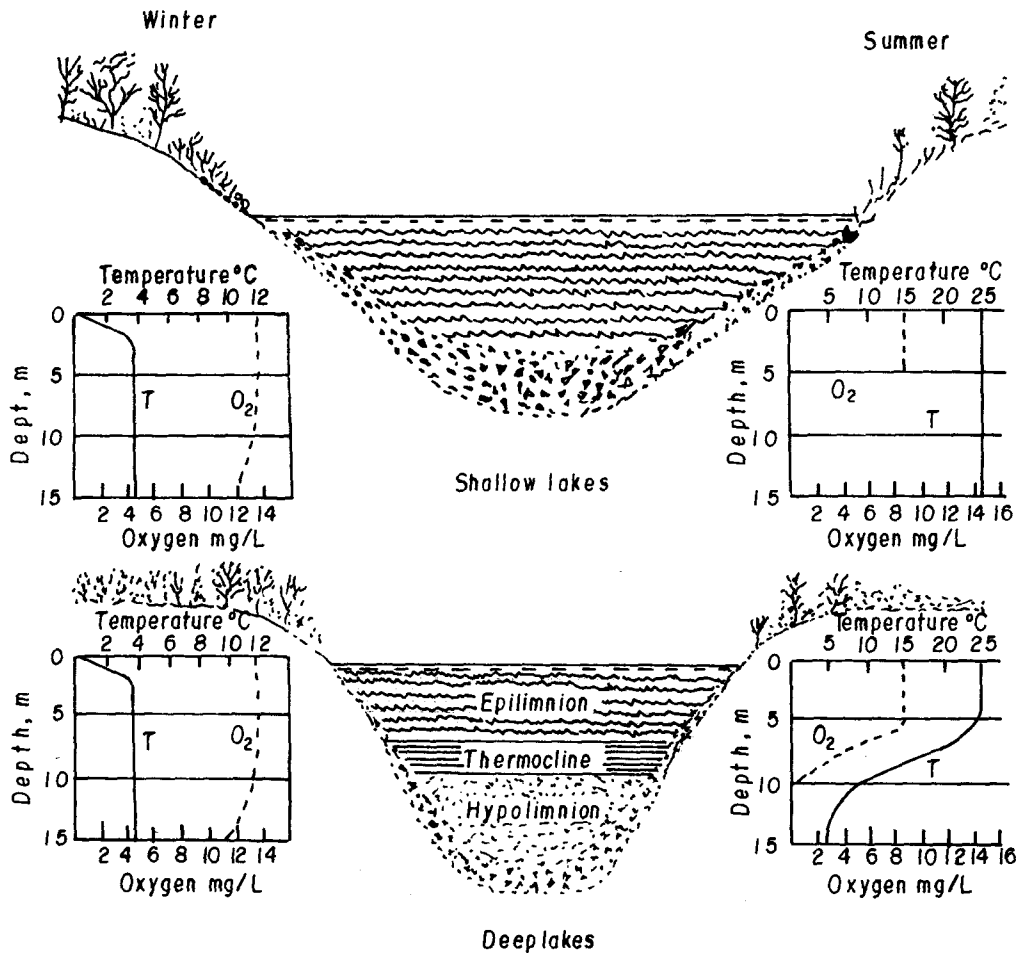


Figura 1 - Relación típica temperatura-oxígeno durante el verano e invierno en un depósito de agua superficial.

Factores humanos.

Los factores humanos que influyen en la calidad de las fuentes de agua , se caracterizan generalmente en dos tipos :

Puntuales y no puntuales.

Las fuentes puntuales de contaminación se caracterizan por una conducción específica o discreta por ejemplo el punto final de descarga de un tubo o una red de tuberías.

Las fuentes no puntuales, en contraste, involucra fuentes complejas de contaminación por ejemplo la contaminación derivada de las actividades agrícolas y ganaderas.

Fuentes puntuales .

Descargas de aguas residuales.

El efecto principal sobre la calidad del agua se debe al alto grado de contaminación bacterial , abatimiento del oxígeno disuelto, extinción de peces, introducción excesiva de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Las descargas frecuentes con altos contenidos de nitrógeno y fósforo contribuyen a acelerar procesos de eutroficación.

### Descargas industriales.

Las descargas industriales pueden afectar la calidad del agua de una fuente de abastecimiento a través del aporte de contaminantes por aire, agua y suelo.

Una industria fácilmente puede contaminar el agua de una fuente de manera directa o accidental como es el caso de derrames o escapes.

También las lagunas de oxidación pueden contaminar el subsuelo mediante el proceso de percolación profunda.

Los riesgos de derrames o escapes son muy factibles en los casos de productos tóxicos almacenados o enterrados en el subsuelos y sin ningún control de monitoreo ya que su impacto puede ser regional o a grandes distancias.

### Desechos peligrosos.

Los desechos peligrosos los define la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA 1990) como cualquier material flamable, corrosivo, reactante o tóxico en los que se debe tener un control estricto a efecto de que no contaminen las fuentes de agua potable.

Drenaje de minas.

La operación de la minería que extrae o excava minerales desde áreas superficiales o del subsuelo, crea condiciones que con frecuencia afectan la calidad del agua generando cambios en la acidez en los cuerpos receptores modificando la química del agua, así como la resuspensión de hierro, manganeso y otros inorgánicos.

Derrames.

Intencionales o accidentales ocurren en conjunción con muchas actividades humanas y por diversos conductos de contaminación.

Los productos de baja densidad generalmente son más fáciles de limpiar debido a que son materiales flotantes, a diferencia de los materiales solubles, estos últimos, pueden requerir: neutralización, oxidación, precipitación o adsorción.

En algunas situaciones, los compuestos se pueden disipar mediante procesos naturales de asimilación y degradación.

Factores humanos no puntuales

Considerando lo extenso de las áreas contaminadas y lo difuso de la naturaleza de los contaminantes, las fuentes no puntuales son más difíciles y complejas de controlar que las fuentes puntuales.

Sin embargo los esfuerzos iniciales para garantizar la calidad del agua se deben centrar en las fuentes puntuales enfatizando el análisis de sus formas de transporte y difusión para así entender y determinar las formas más adecuadas de control de las fuentes no puntuales de contaminación.

Escurrecimientos derivados de actividades agrícolas.

Cantor, y D.M. Fairchild (1987,1988) mencionan que las aplicaciones de pesticidas, herbicidas y fertilizantes que son actividades básicas en la agricultura, afectan la calidad del agua superficial y subterránea.

Actividades ganaderas.

La presencia del ganado próximo a las áreas de captación del agua de lluvia o sobre los acuíferos, presentan un efecto evidente de contaminación bacterial, asimismo, las excretas del ganado incrementan el contenido de nitratos en los acuíferos más próximos.

Escurrecimientos urbanos.

La escorrentía que baja desde las altas montañas y atraviesa las urbes arrastra contaminantes a los cuerpos receptores. Muchos de estos, son productos derivados del petróleo, así como metales pesados. También el flujo de

escorrentía que pasa por las calles de la ciudad arrastra cargas orgánicas significativas en la contaminación bacterial.

Desarrollo de suelos con fines específicos.

Un ejemplo , son las actividades de abrir nuevas superficies destinadas a urbanizaciones. Esta actividad elimina los filtros naturales de cubierta vegetal así como su reacción amortiguadora a la contaminación.

Áreas o suelos de relleno.

El lavado de estas áreas , es el riesgo principal de contaminación y la magnitud depende del tipo, cantidad y extensión espacial de los materiales de relleno así como sus coeficientes de permeabilidad.

Erosión de suelos.

La erosión de los suelos incrementa las tasas de escorrentía que generan la suspensión de sedimentos que son transportados y depositados en los cuerpos receptores afectando adversamente la calidad del agua.

Deposición atmosférica.

El transporte continuo y a grandes distancias del aire contaminado a través de la atmósfera y depositado en el suelo mediante la precipitación pluvial como lluvia

ácida con efectos evidentes sobre la calidad del agua y la vida acuática .

La magnitud del fenómeno puede producir la solubilización y lavado de metales en el suelo modificando la calidad del agua y posibles problemas en fuentes de abastecimiento sujetas a tratamiento.



### Ciclo biogeoquímico del arsénico. (As)

El arsénico es el tercer elemento del grupo VA en la tabla periódica, representa proporcionalmente el 0.00005 % de la corteza terrestre en concentraciones promedio de 5 p.p.m. Ocurre en concentraciones relativamente bajas en cualquier lugar de la naturaleza; suelo, agua, aire y organismos vivos. Es el onceavo elemento más abundante en compuestos naturales, siendo un constituyente de aproximadamente 300 minerales.

Onishi, (1969) menciona que las concentraciones de arsénico más elevadas se encuentran por lo general en suelos que presentan enriquecimiento de este contaminante, o en suelos tratados con arsenicales.

Gulledge y O'Connor, (1973) encontraron que la concentración de arsénico en sedimentos marinos varía de unas cuantas partes por millón hasta 450 p.p.m.

Onishi y Boyle, (1969,1973) analizaron el contenido de arsénico en las rocas, presentando el siguiente cuadro que muestra las concentraciones promedio en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Cuadro 2. Concentración promedio de arsénico  
(As) en diferentes tipos de rocas  
( Onishi y Boyle., 1969, 1973 )

Tipo de roca	As (p.p.m.)
<b>Igneas</b>	
Basaltos y Diabásicas	2.0
Gabros	1.4
rocas intermedias	2.1
rocas graníticas	1.5
rocas silíceas	1.5
<b>Sedimentarias</b>	
Esquistos arcillosos	13.0
Areniscas	1.0
Calcitas y Dolomitas	2.6
carboníferas y petrolíferas	25.0
<b>Metamórficas</b>	
Pizarras y Filitas	18.0
anfíbolitas y dioritas	6.0
Hornblenda	5.9
Cuarzo	5.5
Gneiss	1.5
Esquistos	1.1

Rankama y Sahama, citados por Montemayor, (1989) mencionan que el arsénico (As), antimonio (Sb), y bismuto (Bi), son unos compuestos muy raros de la litósfera superior y que el arsénico es el más abundante de ellos.

Cuadro 3. Abundancia del arsénico, Antimonio y Bismuto en los meteoritos y en las rocas ígneas. ( Rankama y Sahama 1962 )

Materia	As g/t	Sb g/t	Bi g/t
Ferroníquel de los meteoritos	360	2.0	0.50
Fase triolítica de los meteoritos	1020	7.8	2.00
Fase silicatada de los meteoritos	20	0.1	0.02
Rocas ígneas	5	1.0	0.25

El caracter más marcado de el arsénico, es que posee una tendencia a unirse al calcio y al magnesio.

El arsénico forma también varios arsenatos que contienen el anión  $\text{AsO}_4^{-3}$  en posición estructural análoga al de los fosfatos  $\text{PO}_4^{-3}$ . Además se conocen en la naturaleza varios arsenitos  $\text{AsO}_3^{-3}$ .

Los mismos autores estiman que el arsénico se encuentra en el agua de mar, principalmente en la forma de arsenito debido a la acción reductora que se lleva constantemente en este medio por la biota, y su contenido

fluctúa debido a que este elemento puede sustituir al fósforo en muchos organismos marinos, como lo muestra el hecho de encontrar de 0.007 a 0.03 g/t de arsénico en una fosforita y que las rocas sedimentarias de origen marino contienen en promedio más arsénico que en las rocas ígneas.

Coulbourn y Thornton., ( 1975 ) citan que las concentraciones de arsénico en suelos vírgenes pueden variar de 0.1 a 40 ppm ( partes por millón ) y en promedio de 5-6 ppm.

En los suelos sulfurosos las concentraciones de arsénico varían de 100 a 800 ppm. Mencionan que este arsénico puede estar presente en forma inorgánica (aniónica) o en minerales sulfurosos no intemperizados.

Los arsenatos inorgánicos, pueden estar unidos al calcio, magnesio, plomo o zinc.

Jacobs, *et al.*, ( 1970 ) y Woolson, ( 1973 ) indican que la capacidad de retención de los iones arsenato en los suelos depende del área de superficie y de su contenido de arcillas, esperando encontrar mayor concentración de arsénico soluble en los suelos arenosos que en los arcillosos.

Bohn, (1976 ) menciona que la dinámica del arsénico en el suelo es similar a la del fósforo, pero más enérgico que éste, especialmente en sistemas aereados y que en general los iones arsenato se asemejan a los ortofosfatos.

Walsh, *et al* ; ( 1977 ) concluye que en los suelos no contaminados el arsénico ocurre naturalmente en concentraciones que varía de 0.2 a 40 ppm. y considera que estos niveles no representan riesgo significativo para inducir una fitotoxicidad., y que los niveles de arsénico soluble en el suelo, están determinados por la retención relativa de los iones arsenato en los componentes del suelo principalmente por los compuestos de fierro y aluminio.

Tammes, y De Lint ; (1969) señalan que la vida media del arsénico se estima en  $6.5 \pm 0.4$  años.

Weiler, 1987. agregan que además del intemperismo fisico-químico de las rocas y minerales, la presencia de arsénico en el suelo se debe también a la depositación húmeda y seca del material particulado de origen industrial, así como la aplicación de plaguicidas y descomposición de plantas contaminadas ( figura 2 ).

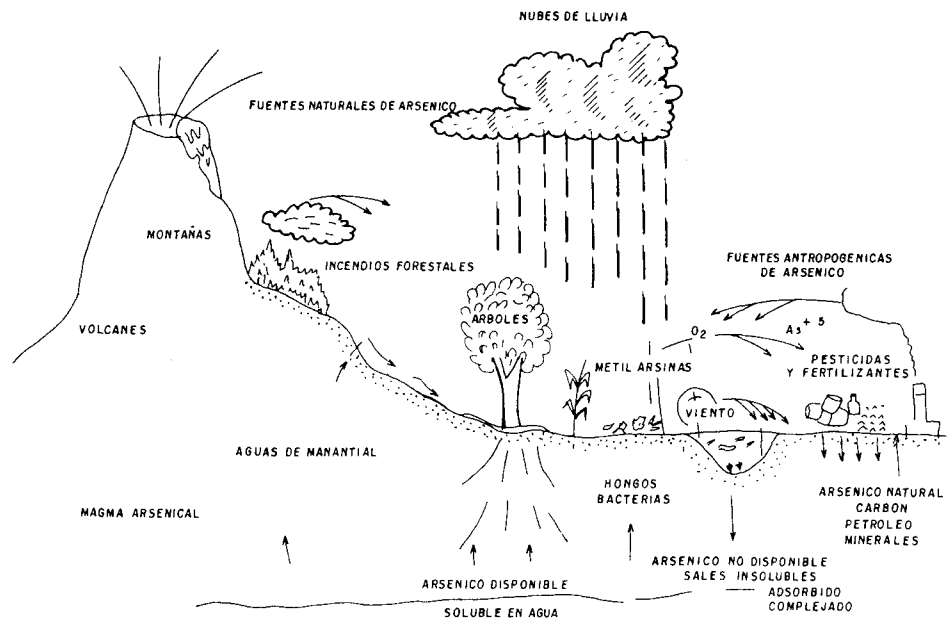


Figura 2 - Transferencia del Arsénico en el ambiente

## Minerales arsenicales

El arsénico se encuentra en los minerales como un constituyente primario de la estructura del cristal o acarreado por otros minerales.

En los cuadros 4 y 5 Onishi, (1969) enlista los minerales más comunes en que el arsénico es el constituyente primario así como los minerales que acarrean consigo el elemento arsénico.

El arsénico en los minerales primarios se encuentra en cuatro estados de oxidación :  $-3$  ,  $0$  ,  $+3$  ,  $+5$

El estado de oxidación  $-3$  , se presenta en los arseniuros y compuestos gaseosos, éstos últimos incluyen la arsina ( $AsH_3$ ), cloruro de arsénico ( $AsCl_3$ ) y otros compuestos volátiles e inestables.

Escobar y Monhemius (1988) citando a Sergeyeva (1969) mencionan que la arsina puede reaccionar en la superficie para formar arseniuros o minerales sulfosales (ej. la proustita  $Ag_3AsS_3$  ). También se puede disolver en el agua a concentraciones bajas en condiciones reductoras, reaccionando con metales como el hierro, nickel y cobalto para formar minerales como la arsenopirita, cobaltita y nicolita.

Cuadro 4.- Minerales que contienen arsénico  
como constituyente principal  
( Onishi y Boyle., 1969, 1973 )

Mineral	Fórmula
<b>Arseniuros :</b>	
Alemontita	AsSb
Arsenopaladinita	$Pd_5(As,Sb)$
Domeikita	$Cu_3As$
Loelingita	$FeAs_2$
Mauquerita	$Ni_{11}As_8$
Nicolita	$NiAs$
Para-rammelsbergita	$NiAs_2$
Ramelsbergita	$NiAs_2$
Saflorita	$(Co,Fe,Ni)As_2$
Skuterudita	$CoAs_3$
Sperilita	$PtAs_2$
<b>Sulfuros y Sulfosales :</b>	
Arsenopirita	$FeAsS$
Cobaltita	$CoAsS$
Enargita	$Cu_3AsS_4$
Gersodorfita	$NiAsS$
Glaucodot	$(Co,Fe)AsS$
Oropimente	$As_2S_3$
Proustita	$Ag_3AsS_3$
Rathita	$(Pb,Tl)_6As_{10}S_{20}$
Realgar	$AsS$
Sartorita	$PbAs_2S_4$
Tenantita	$(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$
<b>Oxidos :</b>	
Arsenolita	$As_2O_3$
Claudetita	$As_2O_3$
<b>Arsenitos :</b>	
Armangita	$Mn_3(AsO_3)_2$
Asbecasita	$Ca_3(Ti,Sr)(As_2BeSiO_{10})_2$
Ekdemita	$Pb_6As_2O_7Cl_4$
Finemanita	$Pb_5(AsO_3)_3Cl$
Reinerita	$Zn_3(AsO_3)_2$
<b>Arsenatos :</b>	
Anabergita	$Ni_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$
Beudantita	$PbFe_3AsO_4SO_4(OH)_6$
Eritrita	$Co_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$
Olivenita	$Cu_2(AsO_4)OH$
Farmacosiderita	$Fe_3(AsO_4)_2(OH)_3 \cdot 5H_2O$
Scorodita	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$



Cuadro 5. Algunos minerales que conllevan arsénico.

( Onishi, 1969 )

Mineral	Fórmula	As. (ppm)	Mineral de As. asociado
Bellita	$Pb_5SiO_4(CrO_4)_2O$	0-6.6 %	
Bindheimita	$Pb_2Sb_2O_6(O,OH)$	0-0.1 %	
Boulangerita	$Pb_5Sb_4S_{11}$	0-0.71 %	Arsenopirita
Calcopirita	$CuFeS_2$	0-0.1 %	Arsenopirita Tenantita
Calcosita	$Cu_2S$	95-225	Tetrahidrita Enargita
Cinabar	$HgS$	5-12	Tenantita Tetrahidrita
Galena	$PbS$	5-60	Erytrita
Jamesonita	$Pb_4FeSb_6S_{14}$	0-160	Arsenopirita Realgar
Marcasita	$FeS_2$	0-3 %	Arsenopirita
Molibdenita	$MoS_2$	5-500	Arsenopirita
Pseudoautonit	$x(H_3O)_2Ca(H_2O)_3UO_2(PO_4)_2$	0-4 %	
Pyrargirita	$Ag_3SbS_3$	1-1.4 %	Tetrahidrita
Pirita	$FeS_2$	5-5600	Arsenopirita Gersodorfita
Pyrrohotita	$Fe_{(1-x)}S$	5-100	Arsenopirita Nicolita
Santafeita	$Na_2Ca_3Mn_6(H_2O)_4(VO_4)_6(OH)_8$	0-2.2 %	
Esfalerita	$ZnS$	0-1.7 %	Tenantita Arsenopirita
Estibinita	$Sb_2S_3$	5-500	Arsenopirita Tetrahidrita Tenantita
Vanadinita	$Pb_3(VO_4)_3Cl$	0-13.5 %	
Veszelita	$(Cu,Zn)_3PO_4(OH)_3 \cdot 2H_2O$	0-10.4 %	

El estado de oxidación metálico (0) o arsénico nativo, se encuentra en algunos depósitos minerales a pesar del marcado carácter calcófilo del elemento.

Es probable que el arsénico metálico se formó durante los procesos de enfriamiento como de depósitos como en la sublimación volcánica, pegmatitas ó bien como un precipitado del arsenito en soluciones hidrotermales a temperaturas debajo de los 200°C . La explicación anterior puede ser la razón de su ocurrencia en forma natural en arseniuros de plata, nickel y cobalto.

El estado de oxidación (+3) se encuentra en compuestos simples como los oxidos, sulfuros, arsenitos y sulfosales.

Los óxidos de arsenolita ( $\text{AsO}_3$ ) y claudetita de misma fórmula, son muy raros debido a su alta solubilidad en el agua y sóloamente se les puede encontrar en zonas áridas, donde el potencial de oxidación es relativamente bajo.

Las principales especies de arsénico inorgánico son los arsenitos y los arsenatos.

Los arsenitos son sulfuros arsenicales tales como la arsenopirita y el oropimente.

Los arsenatos son estables en sistemas oxigenados, dentro de ciertos límites, los arsenatos son adsorbidos fuerte y eficientemente inmovilizados por ácidos débiles u oxyhidróxidos férricos alcalinos y en menor proporción por hidróxidos que presentan grandes superficies de contacto como son los de manganeso y aluminio así también como los suelos limosos y arcillosos.

Nishimura, (1988) estudiando el efecto de los iones sulfatos y carbonatos sobre las estabilidades y solubilidades de los arsenitos y arsenatos metálicos en agua, concluyó que los arsenitos y arsenatos de algunos metales pesados (Zn, Cu, Ni, y Co.) son estables a pH bajos, mientras que aquellos de metales alcalinotérreos (Mg, Ca, Sr, y Ba.) son estables a pH altos. Concluye también que la presencia de iones sulfato, incrementan las solubilidades de arsenitos y arsenatos de los metales alcalinotérreos.

Los sulfuros de arsénico, son el Realgar y el Oropimente.

El realgar, se presenta comunmente como un constituyente menor de ciertas venas de oro, peros también se le encuentra en piedras calizas y dolomíticas, en arcillas, en productos de sublimación volcánica y en manantiales de agua caliente.

El oropimente, se encuentra en venas hidrotermales así como en manantiales de agua caliente y en productos de sublimación volcánica. Ambos pueden haberse formado durante los procesos de oxidación, principalmente la arsenopirita. El oropimente en particular, se pudo haber derivado del proceso oxidativo del realgar.

Los sulfosales, son en gran parte la fuente más importante del arsénico. Son más comunes la enargita, tenantita, y los sulfuros de arsénico cúprico comparados con el simple arseniuro de cobre y la domeikita.

La arsenopirita es el más común de los minerales que conllevan al arsénico a la vez que es uno de los minerales de formación reciente.

Los arseniuros y el arsénico nativo, se encuentran en depósitos endógenos en tanto que los arsenitos y arsenatos son más libres.

Los arsenitos, son más fácilmente oxidables que los arsenatos. Los Arsenatos minerales que poseen el estado de oxidación pentavalente, predominan bajo condiciones de oxidación en zonas sujetas a cambios atmosféricos.

Generalmente se presentan a lo largo de fallas, cortes, fracturas, filones y grietas geológicas. (Escobar González y A. J. Monhemius 1988).

También se han encontrado en depósitos hidrotermales como es el caso de algunos depósitos de escorodita .

Moore e Ito., (1978) mencionan que el origen de los arsenatos no ha sido bien definido y que pueden haberse formado *in situ* como producto de la oxidación de arseniuros y sulfoarseniuros ej. la arsensiderita [  $\text{Ca}_3\text{Fe}_4(\text{AsSO}_4)_4 (\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ].

Alternativamente, la formación también se puede atribuir, a la descomposición de arseniuros y sulfoarseniuros, procedidas de una disolución y transporte del arsénico con eventuales precipitaciones como un arsenato mineral.

ej. la guerenita [  $\text{Ca}_5\text{H}_2(\text{AsO}_4)_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ].

De forma natural, se han encontrado arsenatos de :  
Al, Bi, Ca, Cu, Co, Fe, Hg, Mn, Mg, Ni, Pb, Zn y U; sin embargo sólomente los arsenatos de Ca, Fe, Mn y Pb son los más abundantes.

Los Arsenatos más comunes son la escorodita, anabergita y la eritrita. La eritrita, es el producto de oxidación de la cobaltita y otros arseniuros de cobalto y sulfosales.

Anabergita, es el producto de oxidación del arseniuro de nickel, en tanto que la escorodita es el producto de la oxidación de la arsenopirita, leolingita, realgar, etc.

Las reacciones de oxidación involucradas en la formación de la escorodita es muy compleja y no ha sido entendida por completo.

Los arsenatos se descomponen con el hidróxido férrico a pH mayores de 3.

Muchos Arsenatos se encuentran únicamente en ciertos tipos de depósitos minerales, como puede apreciarse en el cuadro número 6.

## Cuadro 6. Arsénico en depósitos minerales arsenicales

( Onishi, 1969 )

Metal	Depósito principal de mineralización
Co- Ni	nicolita, rammelsbergita, gersodorfita siegenita, fletcherita, polidomita bravoita, carrolita.
Co-Ni-Ag	nickelina, langisita, arsenopirita mauquerita, saforita, glaudocote, loelingita, rammelsbergita, cobaltita pararammelsbergita, eskuterudita y gersodorfita.
Skarn-Au	rocas carbonatadas, piritas y arsenopiritas.
Au-Ag	pirita, arsenopiritas auríferas, tetrahidrita, tenantita.
Pb-Zn-Ag	galena, esfalerita, tetrahidrita calcopirita, pyrrotita, gersodorfita plata nativa.
U-Ni	pitchblenda, gersodorfita, milerita, nicolita, pirita, bravoita, galena esfalerita, calcopirita, hematita magnetita, limonita.
Cu-Zn-Pb	pyrrotita, calcopirita, carbonita, beudantita, cerussita, acantita, freibergita, cassiterita, limonita.
Cu	enargita, tetrahidrita, tanantita, pirita
Hg-As	cinabar, antimonita, marcasita, realgar, oropimente.
Cu-As	pirita, calcopirita, pyrrotita, arsenopirita, oro nativo, tetrahidrita, tenantita.
Sn-As	cassiterita, pirita, bismuti nativo, bismuterita, arsenopirita, hematita, esfalerita, wolframita.

En el cuadro A1 del anexo, se presenta una lista de minerales arsenato que se encuentran clasificados de acuerdo a la importancia del catión.

El último grupo de esta lista titulado como miscelaneos, no se considera que sean verdaderos minerales arsenato.

El cuadro A2 en el anexo, es una lista alfabética de los nombres de los minerales arsenato donde se incluye los nombres de los minerales asociados. en ésta lista, cada mineral tiene asignado un número que se correlaciona con el cuadro A2.

en la columna "Minerales Asociados" como un auxiliar más para correlacionar ambas listas, se agrega en la segunda, la composición química de los minerales.



El arsénico en aguas naturales.

Onishi, (1969 ) menciona que el contenido de arsénico en aguas naturales, depende de la zona en que se encuentre.

Las más altas concentraciones se han encontrado en aguas subterráneas y en aguas próximas a minas con depósitos de sulfuros polimetálicos y en aguas aceitosas. (cuadro 7)

Cuadro 7.- Abundancia del arsénico en aguas naturales (Onishi,P.E., 1969 )

Tipo de agua	As (p.p.b.)
Lluvia	0.06 - 2.5
Lagos	0.40 - 54.5
Ríos	0.20 - 25.0
Subterránea	0.08 - 22.0
Manantial de agua caliente (p.p.m.)	0.03 - 13.7
Agua aceitosa y salmuera (p.p.m.)	0.01 -300.0
Agua de mar	0.15 - 5.0

Se supone que la principal forma de arsénico en la mayoría de los suministros públicos de agua, debe de ser la forma pentavalente ( +5 ) debido a la aereación y cloración.

La Organización Mundial de la Salud, OMS ( 1990 ) establece como nivel máximo permisible 0.05 mg/L de arsénico como contaminante en el agua potable.

Normalmente, los niveles de As. en agua potable son muy inferiores a 0.05 mg/L, sin embargo se han reportado casos notables de hidroarsenicismo en el agua potable: Whanger, et. al., 1977 en Alaska ; Goldblatt, et. al., 1963 en Oregon ; Kuo,t. 1968 en Taiwán ; Arguello,et. al., 1938 en Argentina; Zaldivar, R. 1974 en Chile y en México, Espinoza González en 1963.

La Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NAS., 1977) presenta en el cuadro 8 información que sugiere que en los ambientes terrestres no existe una distribución uniforme del arsénico, y que en la naturaleza sólo existen algunos sitios con enriquecimiento de este elemento tóxico.

Cuadro 8.- Concentración de Arsénico en agua potable lugares que presentan enriquecimiento geológico ( NAS., 1977)

País	Arsénico $\mu\text{g/L}$		Tipo de agua
Estados Unidos	0.1	- 21,000	pozo
Argentina	480	- 1490	grifo
Canadá	0.5	- 15	pozo
Chile	800		
México	100	- 800	pozo
Formosa	800		pozo
Taiwán	1800		pozo

Henríquez,(1977) realizó una investigación en el norte de Argentina, donde se tenían antecedentes de la existencia de valores anómalos de arsénico, vanadio y flúor en aguas subterráneas de la Pampa.

El objetivo del proyecto consistió básicamente en determinar la distribución espacial y modalidad de la contaminación de arsénico y otros elementos asociados en cada caso específico., concluyendo en lo siguiente:

\* La unidad morfológica denominada Pampa, integrada por las formaciones Puelches y Pampeana que corresponden a una secuencia de sedimentos subhorizontales de arenas no consolidadas con intercalaciones de limos y arcillas, provienen de las sierras peripampásicas, constituida por esquistos cristalinos y masas plutónicas.

\* El agua subterránea de la Pampa se encuentra en dos sistemas de acuíferos, uno inferior contenido en la formación Puelches que en algunos lugares presenta características artesianas y otro acuífero superior en la formación Pampeana con características freáticas.

Las altas concentraciones de arsénico, vanadio y flúor, se encuentra en el agua subterránea de estos acuíferos.

Las aguas superficiales no presentan contaminación significativa con estos elementos.

\* La distribución espacial de las altas concentraciones de arsénico, vanadio y flúor son casi idénticas con excepción del flúor. Las concentraciones no guardan proporcionalidad entre sí.

\* En la provincia de Córdoba existen aguas con concentración de As., superiores a 5 mg/l., estos valores se presentan en aguas muy alcalinas.ricas en bicarbonato de sodio y dureza baja.

\* En el norte de Chile, sur de Perú y borde suroeste de Bolivia, el origen del arsénico, está ligado al vulcanismo moderno y por lo tanto podría existir una relación entre el arsénico del agua de la pampa argentina y el vulcanismo.

\* Las concentraciones mayores de vanadio y flúor aunque no coinciden totalmente parecen estar íntimamente relacionados con los afloramientos de esquistos cristalinos e intrusivos graníticos de las sierras perimpampásicas.

Además el 30 % de las minas de la provincia de Córdoba, son de minerales ricos en vanadio y flúor.

\* La contaminación por vanadio alcanza valores hasta de 10 mg/l., y al igual que arsénico, las mayores concentraciones se han encontrado en aguas cuya alcalinidad es alta y dureza baja.

### Metilación del arsénico.

El ciclo geoquímico de metales y metaloides, entre ellos el arsénico, en el medio ambiente, ha adquirido enormes proporciones, al sumar las fuentes antropogénicas a aquellas de procesos netamente naturales.

Durante las últimas dos décadas se han almacenado grandes cantidades de estos elementos en los sedimentos acuáticos y continúan siendo transportados al agua, a la atmósfera y de nuevo al agua.

Actualmente se está delineando este ciclo, así como sus procesos de biometilación, acumulación, concentración y amplificación a través de la cadena alimentaria.

Cuando los metales pesados y metaloides entre ellos el arsénico, se liberan en el medio acuático, son biometilados por bacterias y hongos para producir compuestos altamente tóxicos; estos compuestos son movilizados con facilidad y a su vez bioacumulados por organismos acuáticos.

Aparentemente, la biometilación es un mecanismo de detoxificación de bacterias y hongos. En la actualidad sólo se conoce la bioacumulación de metilmercurio en organismos acuáticos, a una velocidad mayor de la que puede ser metabolizada y eliminada.

Por lo tanto se presenta un bioaumento rápido a lo largo de la cadena alimentaria, cuya biotoxicidad y larga vida biológica pueden implicar un riesgo para la salud y la estabilidad del ecosistema.

Los organismos que bioacumulan compuestos metilados, de arsénico y plomo parecen metabolizarlos y eliminarlos con poco o ningún bioaumento en la cadena alimentaria. Así, mientras que la síntesis de compuestos organometálicos parece jugar un papel destacado en el ciclo biogeoquímico, únicamente el metilmercurio representa un riesgo real (D'Itri, 1992).

#### Metilación.

Cuando los metales como el mercurio, y el plomo o los metaloides como el arsénico, se presentan como compuestos alquilados, son tóxicos y lipofílicos.

La metilación es un paso central en su ciclo biogeoquímico. Esta es considerada como un método por medio del cual los microorganismos pueden destoxificar sus células porque el proceso cambia la solubilidad, volatilidad y toxicidad del elemento, y en la mayor parte de los casos remueve el elemento metilado del área inmediata del organismo metilante.

Wood y Fanchiang. ( 1979 ) describen que en la metilación biológica, se forma una unión química entre el ión metal y un ión metil.,( ecuación 1).



En teoría el grupo metilo puede ser donado al ión metal por uno de los tres sistemas de enzimas :

- 1.- Los derivados de metilcobalamina ( vitamina B<sub>12</sub> ).
- 2.- La S-adenil-metionina.
- 3.- Los derivados de N5-metiltetrahidrofolato.

De estos sistemas, sólo los del primer grupo son capaces de transferir el grupo metilo como carbanión.

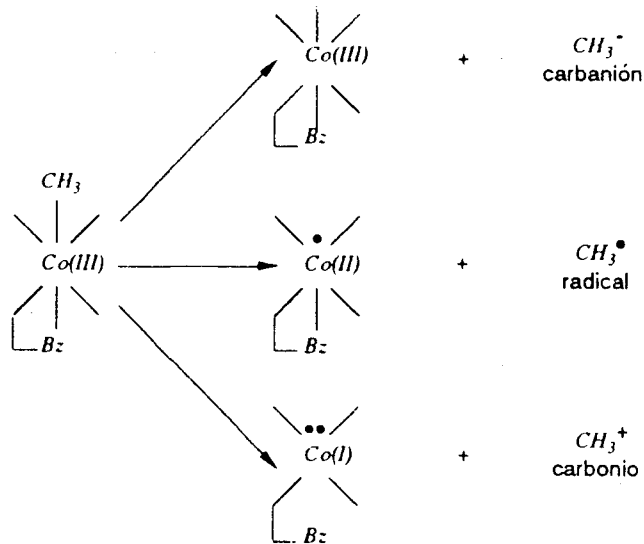


Fig.3.- Tres mecanismos teóricos que podrían participar en la metilación de metales y metaloides.  
( Ridley et al., 1977 )



Ridley *et al.*, ( 1977 ) han identificado dos mecanismos generales para la transferencia de un grupo metilo de la especie metilcobalamina a un metal pesado específico.

En un tipo de reacción, el metal o ión metaloide ataca electrofílicamente la unión  $\text{Co-CH}_3$  de la especie metilcobalamina, dando como resultado una ruptura heterolítica. Esto facilita la transferencia de un carbanión al ión del metal pesado en su estado de máxima oxidación .

De manera alterna, en un segundo tipo de reacción, la ruptura homolítica de la unión  $\text{Co-CH}_3$  forma un radical metilo. En esta reacción, se transfiere un par iónico del ión metal atacante a la macromolécula corrina (anillo tetrapirrólico ) que forma parte de la metilcobalamina que secuestra al ión cobalto central .

En ausencia de metilcobalamina, la metilación puede ocurrir también a través de sistemas de coenzimas tales como S-adenosilmetionina o por reacciones químicas que involucran transmetilación, donación de metilo del ácido fúlvico o fotoionización en presencia de otros compuestos orgánicos de metales y metaloides que se consideran en el presente trabajo, específicamente la metilación del arsénico tanto por metilcobalamina como por S-adenosilmetionina.

Desmetilación.

Mientras que algunos microorganismos sintetizan metales y/o metaloides metilados en ecosistemas acuáticos, otros los desmetilan.

En general, se han medido las velocidades de metilación pero no las de desmetilación; los resultados no han diferenciado los dos procesos. De ahí que la mayor parte de las velocidades de metilación reportadas, probablemente refleje la velocidad neta de ambas reacciones que ocurren simultáneamente.

Esta velocidad se afecta por estímulos externos como incrementos en los niveles de nutrientes, bacterias, temperatura, potencial redox, luz, pH o por el efecto de químicos xenobióticos en los sedimentos .

Metilación del arsénico.

D'Itri, ( 1992 ) cita diversos investigadores que describen la metilación del arsénico, expresando que este, es susceptible a la metilación por microorganismos tales como bacterias y hongos que producen dimetil y trimetilarsinas tóxicas.

Menciona que los primeros estudios, indicaron que la metilación del arsénico involucraba algún intermediario de metionina activado.

El siguiente descubrimiento, consistió en que el agente metilante era la S-adenosil-metionina en la metilación por hongos, lo que proporcionó evidencia bioquímica para la síntesis *in vivo* de trimetilarsinasa.

En los ambientes aeróbicos acuáticos, predomina el estado de oxidación pentavalente, la reducción por el fitoplancton es aparentemente es una adaptación para sobrevivir, debido a que la forma pentavalente es mucho más fitotóxica.

El fitoplancton excreta arsenito y metilarsenato al ambiente acuático donde es oxidado y desmetilado.

El mismo autor menciona que se ha presentado evidencias indirectas sobre la metilación del arsénico en el ambiente por bacterias.

El metanobacterio, puede reducir anaeróbicamente el ácido metilarsónico a dimetilarsina con la metilcobalamina como agente metilante. (figura 4).

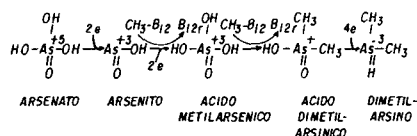


Figura 4 .- Biosíntesis de dimetilarsina a partir de arsenato por metanobacterio.  
(McBride y Wolfe, 1971; citados por D'Itri, 1992)

En ambientes anaeróbicos, los organoarsénicos volátiles formados por metilación son liberados en ambientes aeróbicos a las interfases sedimentos - agua ó agua - aire como se puede observar en la figura 5

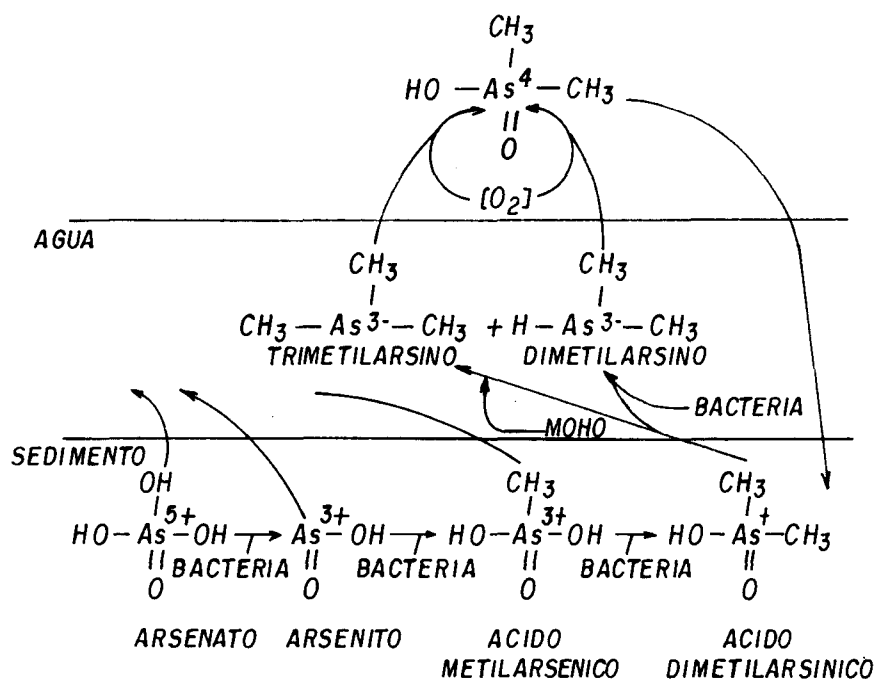


Figura 5.- Mecanismo propuesto para la metilación de compuestos de arsénico en el ambiente. (Wood, 1974)

Wood, (1974), citado por D'Itri, (1992) describe que estos compuestos de arsénico, se oxidan lentamente en el aire y el agua para producir compuestos menos tóxicos, tales como el ácido dimetilarsénico (ácido cacodílico). Debido a que el ácido cacodílico es un intermediario en la síntesis de dimetilarsina, parece evidente la existencia de un ciclo biológico para el arsénico en el ambiente.

El arsénico pentavalente, no reacciona con los grupos de sulfhidrilo aún cuando puede ser reducido a arsenito tanto en forma abiótica como biótica.

El arsénico inorgánico puede ser convertido a una forma orgánica en el tracto digestivo de un pez. Sin embargo, al agregar arsénico al agua de un tanque o al inyectarlo intramuscularmente, resultan concentraciones insignificantes de compuestos orgánicos, lo que sugiere que la conversión de arsénico a compuestos orgánicos es función de la flora intestinal.

El autor concluye que, los compuestos de arsénico y plomo se eliminan con facilidad y que las evidencias indican poca o ninguna bioamplificación de estos compuestos metilados a través de la cadena alimentaria. Sin embargo, su síntesis es muy importante en su ciclo biogeoquímico.

Arsénico en los vegetales.

La Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NAS.,1977) establece que las concentraciones naturales de arsénico en el reino vegetal, varían entre 0.01 y 5.0 p.p.m.

La variación entre los distintos vegetales, depende de la disponibilidad del arsénico y de las condiciones de crecimiento de las plantas.

Pontius, (1990) expresa que el arsénico es un requerimiento dietético y es un constituyente de muchos alimentos como las carnes rojas, pescado, aves de corral, granos y cereales. Menciona que el arsénico se presenta en forma orgánica, que es menos tóxica que la inorgánica.

Jacobs, et. al., (1970) reporta que las plantas varían su tolerancia al arsénico presente en el suelos, en función de la especie y de las concentraciones.

Woolson, (1971) indica que no se ha logrado demostrar la esencialidad del arsénico en los vegetales, a pesar de que en pequeñas cantidades, puede estimular el crecimiento vegetal.

Gutiérrez. (1979) reporta que la concentración de arsénico soluble contenido en los suelos, capaz de causar daño a las plantas, es variable de acuerdo a la especie vegetal, cita como ejemplo que el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) resulta dañado con 9.0 p.p.m. de As., el arroz (*Oriza sativa* L.) a 7.0 p.p.m. . e indica que no hay reportes de daño en alfalfa (*Medicago sativa* L.) y en cebada (*Hordeum vulgare* L.) por concentraciones mayores de 6.0 p.p.m de arsénico soluble en el suelo.

El mismo autor cita que muchas plantas son estimuladas por pequeñas cantidades de arsénico, menciona que se han encontrado que una adición de 55.0 kg. As/Ha. es beneficiosa para el crecimiento de chícharos (*Pisum sativum* L.), rábanos (*Raphanus sativus* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), y papas (*Solanum tuberosum* L.).

También se ha notado un efecto benéfico en la adición del arsenato de calcio [  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$  ] en el incremento en producción de trigo y centeno en suelos cecil-arcillosos tratados con 1200 p.p.m., de As. comparadas contra un testigo. Asimismo indica que en un suelo davidson-arcilloso, el maíz (*Zea maiz* L.), sorgo (*Sorghum vulgare* L.), soya (*Glicine max*), y algodón (*Gossypium hirsutum*) mostraron incrementos en su producción cuando se añadieron 500 p.p.m., de arsénico como arsenato de calcio.

Gutiérrez. (1979) menciona que se tiene conocimiento que los vegetales más tolerantes al arsénico, son a la vez los que tienen mayor capacidad de absorber y acumular el contaminante en las partes superiores de su estructura.

En contradicción con la anterior y expresandolo como una regla, Wagner, et. al., (1979) concluye que las partes comestibles son las que generalmente acumulan los niveles más bajos de arsénico y que las altas concentraciones se localizan en la raíz y niveles intermedios en las estructuras vegetativas y niveles bajos en las estructuras reproductivas.. Sin embargo, Small y McCants. (1962) encontraron en la hoja de Tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) concentraciones tan altas de 14.0 p.p.m., en suelos que recibían 54.0 Kg.As/Ha.

Weaver, et. al., (1984) realizó diversas investigaciones del efecto de las concentraciones del arsénico en el suelo en relación con la fitotoxicidad ; estimó que 45.0  $\mu\text{g}$  de As/g de suelo se producen efecto fitotóxicos.



La contaminación de las plantas por el arsénico, también se genera de forma directa, cuando se le aplican productos arsenicales y estos quedan adheridos a la superficie de sus estructuras. El efecto tóxico en animales y humanos, en consecuencia se produce cuando también se consume directamente las partes comestibles contaminadas.

El Servicio de Salud Pública en los Estados Unidos de América., establece 2.6 p.p.m., como límite permisible de arsénico en los vegetales comestibles.

La Agencia de Protección Ambiental del mismo País, (USEPA.1988) registra y describe cinco compuestos arsenicales de aplicación en la agricultura y medio ambiente que son :

Compuestos Arsenicales de aplicación común en agricultura

- |                           |                              |
|---------------------------|------------------------------|
| 1.- Acido arsénico.       | ( $H_3AsO_4$ )               |
| 2.- Trióxido de arsénico. | ( $As_2O_3$ )                |
| 3.- Arsenato de Calcio.   | [ $Ca_3(AsO_4)_2$ ]          |
| 4.- Arsenato de Sodio.    | ( $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ ) |
| 5.- Arsenito de Sodio.    | ( $NaAsO_2$ )                |

Acido arsénico. (  $H_3AsO_4$  )

Pertenece a la familia química de arsenicales inorgánicos, se utiliza como un desecante en el cultivo del algodón, el estado de oxidación es (+5) , es fácilmente soluble en agua, formando sales arsenicales, es muy estable en condiciones que favorecen la oxidación y altos valores de pH.

Bajo condiciones reductoras, la forma pentavalente se convierte al estado de oxidación trivalente.

El mecanismo de acción como pesticida, consiste en una inactivación y desnaturalización de las proteínas provocando una deshidratación del follaje y tallo de la planta.

La tolerancia en semilla de algodón es de 4.0 p.p.m como Trióxido de arsénico.

La tasa diaria de ingestión permisible sin causar daño a la salud humana es de 0.0165 mg/Kg/día.

Trióxido de arsénico. (  $As_2O_3$  )

El nombre químico es óxido arsenioso y se le conoce comercialmente como : Trióxido de arsénico refinado ó arsénico blanco. Su aplicación es como herbicida, insecticida y rodenticida.

El trióxido de arsénico, es una forma del arsénico inorgánico y existe normalmente como cristal transparente o amorfo de color blanco sin olor.

El trióxido de arsénico, contiene 76 % de arsénico y es ligeramente soluble en agua y otros solventes que no inducen transformaciones químicas., sin embargo, el compuesto se disuelve en medios acuosos ácidos ó alcalinos para producir ácidos libres o sal los cuales sí son solubles en diversos solventes.

El trióxido de arsénico, sublima a 193°C . La densidad es de 3.865 y el peso molecular es de 197.84.

El trióxido de arsénico , se produce en la refinación metalúrgica del Cobre y es el compuesto base de todos los demás arsenicales.

Arsenato de calcio. [  $\text{Ca}_3 (\text{AsO}_4)_2$  ]

El nombre común es arsenato de calcio, el nombre químico es ortoarsenato de calcio, comercialmente se le conoce como Turf-Cal. Se utiliza como un herbicida.

El arsenato de calcio , es una forma pentavalente del arsénico inorgánico. Existe normalmente como un polvo amorfo, sin color y sin olor.

El arsenato de calcio, contiene 38 % de arsénico y es ligeramente soluble en agua y soluble en ácidos diluidos. El punto de fusión es de 1455°C ., la densidad es de 3.62 y el peso molecular de 398.08

Arsenato de sodio. (  $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  )

El nombre común es arsenato de sodio, el nombre químico es ortoarsenato de sodio, no tiene nombre comercial y se le utiliza como insecticida.

El arsenato de sodio, es una forma pentavalente del arsénico inorgánico. Normalmente se encuentra heptahidratado como cristales sin olor.

El arsenato de sodio, contiene 24 % de arsénico y es soluble en 5.6 gm a 0°C y 100 gm a 100°C en 100 c.c., de agua, es soluble en glicerol y ligeramente soluble en alcohol. El punto de ebullición del arsenato de sodio es de 130°C, la densidad es de 1.88 y el peso molecular es de 312.01

## Hidroarsenicismo en la Región Lagunera .

Maeda. (1992) indica que el problema del hidroarsenicismo en la Región Lagunera, data desde 1955., atribuyendolo a la pérdida del equilibrio de los mantos acuíferos a consecuencia de una grave sequía que azotó la región entre los años de 1952 a 1958.

En 1963. se registra el primer estudio epidemiológico que demostró el impacto sobre la salud humana debido a la ingestión crónica del arsénico disuelto en el agua en el acuífero de la Región Lagunera.

Caballero, (1986) concluye que existe una fuente puntual de contaminación localizada en la zona norte en la Región Lagunera cercana a los municipios de San Pedro, Coahuila, Francisco I. Madero, Coah., y Tlahualilo, Durango.

Menciona también que la sobreexplotación del acuífero por sí mismo no es el factor principal de la magnitud del hidroarsenicismo basado en que las áreas de mayor sobreexplotación del acuífero , no son las de mayor contaminación arsenical.

Arsenito de sodio. (  $\text{NaAsO}_2$  )

El nombre común es arsenito de sodio, el químico es metaarsenito de sodio., se le conoce comercialmente como: Chem Pels C ; Chem Sen 56 ; Kill-All y Penite Prodalumnol Doble.

La acción pesticida es como acaricida, fungicida, herbicida, insecticida y termaticida.

El arsenito de sodio es un arsenical inorgánico en estado de oxidación trivalente. Existe normalmente como polvo blanco grisáceo y sin olor.

El arsenito de sodio, contiene 58 % de arsénico y es muy soluble en agua y alcohol. El punto de ebullición es a  $100^\circ\text{C}$ , la densidad es de 1.87 y el peso molecular de 129.91

El arsenito de sodio es una sustancia altamente tóxica a una dosis letal media de  $\text{LD}_{50}$  ( mamíferos ) de 10 - 50 mg/ Kg de peso corporal.

## Toxicología de los arsenicales inorgánicos.

Los compuestos arsenicales inorgánicos han sido clasificados por la USEPA dentro de la clase "A" debido a que se han demostrado efectos oncogénicos positivos, basados en suficientes evidencias humanas de carácter epidemiológicas.

Los arsenicales inorgánicos, han sido investigados en procesos mutagénicos en diversos sistemas de prueba que varían desde células bacterianas hasta linfocitos periféricos en humanos expuestos al arsénico.

El peso de las evidencias, indican que los arsenicales inorgánicos son mutagénicos.

Existen evidencias que indican que los arsenicales inorgánicos pueden ser potencialmente teratogénicos y fetotóxicos, basados en rutas de exposición intravenosa e interperitoneal.

Los compuestos arsenicales se conoce que son agudamente tóxicos.

Los síntomas posteriores a una exposición oral, incluye severos daños gstrointestinales produciendo vómito y diarrea, así como un colapso vascular general que culmina en shock, coma y muerte.

También se conoce que pueden existir síntomas como calambres musculares, edemas faciales y reacciones cardiovasculares (Sirachi, et. al., 1986, 1987)

#### Metabolismo de los compuestos Arsenicales.

El metabolismo de los compuestos arsenicales se conoce muy bien en animales, la forma pentavalente es metabolizada por reducción a la forma trivalente prosiguiendo una transformación a formas orgánicas que son excretadas por el sudor y las vías urinarias durante varios días.

Todos los animales exhiben este metabolismo excepto las ratas que retienen el arsénico en sus cuerpos por tiempos mayores a 90 días.



## Hidroarsenicismo en la Región Lagunera .

Maeda, (1992) indica que el problema del hidroarsenicismo en la Región Lagunera, data desde 1955., atribuyendolo a la pérdida del equilibrio de los mantos acuíferos a consecuencia de una grave sequía que azotó la región entre los años de 1952 a 1958.

En 1963, se registra el primer estudio epidemiológico que demostró el impacto sobre la salud humana debido a la ingestión crónica del arsénico disuelto en el agua en el acuífero de la Región Lagunera.

Caballero, (1986) concluye que existe una fuente puntual de contaminación localizada en la zona norte en la Región Lagunera cercana a los municipios de San Pedro, Coahuila, Francisco I. Madero, Coah., y Tlahualilo, Durango.

Menciona también que la sobreexplotación del acuífero por sí mismo no es el factor principal de la magnitud del hidroarsenicismo basado en que las áreas de mayor sobreexplotación del acuífero , no son las de mayor contaminación arsenical.

Asimismo, confirmó , la existencia de una reserva de agua de buena calidad para consumo humano que se encuentra localizada en la parte baja de la zona conurbada al norte de la ciudad de Torreón , Coah., que es susceptible de ser explotado racionalmente.

Estadísticas de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos ( S.A.R.H. 1987 ) muestran que para los pozos clasificados con los números : 1467, 1000, 2745 y 1975 ubicados en los municipios de San Pedro, Coah., Francisco I. Madero, Coah., Tlahualilo, Durango y Matamoros, Coahuila. Se detectaron concentraciones desde 0.08 hasta 0.38 p.p.m., superando notablemente el nivel máximo permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud que es de 0.05 p.p.m.

Montemayor , (1988) citando informes del sector salud en los que se atribuye que el hidroarsenicismo se presenta en forma natural en el subsuelo del antiguo vaso de la Laguna de Mayrán. que se fué desagüando hasta desaparecer debido al escaso aporte pluvial, representando una mancha geológica no determinada y que abarca los municipios de San Pedro, Francisco I. Madero, y Matamoros , Coah. así como el de Tlahualilo, en el Estado de Durango.

Los estudios de mortalidad del mismo sector para el período comprendido en los años de 1970-1974 registraron una mayor frecuencia en las defunciones por cáncer en la mayoría de los municipios de la Región Lagunera; durante 1983-1984, otro estudio, reportó una tasa del 56 % de arsenicismo y 19 casos de cáncer epidermoide en los municipios de la región contaminados por este elemento, comparados con aquellas localidades que no presentaron problemas significativos de contaminación arsenical.

Remoción del arsénico.

Pontius, (1990) presenta una relación de eficiencias generales de los procesos convencionales en el tratamiento del agua para remover contaminantes, y se observa que los procesos más efectivos para remover el arsénico en estado de oxidación trivalente ó pentavalente, son los procesos de coagulación, sedimentación, y filtración así como intercambio iónico y los procesos de adsorción., incluyendo también los proceso de membrana.

Destaca entre ellos el tratamiento del agua mediante alumina activada que logra remover hasta un 99 % del arsénico contenido en el agua . Menciona que los costos y objetivos definirán el proceso más adecuado.

Mendoza y Gómez, (1974) citados por Montemayor (1988) investigaron la remoción del arsénico en el agua del acuífero de la Región Lagunera, mediante los procesos de coagulación química, utilizaron los compuestos de cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato de aluminio y el proceso de adsorción con alúmina activada , con el fin de evaluar eficiencias que sirvieran de base para el diseño y costo de una planta de tratamiento, y concluyeron lo siguiente :

- 1.- El arsénico de las aguas estudiadas , tienen una fracción en estado coloidal soluble, no filtrable.
- 2.- En las condiciones de operación establecidas, el coagulante sulfato férrico, es el más efectivo de todos los empleados.

- 3.- El coagulante sulfato de aluminio, no es efectivo para remover arsénico a pH natural de las aguas.
- 4.- El coagulante cloruro férrico, es efectivo, pero su costo lo hace impráctico para usarse en una planta a escala industrial.
- 5.- El proceso de adsorción de arsénico con alúmina activada es muy efectivo.
- 6.- Los resultados permiten tener bases para el diseño y operación de una planta de tratamiento a escala industrial.

Los mismos autores describen los procesos químicos y físicos que se han estudiado para remover arsénico de los cuales se concluye que :

La sedimentación simple tiene cierta eficiencia, pero con períodos de retención de más de 10 días.

- \* Los intercambios iónicos han dado buenos resultados, pero el proceso es costoso y su operación compleja.
  
- \* La filtración lenta en arenas es efectiva, pero las carreras de operación son cortas al disminuir la capacidad de adsorción del medio.
  
- \* La adsorción con carbón de hueso es efectiva, pero la recuperación del arsénico durante la regeneración del medio es baja, lo cual genera que el carbón se sature rápidamente. Además existen evidencias de que el arsénico, adsorbido provoca un cambio irreversible en la estructura básica del carbón.

Caballero, (1986) presenta en el cuadro 9, los resultados de los análisis físico-químicos del tratamiento del agua contaminada por arsénico, donde se utilizó el proceso de ósmosis inversa a escala piloto .

La planta fué instalada en el ejido colectivo de Batopilas , localidad de Francisco I. Madero, Coah; Se

observa una excelente remoción del arsénico, pero una agua producto prácticamente exenta de sales potencialmente inductora de riesgos cardiovasculares en el organismo humano.

Cuadro 9. Resultados de análisis físicoquímicos de agua, de la planta de ósmosis inversa con capacidad de 15 m<sup>3</sup>/día. Ubicada en el ejido colectivo de Batopilas, municipio de Francisco I. Madero, Coahuila.

(SEDUE hoy SEDESOL, 1986)

Caracteres físicos	Agua de alimentación	Agua producto
Temperatura ( °C )	28	29.
Conductividad (µmhos/cm.)	602	25.5
pH	8.17	7.14
-----		
Determinaciones ( p.p.m. )		
Dureza de Calcio (CaCO <sub>3</sub> )	35	5
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )	45	5
Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> )	10	no registra
Alcalinidad total (CaCO <sub>3</sub> )	97.5	7.5
-----		
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	45.2	7.5
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	113.0	17.7
Fluoruros (F <sup>-</sup> )	1.4	no registra
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	40.0	3.9
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> )	94.6	9.2
Carbonatos (CO <sub>3</sub> )	12.0	no registra
Calcio (Ca <sup>++</sup> )	14.0	2.0
Magnesio (Mg <sup>++</sup> )	2.4	no registra
ARSENICO (As)	0.441	no registra

Teorías propuestas para explicar el origen del arsénico en la Región Lagunera.

Flores Espinoza, (1990) menciona que estudios preliminares indican la presencia de tres zonas químicamente anómalas, siendo éstas las de Tlahualilo - San Pedro, El Coyote y el Vergel, todas caracterizadas por contener agua con un alto contenido de STD (sólidos totales disueltos) y en las dos primeras por elementos como As., Cu, Pb, y Zn. Las concentraciones de arsénico muy superiores (0.09 p.p.m.) al del valor permisible (0.05 p.p.m.).

El autor menciona también que indirectamente se ha reconocido la presencia de estratificación de aguas de mala y buena calidad como es el caso de la zona El Coyote donde existe una lengua o protuberancia de agua mala sobreyaciendo una sección con agua de mejor calidad, situación que también pudiera presentarse en las otras zonas.

Flores, (1992) describe y discute las diversas teorías planteadas para explicar la presencia del arsénico en el agua subterránea reconociendo la omisión de los aspectos sobre su expansión en el acuífero.



Entre las primeras teorías, se sostuvo que el arsénico estaba relacionado a los plaguicidas, insecticidas y herbicidas que se aplicaban en las áreas de cultivos agrícolas .

Entre los químicos que se aplicaron se cuenta el trióxido de arsénico, el arsenito de sodio y arsenato de plomo que fueron ampliamente utilizados en el período de los años 40's.

En acuerdo con esta teoría, las concentraciones más altas de arsénico deberían de estar en las zonas donde fueron aplicados, situación que no se presenta, por lo que esta posibilidad ha sido desechada, mencionando que la anomalía química del arsénico se presenta en la parte norte del acuífero en una franja bien definida desde Tlahualilo hasta San Pedro, Coahuila.

La zona de Mapimí, Dgo; y sus minerales fueron también propuestos como posible fuente de arsénico ( archivos de la Comisión Nacional del Agua C.N.A. y Ríos García en 1982 citados por Flores) aunque en los alrededores de esta zona se han detectado concentraciones de As., éstas son puntuales y no representan una anomalía.

Flores menciona que las dificultades con esta teoría son similares a la anterior ya que la anomalía del As., está localizada en el lado opuesto de la zona de Mapimí y aparentemente no tienen ninguna relación.

En la cuenca de captación del río Nazas existen diversas zonas mineralizadas, cuya erosión por los escurrimientos pluviales pudieran haber liberado sedimentos conteniendo As., que posteriormente fueron transportadas a la cuenca baja del Nazas y finalmente depositados en la cuenca aluvial que ahora constituye el acuífero principal.

Análisis químicos de sedimentos en la presa Francisco Zarco revelaron la existencia de altas concentraciones de As., y plomo pero en compuestos químicos considerados inmóviles y sin ningún impacto en el cuerpo adyacente de agua.

Esta información en conjunto generó la posibilidad de que el arsénico fuese de origen sedimentario, pero nuevamente, esta teoría entra en conflicto al considerarse que la anomalía de As., es una anomalía bien definida y restringida al área de Tlahualilo, Dgo. y San Pedro, Coahuila.

En acuerdo con esta teoría el arsénico se encontraría en los sedimentos del relleno aluvial y dado que los sedimentos se encuentran distribuidos en todo el valle, el arsénico también debería estarlo, situación que no se presenta.

La industria metalúrgica Peñoles S.A. procesa minerales metálicos conteniendo arsénico en diferentes compuestos , y cuyos desechos pudieran ser la fuente de contaminación. Esta industria , se localiza en la zona urbana de la ciudad de Torreón, Coahuila., en un área donde el acuífero subyacente contiene agua de la mejor calidad.

Flores menciona que esta teoría presenta problemas similares a las anteriores considerando la posición geográfica con respecto a la zona con anomalía en arsénico, definida en un extremo opuesto a la fuente de contaminación propuesta e indicando que una contaminación por vía aérea no es factible, porque los volúmenes requeridos de As., para producir las concentraciones y alcances observados deberían de ser muy grandes y además producirían una anomalía con distribución un tanto aleatoria y controlada por la variabilidad en la dirección de los vientos.

La sobreexplotación del acuífero a favorecido la creación de propuestas ára explicar el hidroarsenicismo , por ejemplo, que al profundizarse los niveles de bombeo se extrae agua de mayor profundidad y por consecuencia más contaminada, incluyendo arsénico.

Esta teoría presenta la incongruencia de que las zonas de mayor sobreexplotación . no son las más contaminadas por arsénico.

En estas zonas se ha detectado aunque indirectamente según Flores., la existencia de estratificación de aguas, como es el caso de aguas de mala calidad sobreyaciendo a una de mejor calidad., sin embargo es factible que con la perforación de pozos con más de 500 m., de profundidad se encuentren estratos acuíferos que puedan presentar empobrecimiento de la calidad del agua.

A partir de sus investigaciones. Flores (1992) establece la siguiente teoría:

" El agua con arsénico ocurre preferencialmente en el norte del acuífero con variaciones en concentraciones que producen una anomalía bien definida, formando un cinturón orientado NW-SE desde Tlahualilo, Dgo. hasta San Pedro , Coahuila."

El autor sustenta su teoría en los argumentos siguientes:

En general, la misma zona contiene agua con las más altas concentraciones de sólidos totales disueltos, Na,Ca,SO<sub>4</sub>,Pb,Zn. y con valores anormales de temperatura (de 30°C A 42°C). Adicionalmente, los derrames basálticos del cerro de Santiago y los conos volcánicos conocidos

como " Tetas de Juana" son evidencias de un sistema de fracturamiento y fallamiento orientado NW-SE coincidente con la orientación de la anomalía química de arsénico y por donde emanaron a la superficie los mencionados derrames.

Esta área también se caracteriza por presentar niveles freáticos someros ( de 10 m a 40 m ), los que han permanecido aparentemente estables a pesar de la formación de megadepresiones freáticas y fuertes descensos de los niveles de bombeo al sur de esta localidad.

Flores Espinoza, menciona que en base a las observaciones anteriores , el hidroarsenicismo, se explica a partir de agua antigua con tiempos de residencia bastante prolongados en el subsuelo, que ha interactuado con diferentes tipos de rocas y cuerpos volcánicos intrusivos a profundidad , adquiriendo de estos últimos elementos tóxicos como el As,Pb, Zn, y también los valores anormales de temperatura .

Esta agua interceptó el sistema de fracturamiento y fallamiento . por donde fluyeron los derrames basálticos y por donde también ascendió hasta niveles poco profundos y cercanos a la superficie del terreno.

Subsecuentemente, el agua ha permanecido en esta localidad probablemente desde la última etapa volcánica en la Región. Citando al Instituto de Tecnología del Agua, IMTA; IH9006 Dic. de 1990 ., Flores menciona que estudios sobre isótopos para datar e identificar tipos de agua han concluido que el arsénico tiene una asociación con procesos volcánicos y magmáticos y de acuerdo con los resultados de carbono catorce, un tiempo de residencia muy grande en el subsuelo. Ambos resultados son compatibles y avalan adicionalmente la teoría propuesta.

La otra parte del problema del hidroarsenicismo es su expansión , el que basandose en la teoría propuesta, se explica a través de la sobreexplotación del acuífero en la siguiente manera.

" El agua con arsénico ha estado en el norte del acuífero desde tiempos inmemorables y cuando el acuífero se encontraba en una fase de equilibrio, la sobreexplotación de las zonas al sur del área arsenical, generaron la profundización del nivel del agua (megadepresiones freáticas) y a su vez un gradiente hidráulico con la zona arsenical favoreciendo la migración del agua con arsénico hacia las zonas con megadepresiones y consecuentemente la expansión del problema".

El movimiento de esta agua representa una transferencia de un volumen de la zona arsenical a las zonas sobreexplotadas, más sin embargo los niveles del agua no han descendido significativamente, infiriéndose una retroalimentación por una fuente a profundidad.

Geología de la Región Lagunera.

López Ramos.(1978) citado por Mata *et. al.*, (1992) incluye a la Región Lagunera en la " Provincia Geológica de Coahuila " y la describe considerando la geomorfología y fisiografía.

Menciona que en base a la geomorfología de los accidentes topográficos aflorantes en la región, esta se ubica en las sigs. subprovincias:

- \* Coahuila (Península de Coahuila).
- \* Sierra de Torreón-Monterrey.  
(Sistema orogénico transverso).
- \* Cuenca de Parras.

La Península de Coahuila., se conformó por un complejo de rocas sedimentarias paleozoicas y rocas extrusivas e intrusivas. fuentes principales de aporte de sedimentos del final del Jurásico y principios del Cretácico.

Estuvo cubierta por mares de poca profundidad al finalizar el cretácico, que continuó formando una masa alta y estable, que durante la orogenia Laramide del principio del Terciario, sirvió como contrafuerte estructural a los esfuerzos a que permaneció sujeta.



Tectónicamente, se caracteriza por estructuras anticlinales amplias y suaves ( Sierras de la Campana, Tlahualilo y el Sobaco ), de forma cómica con presencia de fallas normales.

En los bordes oriental y sur de este elemento, se observa que a las formaciones calcáreas del Jurásico se acuñan y cambian lateralmente de facies, haciendose predominantemente clástica en las áreas circundantes de la Península.

#### Sistema Orogénico Transverso.

Se originó a consecuencia de los empujes de la Orogenia Laramide, que provenientes del sur y del oeste (de acuerdo con los plegamientos de las sierras) , en una dirección más o menos normal a las márgenes de la Península de Coahuila, comprimieron los sedimentos que llenaban el geosinclinal y formaron una serie de pliegues angostos y alargados.

La mayoría de estas estructuras quedaron orientadas paralelamente a las márgenes de la paleopenínsula de Coahuila, y sufrieron recostamiento hacia el norte y oriente, tal como se observa en el área; sin embargo, la deformación también generó estructuras en abanico, lo mismo que algunos recostamientos hacia el sur y oeste.

Como consecuencia de los plegamientos de la sierra Torreón- Monterrey, (Sistema Orogénico Transverso), desde fines del cretácico, inició la Formación de la Cuenca de Parras .

La Cuenca de Parras. está formada por numerosas estructuras individuales. generalmente orientadas noroeste-sureste y separadas por bolsones. que a menudo corresponden a fosas (grabenes).

Las crestas de las sierras más prominentes. tienen una altura que varía de 1500 a 2000 msnm. Además existen amplias y dilatadas llanuras intermontanas de suave ondulación, denominadas bolsones, donde se encuentran restos de antiguas depresiones, como las Lagunas de Mayrán y Viesca y valles azolvados .

Estratigrafía.

Diversos estudios de la Provincia de Coahuila y la perforación de pozos petroleros de exploración en ella, indican que la región cuenta con rocas que van de la era Paleozoica ( Pérmico ) hasta el Cuaternario, aunque las primeras no afloran en el área de interés.

La secuencia cronoestratigráfica, de la más antigua a la más moderna es la siguiente :

Paleozoico ( 290 a 230 millones de años ).

Las rocas de este eratema se encuentran aflorando a 5 Km., al noroeste del anticlinal de Jimulco y al suroeste de la Laguna Seca.

En base a las investigaciones del Instituto de Geología de la UNAM., la formación Rodeo fue originada por la erosión de rocas ígneas, cuyo ambiente de depósito fue posiblemente fluvial en condiciones semiáridas.

Posteriormente a este depósito, se verificó una orogenia que motivó un metamorfismo regional de bajo grado , dando por resultado la filita y el conglomerado cuarcífero. El espesor estimado de esta unidad es de aproximadamente 2400 metros.

Triásico (230 a 180 millones de años).

Representado por la formación Nazas y se halla conformado por una secuencia de lavas interestratificadas con tobas, lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados de color rojizo.

Aflora en las cercanías del poblado cinco de Mayo, al sur del cerro Redondo y en el núcleo del anticlinorio de Villa Juarez.Dgo., su espesor es del orden de los 100 m.

Jurásico ( 180 a 130 millones de años ).

Las rocas de este sistema que afloran en la región, incluyen la formación La Gloria; La Caliza Zuloaga; y La formación la Casita.

Se encuentra distribuido en el flanco occidental de la sierra de Mapimí y en el oriental de la sierra del Rosario, así como en las estribaciones occidentales de la sierras El Chocolate y Villa Juárez.

Formación La Gloria.

Está caracterizada por areniscas y conglomerados, aunque consiste principalmente de calizas en capas gruesas a medianas.

En el levantamiento de Villa Juárez al suroeste de Ciudad Lerdo, Dgo., consiste principalmente de areniscas y conglomerados.

Por su distribución paleográfica, composición y contenido de gasterópodos y abundantes fragmentos de conchas, indican que fué depositada en aguas someras.

Asimismo, por estos fósiles se considera a esta Formación como del Oxfordiano. Su espesor es de aproximadamente 500 metros.

Caliza Zuloaga.

Constituida por calizas arenosas de color gris amarillento. El contacto superior con la formación la Casita es concordante, mientras que el inferior es discordante sobre los lechos rojos de la formación Nazas.

Por su disposición estratigráfica, se le ha asignado una edad oxfordiano tardía, y es el equivalente extralitoral de la formación La Gloria.

Considerando la fauna encontrada y por su litología se infiere que el depósito de esta formación se llevó a cabo en aguas tibias de poca profundidad.

(ambiente de plataforma).. su espesor se estima en 700 metros.

Formación La Casita.

Mata Arellano y *et. al*:(1992) citando a Imlay (1936) mencionan que este nombre fué asignado para sedimentos de aguas someras del Jurásico superior que afloran al sur de Viesca, Coahuila., esta unidad se encuentra constituida en su parte inferior por areniscas interestratificadas con lutitas. la porción media, por lutitas fósiles con intercalaciones de laminillas de yeso y consiste de lutitas con amonitas y nódulos calcáreos interestratificadas con calizas arcillosas.

Está infrayaciendo concordantemente, por la Caliza Zuloaga y de la misma manera suprayacida por la formación Taraises.

La formación La Casita, de acuerdo con su posición estratigráfica y su contenido de fauna, se le asigna una edad Kimmerdigiano-Tithoniano, asimismo, se infiere que sus sedimentos se originaron en aguas cercanas a la costa (facies infralitorales), y que la secuencia estratigráfica de areniscas en la base y lutitas en la parte media y superior puede indicar una fase transgresiva local.

Cretácico ( 130 a 70 millones de años ).

Estudios de varios autores sobre el cretácico de México , han demostrado la existencia de varias series estratigráficas en el norte de México. El Cretácico inferior en el área de estudio, está representado por las series:

Coahuiliana: constituida por las formaciones Carbonera, Taraises, Las Vigas y Parritas; y la serie Comancheana, integrada por las formaciones La Peña, Aurora y Cuesta del Cura.

El Cretácico superior, de distribución muy restringida en comparación con el inferior, está representado por las formaciones Indidura y Caracol.

Serie Coahuiliana.

\* Formación Carbonera; Es una unidad de lutitas arenosas interestratificadas con areniscas arcillosas de aproximadamente 180 metros de espesor.

\* Formación Taraises; Está conformada por calizas de 150 metros de espesor.

\* Formación Las Vigas; Esta constituida por 600 metros de caliza arenosa, arenisca y lutita.

\* Formación Parritas; Constituida por 340 metros de caliza en estratos delgados a gruesos.

El Instituto de Geología de la UNAM, caracteriza la serie Coahuiliana por cambios laterales y verticales de litofacies, cambiando abruptamente su color, espesor y composición a lo largo del rumbo. La edad de la serie Coahuiliana se considera desde el Neocomiano Berrasiano hasta el aptiano medio.

Serie Comancheana.

\* Formación La Peña. Está constituida en su parte inferior por calizas y en la parte superior por lutitas y caliza. Su litología y fauna de amonitas, sugieren un depósito de aguas de mediana profundidad. Asimismo, su contenido de fósiles, indica que puede representar todo el aptiano y el albiano inferior.

\* Formación Aurora. Conformado por Calizas, esta unidad por su fauna y posición estratigráfica, pertenece a una facie arrecifal cuya edad puede abarcar el albiano inferior y medio. Esta Formación aflora en las sierras de Jimulco, Boca de Alamos, Hispana, San Carlos y Las Noas; así como en la sierra de Mapimí, en donde esta unidad se encuentra intrusionada por las rocas graníticas que edifican el cerro del Sarnoso.

\* Formación Cuesta del Cura. Conformada por calizas delgadas ondulantes con bandas de pedernal negro que afloran a 6.5 Km., al poniente de Parras, Coahuila.. El estudio de su microfauna corresponde a una edad del albiano-cenomaniano.



\* Formación Indidura. Consiste principalmente de lutitas y capas delgadas de caliza debido a su delesnabilidad, esta formación motiva puertos y valles sobre los sinclinales.

En cuanto a su edad, se restringe del Cenomaniano Superior al Turoniano Superior. Esta Formación se depositó en aguas someras de escasa circulación y baja energía, debido al contenido de lutitas negras y presencia de yeso y limolitas en algunos de sus miembros.

\* Formación Caracol. Está constituida por una sucesión de areniscas y lutitas, y aflora en la porción norte de la zona. Su espesor no se ha medido debido a su compleja estructura y a la ausencia de horizontes de referencia.

Tentativamente se le estima una edad Conaciano-Santoniano.

Terciario Continental ( 70 a 1 millón de años ).

\* Se caracteriza por la presencia de rocas ígneas intrusivas. Están representadas por diques, lacolitos, diquestratos y troncos. Estos cuerpos intrusivos varían en tamaño, hasta llegar a alcanzar hasta 10 Km., de diámetro, entre estos últimos sobresale El cerro del

Sarnoso, el cual es un afloramiento granítico circular que abarca unos 75 Km<sup>2</sup>. La composición puede variar también a diorita y adamelita.

\* Formación Ahuichila. Consiste de dos miembros: el inferior constituido por material tobáceo y arenisca poco consolidada, interestratificada con capas delgadas de yeso; El superior representado por un conglomerado bien cementado, compuesto por clastos submaduros de caliza, Pedernal y rocas Volcánicas

Esta Formación se encuentra ampliamente distribuida en el área, principalmente en los flancos de las Sierras, con espesores de hasta 160 metros. Tentativamente se le asigna una edad del eoceno tardío-oligoceno temprano.

\* Rocas Igneas Extrusivas. Se observan como derrames de lava de composición Basáltica, formando Cerros como el Santiago y Conos Volcánicos como " Las Tetas de Juana ".

Cuaternario ( 1 millón de años a la fecha ).

Como consecuencia de los procesos exógenos (erosión-intemperismo), este sistema cuenta con depósitos aluvio-lacustres que colman a valles y boisones, se estima que en la Región Lagunera, los depósitos son de: Piamonte; caracterizados por una línea de abanicos aluviales convergentes, baja de la cara disectada de las sierras.

Estos depósitos son quizá de reducido espesor y consisten de fragmentos casi consolidados e intemperizados, principalmente, de las formaciones del Cretácico Superior.

El tamaño de los fragmentos varía significativamente. El tamaño máximo decrece constantemente al alejarse de las montañas. Se clasifican desde grandes clastos a las faldas de la montaña , hasta arcillas en las partes más alejadas a ellas.

Se estima también que los depósitos de la Región Lagunera, sean de llanuras de inundación. En el otro extremo, desde los cortos torrentes montañosos que desembocan en abanicos aluviales de Piamonte, se encuentran los depósitos de los ríos Nazas y Aguanaval.

El primer dato importante acerca de estos depósitos es que se diferencian los del cauce del río, con que aquellos que se encuentran más lejos en la llanura de inundación.

En general los clastos más gruesos se encuentran en el fondo de los antiguos cauces y la gradación tiende a disminuir fuera de ellos , aunque en avenidas extraordinarias, tendieron a una reclasificación.

Lejos de los cauces, el resto de la llanura de inundación , por un movimiento lento del agua , sólo está conformado por limo y arcilla, considerando que el clima era muy árido, y las evaporaciones muy altas, el carbonato de calcio se acumuló en la superficie como caliche.

Depósitos en Lagunas secas.

Los sedimentos de estos ambientes, fueron materiales de acarreo de baja energía, llevados através de los cauces de los ríos citados y depositados en las partes más bajas de las cuencas.

El material dietritico es principalmente limo y Arcilla y mezclas o capas finas de sales originalmente disueltas en el agua de inundación. Los depósitos en estos ambientes están normalmente bien estratificados en delgadas capas continuas.

## Acuíferos de la Región Lagunera.

Considerando la estratigrafía descrita anteriormente, se identifican dos tipos de acuíferos en la Región Lagunera:

Acuíferos en Calizas.

Acuífero Aluvial o Granular.

### Acuíferos en Calizas.

Chávez Guillén (1989), menciona que las calizas acuíferas están ampliamente distribuidas en la porción oriental de la República Mexicana y forman parte importante de las estructuras de la sierra madre oriental.

Se extienden en una gran superficie y su espesor llega a ser de varios cientos de metros ; su estructura suele ser compleja, y generalmente sólo presentan condiciones geohidrológicas favorables en las zonas arrecifales; fallas y cambios de facies, rompen su continuidad, dando lugar a sistemas acuíferos relativamente independientes entre sí, algunos de ellos de reducida extensión.

Sus características hidráulicas secundarias, asociadas con fracturas y conductos de disolución, son muy favorables para la captación de agua subterránea:

Su alta transmisividad se traduce en pozos de caudal y rendimientos elevados. Sin embargo, debido a la errática distribución de fracturas y conductos, no es raro encontrar pozos de alta producción muy próximos a otros secos o de bajo rendimiento.

Fuera de las áreas donde afloran, las calizas acuíferas están confinadas por formaciones de gran espesor y permeabilidad muy pobre; en estas condiciones el valor de su coeficiente de almacenamiento es sumamente bajo. A la combinación de tales características se deben:

La inmediata respuesta de los niveles piezométricos a la recarga, la respuesta rápida a los efectos del bombeo y la gran magnitud de las fluctuaciones piezométricas provocadas por ambas causas.

La recarga de las calizas acuíferas tiene lugar por infiltración de la lluvia y del escurrimiento superficial en las estructuras donde afloran; su descarga natural, a lo largo de los cauces que cortan las estructuras ó a través de manantiales.

El agua subterránea circula de las áreas de recarga a las de descarga, siguiendo trayectorias tortuosas determinadas por la distribución de fracturas y conductos, por la estructura geológica y por la posición de los niveles base de descarga.

Localmente, la configuración topográfica y la distribución piezométrica, se combinan para producir manifestaciones espectaculares de artesianismo: hay pozos que brotan temporalmente con cargas hidráulicas de algunos metros sobre la superficie del terreno.

Acuíferos Aluviales ó Granulares.

Materiales aluviales, ampliamente expuestos en las partes bajas de las cuencas, forman los acuíferos más jóvenes :



Estratos de grava y arena, de geometría irregular y granulometría variada, interdigitados con lentes de limos y arcillas.

En las regiones donde predominan los acuíferos antes descritos, el aluvión forma sólo la parte superior de los recipientes subterráneos: por el contrario, forma la mayor parte del relleno en los valles fluviales y planicies costeras enclavadas en la porción occidental del país, donde su espesor alcanza valores de decenas a centenas de metros .

Granulometría y grado de compactación controlan las características hidráulicas de estos acuíferos:

Los de grano grueso son los más favorables en cuanto a su permeabilidad y rendimiento específico, mientras que los de grano fino se comportan como acuitardos muy porosos y poco permeables que ceden importantes cantidades de agua a los acuíferos adyacentes.

Por ser los acuíferos más someros y los de más amplia distribución superficial, su oportunidad de recarga es mayor; son renovados en forma natural y reciben abundante alimentación inducida por el desarrollo, especialmente el agrícola.

Su descarga natural tiene lugar por evapotranspiración , a través de manantiales y a lo largo de cauces colectores.

Perforaciones y pruebas de bombeo realizados en este tipo de acuíferos (en la Región Lagunera por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1977,1979 y 1986).., se determinó que:

Los depósitos de cauce (grava y arena), tienen una transmisividad (T) de  $0.007 \text{ m}^2/\text{s}.$ , y un coeficiente (S) de almacenamiento (rendimiento específico) inferido de 0.01

Los depósitos de llanura de inundación ( Arena, Limo y Arcilla ) presentan una transmisividad de  $0.0005 \text{ m}^2/\text{s}.$  y un coeficiente de almacenamiento, también inferido , de 0.05

De esta manera, el desplazamiento del agua en este acuífero, y en particular su velocidad y dirección, dependerá de las diferencias en la presión en que se encuentra sometida el agua en cada punto, de los parámetros hidrológicos de los sedimentos y de la densidad de sus salidas.

Un estudio realizado para la S.A.R.H., en la Región Lagunera en 1977 por la Empresa Técnicas Modernas S.A., concluye que:

La recarga principal del acuífero granular es el resultado de la infiltración de agua de los Ríos Nazas y Aguanaval y de los retornos de riego originados de estos mismos ríos.

Dentro de las rocas calcáreas que constituyen las sierras, el horizonte conocido como formación Aurora, contiene un acuífero que casi no es explotado.

Existen evidencias desde un punto de vista hidrológico, geológico y geoquímico de que el acuífero en caliza y el acuífero aluvial o granular, se encuentran comunicados.

En otro estudio desarrollado en 1979, y realizado por el personal de la S.A.R.H., en la Región en colaboración con el Organismo Internacional de Energía Atómica.. definen dos tipos de aguas :

Uno proveniente de la Cuenca del Río Nazas y otro de la Cuenca del Río Aguanaval.

Determinaron que el acuífero calizo corresponde a un agua de lluvia de recarga reciente, no evaporada y con un bajo contenido salino.

Concluyeron también que las aguas de los rellenos, corresponden a una agua infiltrada hace más de 40 años, y que está parcialmente evaporada y con un alto contenido salino.

Detectaron un cambio gradual en las características químicas e isotópicas del acuífero calizo al de rellenos, concluyen que existe interconexión entre ambos.

En base a otro estudio geohidrológico desarrollado por la SARH., en 1986 concluye que :

La recarga del acuífero granular es menor que la tercera parte de la explotación.

El abatimiento medio Regional es de 1.5 m por año.

El ritmo de extracción disminuyó a partir de 1978.

## MATERIALES Y METODOS

### Localización del área de estudio.

Geográficamente, la zona en estudio está ubicada en la parte septentrional de la República Mexicana y ocupa las porciones suroeste del Estado de Coahuila y noreste del Estado de Durango. (fig. 6)

Esta región se localiza entre los paralelos  $25^{\circ} 15' 00''$  y  $26^{\circ} 15' 00''$  de latitud norte y entre los meridianos  $102^{\circ} 40' 00''$  Y  $104^{\circ} 00' 00''$  al oeste de Greenwich.

Cuenta con una extensión territorial de 54,967.5 Km<sup>2</sup>., conformada por un área montañosa y una superficie plana donde se localizan los predios agrícolas y pecuarios , así como los sectores urbanos.

La población estimada por el censo de 1990 para el año de 1992 es de 1.260,063 habitantes.

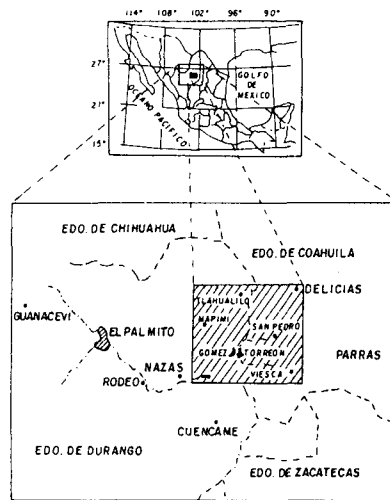


Figura 6.- Localización de la Región Lagunero

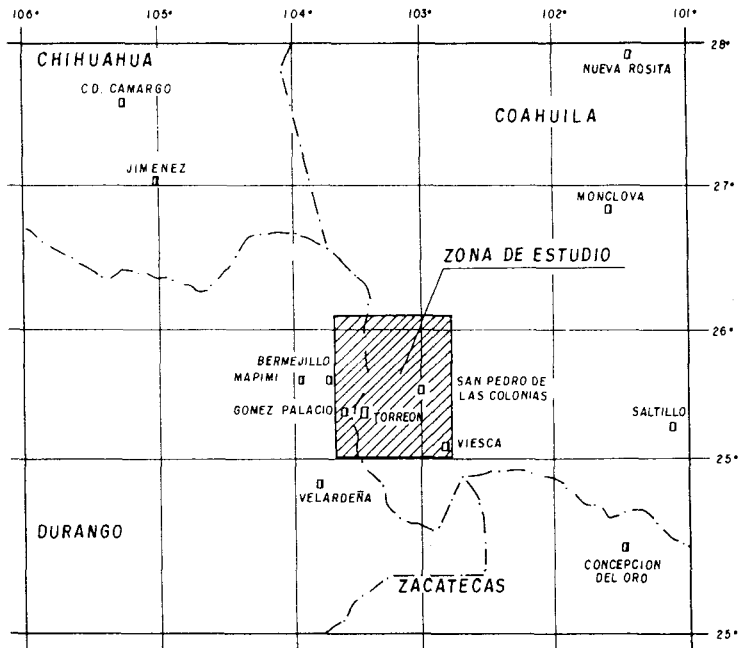


Fig. 7. PLANO DE LOCALIZACION REGION LAGUNERA

### Orografía.

En general , el área se encuentra ubicada dentro de una superficie con lomeríos cuya altura varía de 1140 a 1325 msnm.,alcanzando 2100 m la altura máxima de las principales serranías , dentro de las cuales las más importantes son : Las sierras de la Cadena, de Nazas, de la Campana, la Bandera, la Candelaria y sierra Mojada.

### Suelos.

Los suelos de la Región Lagunera iniciaron su formación en la última etapa del periodo terciario mediante el relleno de oquedades que se desecaron , ocurriendo este con los acarreos sucesivos de los ríos exceptuando en su origen pequeñas fajas de suelo paralelas a las serranías que rodean a la región, ya que estos son suelos calcáreos con alto contenido de carbonatos de calcio.

Dentro de los grandes grupos de suelos del mundo, los de la región se clasifican como *Sierozem*, presentando las siguientes características :

- \* Predominan las texturas pesadas y medias.
- \* Son pobres en Nitrógeno y materia orgánica.
- \* Tienen estructura dispersa y deteriorada.
- \* Ricos en Potasio y Calcio, pobres en Fierro y Manganeseo.
- \* Su reacción es alcalina.

#### Climatología.

El clima de la región , de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Garcia, (1973) para la República Mexicana es de tipo BW hw (e').., que representa un clima seco con lluvias de verano e invierno, pero escasas durante todo el año.

#### Temperatura.

La temperatura media anual observada através de 40 años (1941-1981) es de 20.7°C.

Asimismo, el promedio de las temperaturas máximas y mínimas es de 29.6°C y 4.8°C respectivamente.

Los meses calurosos son de abril a agosto, aunque en éste último empieza a descender la temperatura ligeramente.



### Precipitación.

Debido a que en la región las lluvias son escasas, existe déficits de humedad en la atmósfera, siendo la precipitación media anual en el período 1941-1981 de 241.4 mm., variando de 77.8 mm., en el año más seco (1954), a 434.8 mm., en el más húmedo (1958).

La distribución de las lluvias en la región es muy similar durante el período analizado, ocurriendo entre los meses de junio a octubre.

### Hidrología.

Los recursos hidrológicos de la región, son los ríos Nazas y Aguanaval, escurrimientos menores y los del subsuelos.

El Río Nazas tiene una longitud de 220 Km. y su nacimiento ocurre a 2 Km., aguas abajo, de la confluencia de los Ríos Oro y Ramos en el municipio de Independencia Durango., y muere en la Laguna de Mayrán, dentro del municipio de San Pedro, Coahuila.

Sobre el mismo se encuentran dos presas: Una almacenadora ( Lázaro Cárdenas ) y otra reguladora ( Francisco Zarco ). El escurrimiento medio anual es de 892,367 000 m<sup>3</sup>.

## METODOLOGIA

Determinación de la(s).

- \* Variabilidad espacial del hidroarsenicismo.
- \* Fuentes principales de arsénico en la Región Lagunera.

Para la consecución de los objetivos anteriores se utilizó el método de " KRIGING " y como base de datos los análisis e interpretación de los resultados físicoquímicos de 96 sitios de muestreo de aguas subterráneas para diferentes usos en la Región Lagunera, registrados en el cuadro A3 del anexo.

Estos resultados fueron determinados mediante el método de espectrofotometría de absorción atómica en el Centro Cerro Prieto del Instituto de Investigaciones Eléctricas y certificados mediante muestras previamente calibradas por la Subcoordinación de Calidad del Agua del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, estos resultados, al igual que los niveles piezométricos, fueron cedidos al autor para el desarrollo del presente trabajo.

La distribución de los pozos profundos muestreados en la Región Lagunera, se muestran en la fig. No. 8

Con el objeto de localizar cada uno de los pozos, se diseñó un sistema de ejes coordenados rectangulares sobre el plano de distribución de pozos.

Descripción general del método " KRIGING ".

El método de Kriging consiste en realizar interpolaciones lineales e insesgadas con varianza mínima, para generar una cuadrícula regular con valores estimados de la variable en estudio ( As. para este caso) a partir de valores muestrales distribuidos irregularmente sobre el espacio físico considerado (Región Lagunera).

El estimador de Kriging es el siguiente:

$$Z^* (X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z (X_i)$$

Donde:

$Z^* (X_0)$  = Valor estimado.

$N$  = Número de datos utilizados en la estimación.

$\lambda_i$  = Ponderación.

$Z (X_i)$  = Valores de las variables.

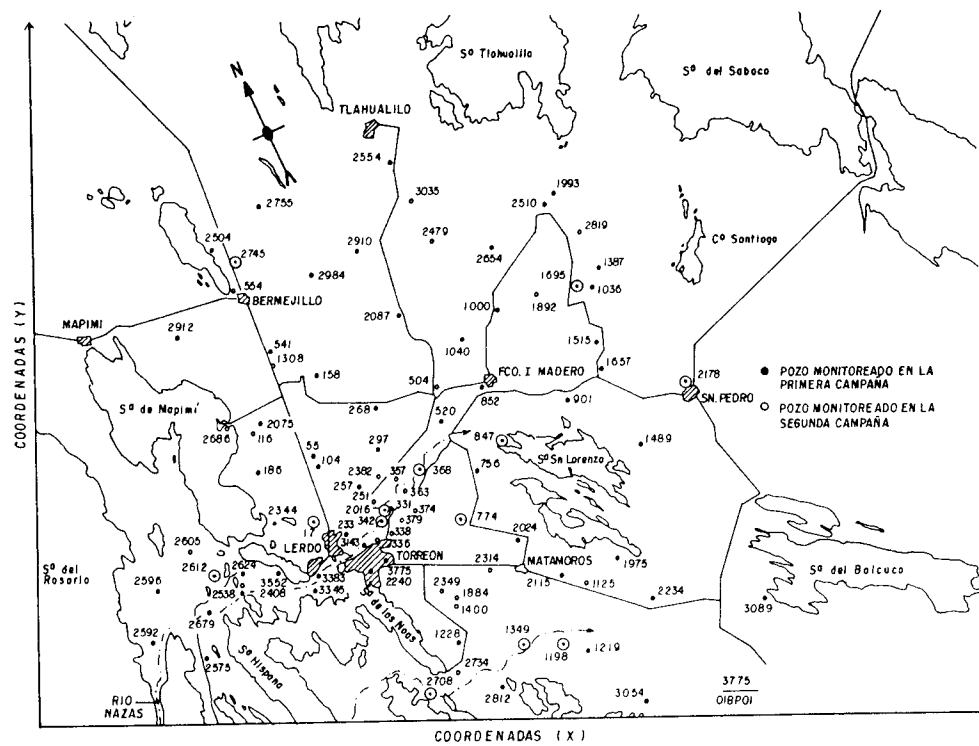


Figura 8 - Localización de pozos muestreados en la Región Lagunera

Las ponderaciones  $\lambda_i$  se calculan bajo las restricciones siguientes:

1) El estimador debe de ser insesgado.

$$E [ Z (X_0) - Z^* (X_0) ] = 0$$

Donde:

$Z(X_0)$  = Valor real de la variable.

$Z^* (X_0)$  = Valor estimado.

Cuando se cumple con esta restricción, se eliminan los errores sistemáticos de estimación y para satisfacer la condición anterior es necesario que :

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad \text{ó} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i - 1 = 0$$

2) La varianza del error debe de ser mínima.

$$E = [ Z(X_0) - Z^* (X_0) ]^2 \quad \text{es mínima}$$

La concentración estimada de la variable arsénico, en un sitio no muestreado, fué la resultante de la combinación lineal de las concentraciones medidas más próximas al sitio de estimación (Cooper e Istock 1988).

Se seleccionó el método de Kriging , para generar una cuadrícula regular con valores estimados de la variable (Z)= [As mg/l] a partir de valores muestrales distribuidos irregularmente sobre el espacio de la Región Lagunera, lo que con otros métodos de interpolación lineal no hubiese sido posible ya que estos se restringen a puntos muestrales distribuidos regularmente en una cuadrícula.

Con objeto de automatizar el uso de la metodología Kriging, se utilizó el software computacional denominado " SURFER " editado por la Golden Software, Inc., de Golden Colorado (EUA). El Surfer está constituido por cuatro programas que son:

GRID.EXE : TOPO.EXE ; SURF.EXE y PLOT.EXE

Estos programas fueron utilizados en este mismo orden en una computadora personal IBM PS/1, Modelo H - 82 , procesador 386 SX de 33 MHz con disco duro de 80 Mb y 2 Mb en RAM.

## GRID.EXE

Mediante la utilización de GRID.EXE , y previo al establecimiento de un eje coordenado rectangular sobre el plano de distribución de pozos seleccionados, con escala 1 : 560,000 se concentraron en una hoja de cálculo las dimensiones :

Coordenada X , Coordenada Y y por último la Coordenada Z que representó la concentración de arsénico y que fueron obtenidos de los resultados del cuadro A3 del anexo, distribuidos irregularmente sobre el dominio.

El programa GRID.EXE integra el uso del método Kriging para generar en principio la cuadrícula regular necesaria para el gráfico de isolíneas. El GRID.EXE mediante Kriging, interpola un valor de Z en la intersección de cada columna e hilera .

Ya con la cuadrícula espaciada regularmente mediante el programa GRID.EXE del SURFER., se utilizaron el resto de los programas obteniendo como producto a :

TOPO.EXE -----> Configuración espacial del  
  hidroarsenicismo bidimensionalmente.

SURF.EXE -----> Configuración espacial del  
  hidroarsenicismo tridimensionalmente.

PLOT.EXE -----> Graficar las configuraciones  
  resultantes.

Las configuraciones resultantes, fueron analizadas e interpretadas conjuntamente con información relativa a:

- \* Características geológicas de la Región Lagunera.
- \* Niveles piezométricos de los pozos seleccionados.
- \* Resultados físicoquímicos del agua de los pozos.
- \* Actividades principales en los sitios más contaminados.
- \* Información isotópica del acuífero Regional.
- \* Literatura revisada.



Determinación del efecto de la acumulación del arsénico en el sistema agua - suelo - planta en relación directa con la irrigación agrícola que contiene valores anómalos de arsénico.

Se realizó un muestreo de suelo , planta y producto únicamente para los sitios que resultaron con máxima concentración de arsénico en el agua subterránea utilizada en la irrigación agrícola y que se registran en el cuadro A3 del anexo.

Las determinaciones del arsénico en las diferentes muestras se realizó utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin - Elmer modelo 460, con sistema de hidruros MHS- 10 y registrador de carte modelo 056, como gas acarreador se usó nitrógeno de alta pureza.

Las determinaciones fueron hechas en el laboratorio Industrial Metalúrgico de la ciudad de Gómez Palacio, Dgo., siguiendo los procedimientos descritos por el manual correspondiente al equipo Perkin-Elmer utilizado .

Suelos.

Se seleccionaron tres sitios de muestreo ubicados en el Ejido Providencia del Norte, localidad del Municipio de Francisco I. Madero Coahuila ; Bermejillo Durango y el predio "Las Margaritas" ubicado en el Municipio de Viesca Coahuila.

De acuerdo con los resultados del cuadro A3 del anexo, estos fueron los sitios de máxima concentración de arsenico en el agua subterránea.

El muestreo de suelos fué en la porción media de las superficies agrícolas, de forma aleatoria y a una profundidad de 0 - 60 cms., mediante el uso de una barrena de caja tipo California.

Las muestras de suelos fueron debidamente identificadas y posteriormente secadas al aire para el proceso de homogeneizarlas y tamizarlas para su análisis químico en el laboratorio mediante técnicas de espectofotometría de absorción atómica.

El análisis se realizó exclusivamente para el elemento arsénico expresado como total y extractable.

Planta.

Se muestreó exclusivamente el cultivo de la Alfalfa (*Medicago sativa* L. ) en los mismos sitios del muestreo de suelos.

Por experiencias regionales se conoce que la alfalfa es un cultivo eminentemente selectivo por el ganado lechero debido a sus características bromatológicas que elevan su valor forrajero en la producción láctea , además, se seleccionó el cultivo de la alfalfa porque es el forraje que mayor demanda de agua requiere para su desarrollo (1.7 m<sup>3</sup>/año) y al que mayor superficie se le destina en la Región ( 60-70,000 Has.) irrigada en un 90 % con agua subterránea.

Las muestras fueron cortadas al 10 % de floración, tal y como se ofrece al ganado., fueron lavadas para posteriormente realizar una digestión húmeda a base de ácido nítrico y perclórico y analizado mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Producto.

El producto seleccionado fué la leche procedente de los establos que alimentaron al ganado lechero con la alfalfa sembrada en suelos irrigados con agua subterránea y que contenían valores máximos de arsénico de acuerdo con el cuadro A3 del anexo.

Se seleccionó el ganado Holstein que es típico de las explotaciones lecheras de la Región, muestreando en un galón de plástico, selectivamente animales que fuesen de una edad entre 5-7 años y de entre 3 y 5 partos con una producción láctea promedio estadística de 25 - 30 litros por día.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Variabilidad Espacial del Hidroarsenicismo en la Región Lagunera.

Con los resultados de los analisis fisicoquimicos del agua subterránea del acuífero regional, registrados en el cuadro A3 del anexo, se construyeron las figuras que se describen a continuación.

En la figura No. 9 se configura tridimensionalmente a escala 1:560.000 la distribución del hidroarsenicismo en la Región Lagunera.

Por simple inspección se detectan tres áreas con elevaciones muy pronunciadas que exceden significativamente la concentración máxima permisible que es de 0.05 mg/l en agua potable para consumo humano y de 0.1 mg/l en agua para irrigación agrícola.

Considerando la magnitud espacial de la contaminación del agua subterránea por arsénico observadas en la figura anterior, las tres áreas de mayor contaminación detectadas, se localizan e identifican para un análisis y discusión detallada como :

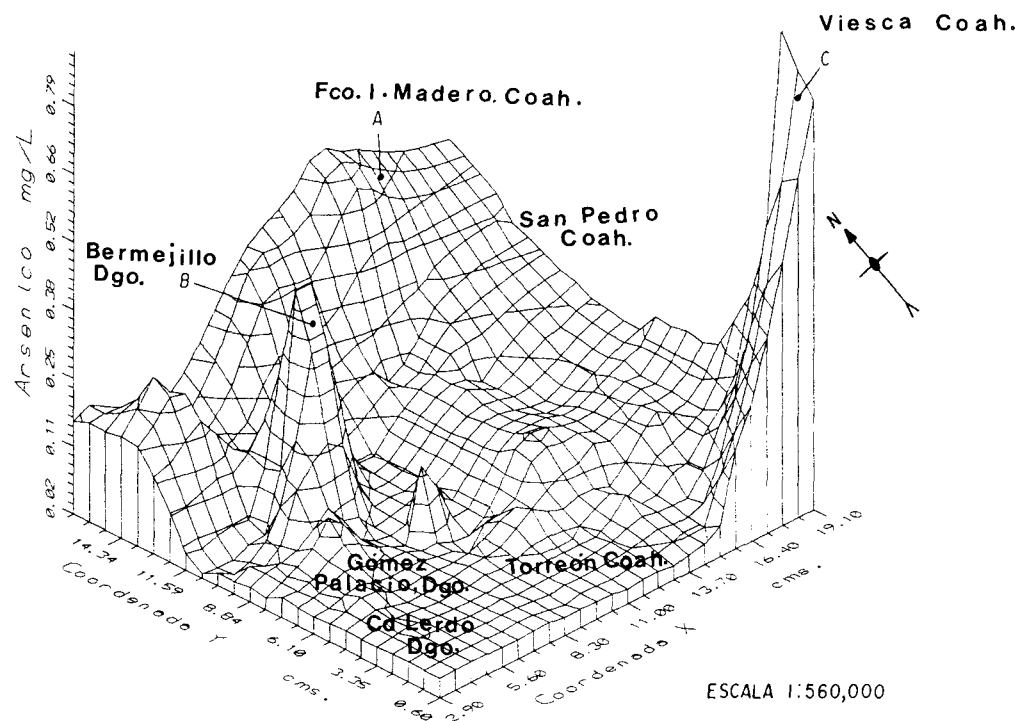


Fig. 9 HIDROARSENICISMO EN LA REGION LAGUNERA

## Area A :

Esta area, se localiza al noreste de la Región y comprende los municipios de San Pedro Coahuila, Francisco I. Madero Coahuila y Tlahualilo Durango.

## Area B :

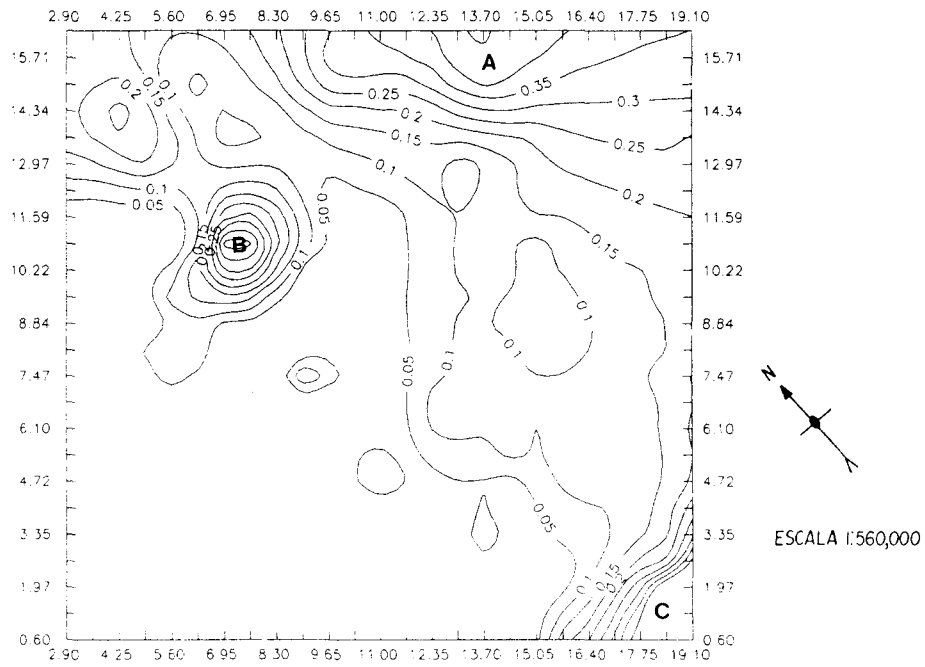
Esta área, se localiza al noroeste y constituida como punto de referencia, por los municipios de Mapimí Durango y Bermejillo Durango.

## Area C :

Esta área, se localiza al sureste y se integra por los municipios de Matamoros Coahuila y Viesca Coahuila.

Para determinar las posibles direcciones o tendencias de la contaminación por arsénico en el agua para diferentes usos, se realizó una interpolación lineal utilizando el metodo de Kriging puntual.

El plano configurado a escala 1 : 560,000 que indica la tendencia de las líneas de isoconcentración de arsénico se muestran en la figura No.10 donde observando de planta , se confirma la existencia de las tres áreas con valores anómalos de arsénico.



**Fig. 10** - ISOCONCENTRACIONES DE ARSENICO EN EL AGUA  
( mg/L )



El análisis de las líneas de isoconcentración de arsénico, para cada una de las áreas indica que para el :

Area A.-

Las líneas de isoconcentración de arsénico, tienden a incrementarse en dirección norte respecto a los municipios de Tlahualilo Durango y Francisco I. Madero Coahuila, alcanzando sus máximos valores en este último municipio.

Area B.-

Las líneas de isoconcentración de arsénico, tienden a incrementarse de afuera hacia adentro de manera concéntrica cerrándose en el municipio de Bermejillo Durango.

Area C.-

Las líneas de isoconcentración de arsénico, se estima ( debido a los límites de escala y No. de muestras ) que tienden a incrementarse de afuera hacia adentro concéntricamente sobre el municipio de Viesca Coahuila.

Para precisar las fuentes de contaminación por arsénico, se analiza una serie de información relativa al problema., en primer lugar las figuras No. 11 y 12 , que configuran la profundidad al nivel estatico y la elevación del mismo respectivamente.

Las configuraciones de las profundidades a los niveles estáticos indican la existencia de tres conos piezométricos localizables al :

- 1.- Noreste de Francisco I. Madero Coahuila.
- 2.- Noreste de Torreón Coahuila.
- 3.- Sureste de Matamoros Coahuila.

La ubicación de estos tres conos, coinciden con las áreas de mayor densidad de pozos profundos en operación.

El cono piezométrico de mayor magnitud que sugiere una mayor sobreexplotación del acuífero es el No. 3 que se ubica al sureste de Matamoros Coahuila., de lo que se infiere y confirma lo expuesto por Caballero y Enríquez (1986) así como Flores (1992) de que las áreas de mayor sobreexplotación no coinciden con las áreas de mayor contaminación por arsénico en el agua.

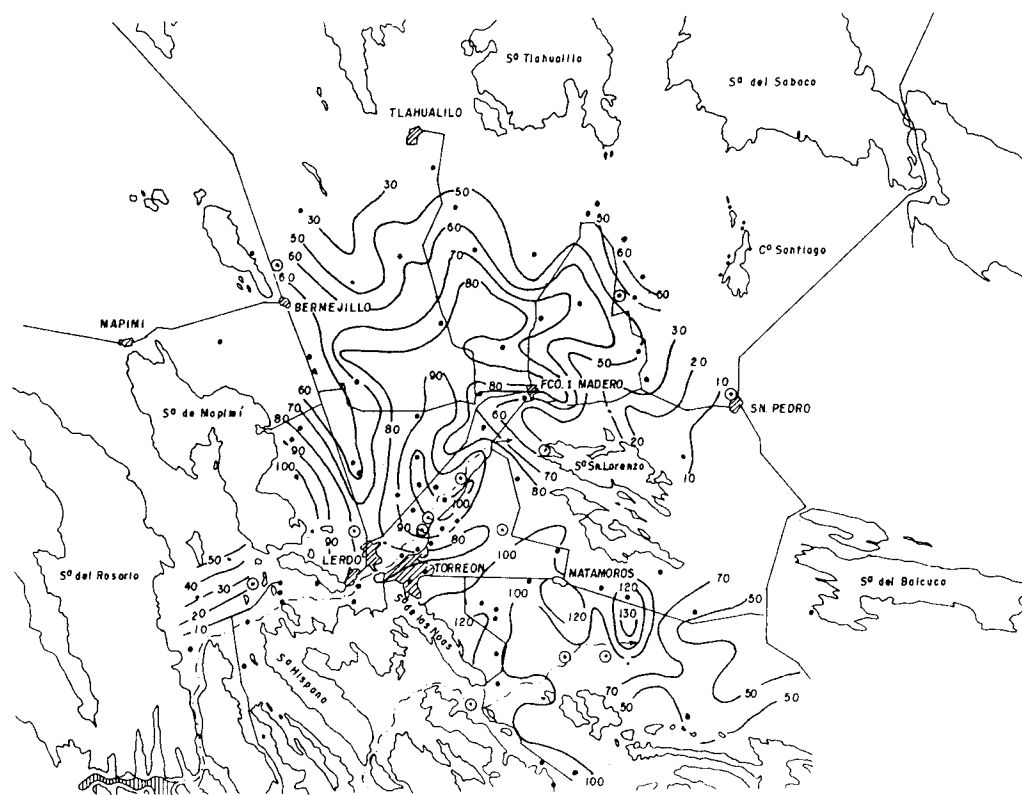


Figura 11 .- Profundidad al nivel estático ( Dic-1990) en la Región Lagunera.

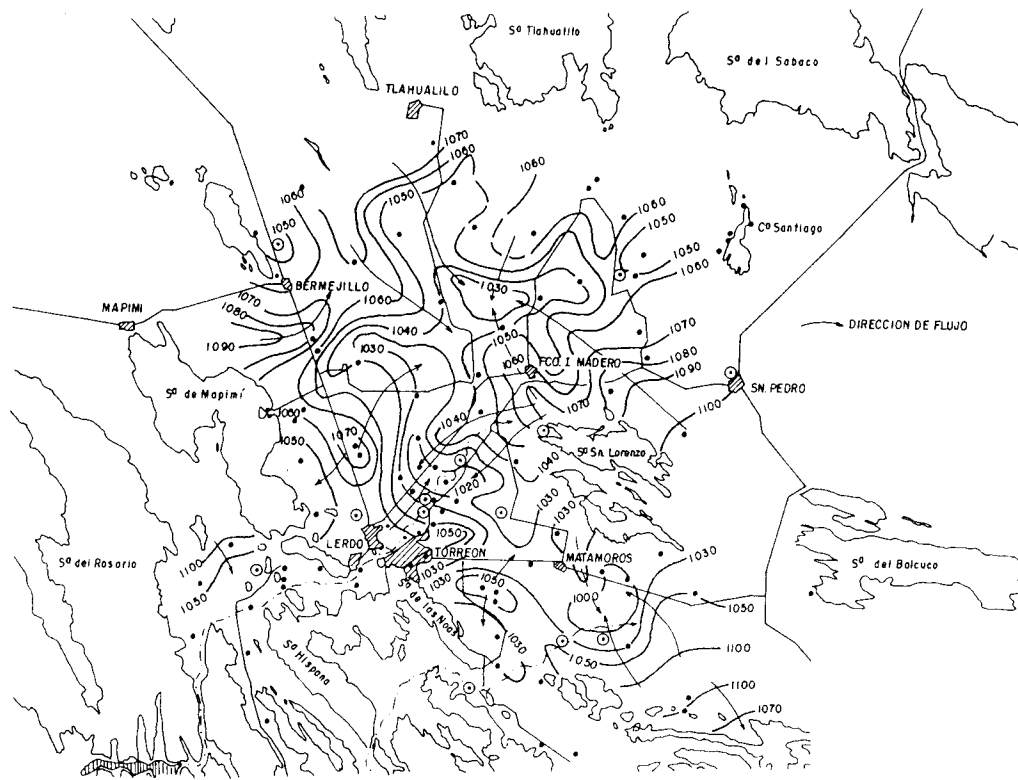


Figura 12 - Elevación del nivel estático (Dic-1990) en la Región Lagunera

Las configuraciones de las elevaciones de los niveles estáticos de la figura No. 12 , confirman en primera instancia la existencia de los tres conos piezométricos descritos anteriormente, pero además, mediante inspección visual de la dirección del flujo del agua, se infiere que existe una recarga local que nacen en los flancos de las principales sierras y se dirigen al relleno aluviolacustre del valle central.

En esta misma figura (12) se observa de manera importante la existencia de dos domos piezométricos que sugieren una recarga de carácter puntual y de abajo hacia arriba localizables al :

- 1.- Norte de Gómez Palacio Durango.
- 2.- Sureste de Torreón Coahuila.

También se aprecian algunas zonas de recarga como la ubicada entre la sierra de Mapimí y la sierra de Vinagrillos, otra al noroeste de la sierra de San Lorenzo así como también un flujo de las aguas de la zona norte con dirección hacia el centro del valle central mencionado líneas arriba.

Identificación de las fuentes principales de arsenico en cada una de las tres áreas con mayor contaminación.

Considerando la magnitud de la contaminación de cada una de las tres áreas, se observa que es el área A., la de mayor magnitud y que las áreas B y C presentan características de contaminación puntual de acuerdo a la configuración concéntrica de sus niveles de arsénico presente en el agua subterránea, por conveniencia se analizan por separado estas dos áreas ( B y C ) en el orden que se mencionan .

Las mayores concentraciones de arsénico en el área B se detectaron en los pozos profundos identificados con los números 2504 ( 0.296 mg/l As ) y el pozo 554 con ( 0.217 mg/l As) ubicados en el flanco oriental de la sierra de Vinagrillos y en el poblado de Bermejillo Durango respectivamente.

Este último propiedad de la Empresa Metalurgia Mexicana Peñoles S.A. de C.V., que se menciona en virtud a sus actividades relacionados a problemas de contaminación ambiental.

Como antecedente, es necesario señalar que la Industria Met. Mex. Peñoles S.A. de C.V., forma parte de un grupo denominado INDUSTRIAS PEÑOLES S.A de C.V., formado por más de 85 compañías de las cuales las más importantes y controladoras de las demás son :

- \* Servicios Industriales Peñoles S.A.de C.V.
- \* Peñoles Do Brasil S.A. de C.V.
- \* Química Magna S.A. de C.V.
- \* Minas Peñoles S.A. de C.V.

En base al informe anual de actividades de la empresa establecida en la Región Lagunera, se cita que el giro de la misma, es la fundición de minerales metálicos no ferrosos y que sus principales productos son :

Oro. Plata. Plomo, Cobre, Zinc, Cadmio, Oxido de Cadmio, Bismuto, Acido Sulfúrico, Trióxido de Antimonio, Sulfato de Cobre, Sulfato de Amonio y Bióxido de Azufre.

Kemmer (1988) afirma que considerando la baja solubilidad del arsénico, la presencia de este elemento suele ser un indicador de que existen operaciones metalúrgicas próximas al sitio de detección.

También Onishi (1969) sugiere que sea esta actividad donde deba buscarse el origen del arsenico en virtud de que las más altas concentraciones de arsenico, se han encontrado en aguas subterráneas próximas a minas con depósitos de sulfuros polimetálicos.

En este contexto y como una primera aproximación se puede identificar de manera general que los factores que están influyendo directamente en la calidad del agua en esta área particularmente el aporte de arsénico son :

- 1.- La geología del subsuelo como factor natural.
- 2.- El drenaje de minas como factor humano de carácter puntual.

Considerando que las sierras más próximas al área contaminada son la sierra de Vinagrillos y la sierra de Mapimí, pero además basados en que la dirección del flujo del agua y que la recarga al acuífero nace entre estas dos sierras como se interpretó en las figuras No. 11 y 12, así como que la mayor actividad minera se realiza en la sierra de Mapimí, se deduce que esta última presenta enriquecimientos de minerales que conllevan arsénico en depósitos contenidos en rocas ígneas y en mayor proporción en rocas sedimentarias principalmente en



lutitas, dolomías, y calizas que confirman el carácter calcófilo señalado por Rankama y Sahama (1962) y Onishi (1969) esquematizado por Enrique Lopez Ramos (1983) en la figura siguiente.

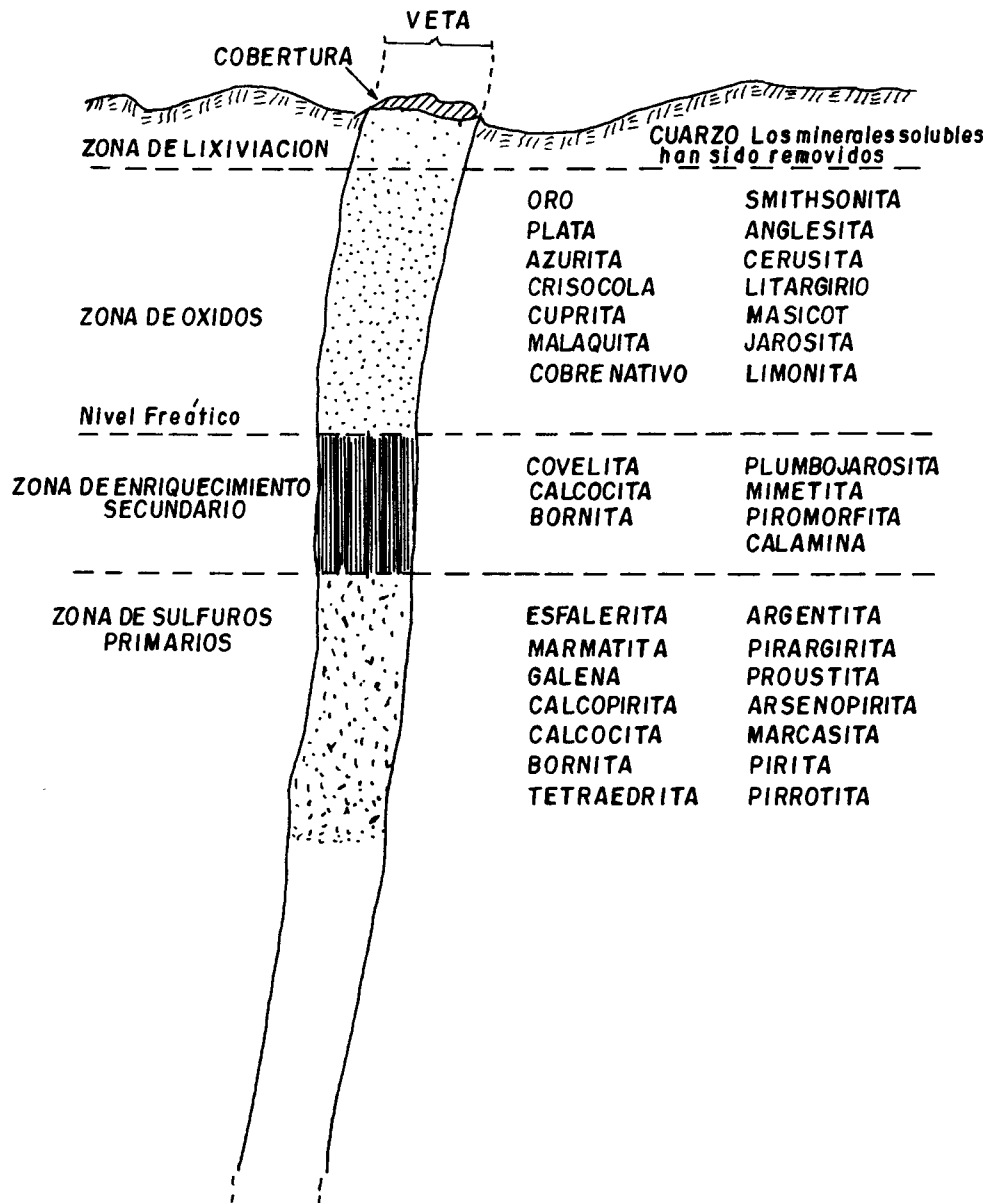


Figura 13 - Esquema mostrando la variación vertical de los grupos minerales. Región de Santa Bárbara, Chih.

Se conoce que los principales sulfuros que contienen arsénico son la arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), el realgar ( $\text{AsS}$ ) y el oropimente ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ).

Estos sulfuros están asociados a venas de oro como constituyentes menores, pero también se les encuentra en en piedras calizas y dolomías, en arcillas, en productos de sublimación volcánica y en manantiales de agua caliente.

Tanto los sulfuros como los arsenitos presentan un rango de estabilidad termodinámica limitada, generalmente reaccionan de manera inmediata en las zonas aereadas oxidandose hasta originar los arsenatos .

Escobar Gonzalez y A.J. Monhemius (1988) mencionan que los arsenatos se presentan a lo largo de fallas, cortes, fracturas, filones y grietas geológicas así como en depósitos hidrotermales como es el caso de la escorodita ( $\text{Fe As O}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) que de acuerdo con Moore e Ito (1978) la escorodita es el producto de la oxidación de la arsenopirita. realgar y oropimente, presenta una solubilidad en el agua de 75 mg/l .

Al analizar la lista del cuadro A1 del anexo es interesante encontrar a un mineral que por su composición es coincidente con los productos que procesa la empresa Peñoles en la Región, pero es más interesante la coincidencia con el nombre y la sierra en cuestión así como la posible presencia de la escorodita como aporte de arsénico. El mineral se llama Mapimita  $Zn_2 Fe_3 (AsO_4)_3 (OH)_4 \cdot H_2O$  este mineral se le encuentra asociado con la escorodita, existen otros minerales que maneja la empresa que son la adamita  $Zn_2 AsO_4 OH$  y la conicalcita  $CaCuAsO_4 OH$  de acuerdo a la composición química de estos minerales se observa que contienen al elemento arsénico como arsenatos susceptibles de llegar al agua subterránea.

Los arsenatos más abundantes de forma natural son los de calcio, fierro, manganeso, zinc y plomo.

Met Mex Peñoles en la Región procesa aproximadamente 430 Ton/día de minerales concentrados plomosos entre los que se encuentra un producto que llama la atención denominado "Speiss" cuya concentración es de 54 % de cobre, 16 % de plomo y 30 % de arsénico, el cual se envía en remesas de 600 a 700 Ton/mes a la Ciudad de San Luis Potosí México.

Con esta información se infiere de manera parcial que:

La principal fuente de arsénico que está contaminando el área de Mapimí y Bermejillo Durango, está relacionada con la operación de la planta de lavado de metales propiedad de Peñoles S.A. de C.V. ubicada en Bermejillo Dgo., donde se desconoce el la calidad y destino de sus aguas residuales empleadas en el lavado de metales.

También está relacionada con la presencia de depósito de sulfuros complejos principalmente de plomo localizables en la parte norte de la sierra de Mapimí y que conllevan de manera asociada al elemento arsénico.

Con el objeto de dilucidar de manera más precisa aún la fuente del arsénico en el agua subterránea del área comprendida en los municipios de Mapimí y Bermejillo Durango, y considerando que el catión comercial más importante es el plomo, se analiza la lista del cuadro A1 del anexo donde se registra que los principales arsenatos que contienen plomo como catión principal de la estructura son :

1.- Shultenita	$PbHASO_4$
2.- Mimetita	$Pb_5 (AsO_4)Cl$
3.- Shalinita	$Pb_{14}(AsO_4)_2O_9Cl_4$
4.- Georgiadesita	$Pb_{16}(AsO_4)_4Cl_{14}(OH)_{16}$
5.- Gabrielsonita	$PbFeAsO_4OH$
6.- Arsendescloisita	$PbZnAsO_4OH$
7.- Duflita	$PbCuAsO_4OH$

Estos arsenatos de plomo, se encuentran asociados con otros; los de mayor interes comercial que se explotan actualmente y que se encuentran incluidos en programas de financiamiento son la barita ( Ba, Sr )SO<sub>4</sub> y la fluorita CaF<sub>2</sub> que se encuentran localizados en la sierra de Mapimí. (1)

Por otra parte, también aparece como mineral asociado a los arsenatos de plomo, la discloisita que presenta la siguiente fórmula química  $Pb (Zn,Cu) VO_4 OH$  donde aparece el elemento vanadio que fué relacionado con la existencia de valores anómalos de arsénico , vanadio y flúor por Henríquez (1978) en las aguas subterráneas de la Pampa Argentina, mencionando que las concentraciones mayores de vanadio y flúor que aunque no coincidían totalmente,

---

(1) Comunicación personal : Consejo de Recursos Minerales, Programa de desarrollo en la Comarca Lagunera.

parecían estar íntimamente relacionados con afloramientos de esquistos cristalinos e intrusivos graníticos de las sierras peripampasicas y que la contaminación por vanadio al igual que el arsénico se encontraron en aguas de alcalinidad alta y dureza baja., de acuerdo con los análisis fisicoquímicos del cuadro A3 del anexo , se confirma que las aguas del área B. en discusión, son altamente alcalinas pero de dureza alta a diferencia de lo expuesto por Henríquez (1978) referente específicamente a este parámetro.

En cuanto a la evidencia de procesos ígneos intrusivos en los cuerpos rocosos, se revisa la geología de la Región Lagunera y se deduce que es durante el Terciario Continental (70 a 1 millón de años) donde hacen su aparición la presencia de rocas ígneas intrusivas y que de acuerdo con el INEGI (1990) afloran en la sierra del Sarnoso y en la sierra de Mapimí.

La formación Ahuchila de este periodo se integra por dos estratos, el inferior y superior.

El estrato inferior se encuentra constituido por material tobáceo y areniscas poco consolidadas y estratificadas con capas delgadas de yeso.

El estrato superior se constituye por un conglomerado de clastos submaduros de caliza, pedernal y rocas volcánicas ampliamente distribuidas en los flancos de las Sierras entre ellas la de Mapimí con espesores hasta de 160 metros.

En cuanto al origen de las aguas subterráneas que se alojan o circulan por esta formación, la SARH, en colaboración con el Organismo Internacional de Energía Atómica concluyó en 1979 en su estudio para la Región Lagunera, que las aguas que circulan entre las sierras de Mapimí y Vinagrillos corresponden a aguas meteóricas con tiempos de residencia estimados mediante el carbono 14 en 40 años que se infiltraron sobre las Sierras de Mapimí y el Rosario y que han estado sujeta parcialmente a evaporación.

Con toda la información analizada e interpretada anteriormente más la revisión de los procesos que originan a los yacimientos minerales descritos por Enrique Lopez Ramos (1983 tomo I), se precisa que :

La fuente principal del hidroarsenicismo en el área de Mapimí y Bermejillo Durango México son :

\* Depósitos primarios de yacimiento minerales Sulfurosos polimetálicos de ( Pb - Zn - Ag ) y ( Cu - Zn - Pb ) que están constituidos por arsenatos como fuente principal de arsénico que no presentan alteración hidrotermal y que se originaron por concentración residual y mecánica por agua meteórica percolante a través de los procesos siguientes.

\* Enriquecimiento secundario de volúmenes metalíferos producto de desechos mineros mediante lexicivación cerca de la superficie y depósitos debajo del nivel freático

\* Depósitos de vetas de capote (gash-veins) , dolinas y planos estratificados colectadas de partículas de mineral disperso que se encuentran en la formación Ahuchila del terciario continental y que son atravesadas por el flujo de las aguas subterráneas que responden a las fluctuaciones piezométricas del área y que nacen en el flanco oriental de la sierra de Mapimí y se concentran en el área de Bermejillo Durango , México. (fig A1 del anexo)



Determinación de la fuente principal de arsénico en el área C que comprende los municipios de Matamoros Coahuila y Viesca Coahuila.

Las mayores concentraciones de arsénico, se registran de manera puntual en los pozos clave 01BP01 y el No. 3376 que son propiedad de la empresa "SULFATOS DE VIESCA , S.A de C.V" que se ubican en el municipio de Viesca Coahuila., y que produce sales simples y complejas de interés comercial.

Con base al los análisis químicos del cuadro A3 del anexo , se observa que estas aguas experimentan una alta concentración de sales y de acuerdo con Onishi (1969) las aguas salinas, son fuente importante de arsénico ya que contienen hasta 300 mg/l de As.

Debido a las concentraciones extraordinarias de diversos parámetros hidroquímicos que registran estas aguas, se realiza un análisis detallado concentrando en el siguiente cuadro los resultados correspondientes.

Cuadro 10 Análisis fisicoquímico del agua subterránea de los pozos de la Sulfatera de Viesca Coahuila México.

Parámetro	01BP01 ( 10-15 m. ) prof.	3776 ( 120 m ) prof.
mg/l		
pH	7.63	7.66
Conductividas (uS)	202200.00	155200.00
Alcalinidad	312.00	263.00
Dureza	6126.20	2683.32
STD	134746.00	101093.00
Sodio	41480.00	32600.00
Potasio	937.80	332.00
Calcio	80.98	97.10
Magnesio	1438.56	592.73
Cloruros	30593.00	23438.00
Bicarbonatos	378.25	319.05
Sulfatos	22547.00	25811.00
Nitratos	< 0.05	< 0.05
Carbonatos	N.D	N.D
Litio	0.41	0.43
Arsénico	1.01	0.30
Boro	8.14	9.35
Floruros	83.65	78.21
Plomo	1.11	0.84
Hierro	0.06	1.21
Mercurio	< 0.15	0.29
Molibdeno	< 0.20	< 0.20

Basados en los resultados anteriores se infiere la existencia de dos zonas de concentración diferentes de iones en solución.. la mayor salinidad se registra en el nivel superior del acuífero, en concordancia con lo expuesto por Emilio Flores (1992) relativo a la factibilidad de que en la Región Lagunera existan estratificaciones de agua de " buena y mala calidad " tal y como se presenta en este caso.

Considerando, la concentración de sólidos totales disueltos, así como el esquema de distribución de los mismos en la Región Lagunera que se observa en la fig. No. 14

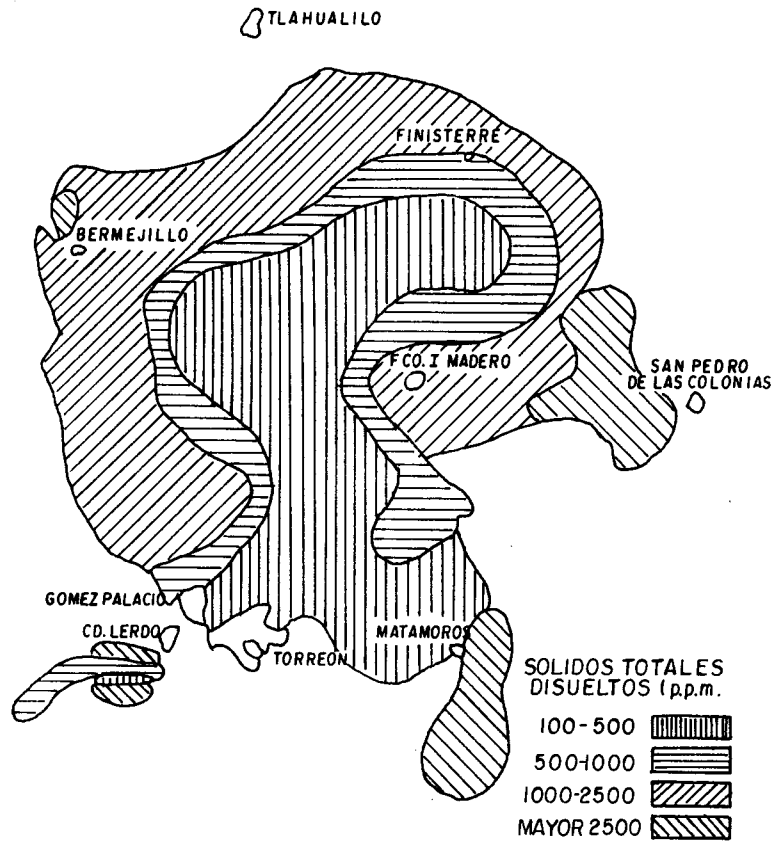


Figura 14 .- Distribución de los sólidos totales disueltos en el agua subterránea de la Región Lagunera (mg/l).

Se infiere que las aguas subterráneas de esta área se clasifican como salmueras, y atendiendo la concentración de los carbonatos de calcio y de magnesio expresados como carbonato de calcio se deduce que las aguas son muy duras, predominando el magnesio sobre el calcio, lo que sugiere la presencia dominante de rocas Dolomíticas.

Rankama y Sahama (1950); en la obra de Hidrología Subterránea de Custodio y Llamas (1976 tomo II) mencionan índices químicos promedio que se pueden encontrar en agua de mar, al realizar un análisis comparativo entre estos y los de la sulfatera como se observa en el cuadro No. 11

Cuadro 11 . Índices comparativos del agua de mar y aguas de la salmuera de Viesca Coahuila México (mg/l)

Parámetro	agua de mar	pozo 01BP01 somero	3776 profundo
Cloruros	19000.00	30593.00	23430.00
Sulfatos	3000.00	32547.00	25811.00
Bicarbonatos	100.00	378.25	319.05
Nitratos	1.00	< 0.05	< 0.05
Sodio	10556.00	41480.00	32600.00
Potasio	380.00	937.80	332.00
Calcio	400.00	80.98	97.10
Magnesio	1350.00	1438.56	592.73
Fluoruro	1.30	83.65	78.21
Boro	4.60	8.14	9.35
Hierro	0.01	0.06	1.21

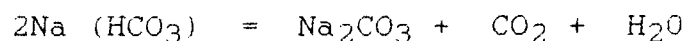
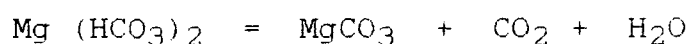
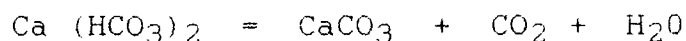
En el cuadro anterior, se observa que la mayoría de los parámetros comparados de los pozos de agua subterránea de la salmuera, son mayores que los del agua de mar con excepción de los nitratos indicativo de medios reductores y la existencia de un proceso que intensifique la evaporación que precipite y concentre en mayor cantidad las sales de la salmuera.. este proceso puede ser de carácter hidrotermal como lo confirman las

altas concentraciones de litio, boro, arsénico y fluor que son elementos asociados directamente a procesos hidrotermales.

Considerando la presencia de rocas dolomíticas cuya composición química es la de un carbonato doble de calcio y de magnesio  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , se conoce que estas rocas se originan por el reemplazamiento del calcio por el magnesio y que un reemplazamiento completo, implica una contracción de volumen de hasta 12.3 % que a su vez dá lugar a espacios porosos y como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) es más soluble que el carbonato de magnesio  $\text{MgCO}_3$  se efectúa un enriquecimiento progresivo que se estima debe de efectuarse entre la superficie y los 50 m., de profundidad con la consecuente formación de un depósito salino acuoso. (Enrique López 1977).

Los depósitos de sales formados en lagos o lagunas, difieren de los de origen marino porque los primeros contienen al Carbonato de Sodio  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , debido a que es mucho más soluble que los carbonatos alcalinotérreos y que es uno de los factores que significativamente le proporcionan al agua un efecto residual alcalino.

Los bicarbonatos alcalinos, y alcalinotérreos, pasan a sus correspondientes formas de Carbonatos cuando en el medio donde se encuentran ocurre un incremento de temperatura o una condición de deshidratación del medio :



En relación a los sulfatos, se infiere que la presencia de estos en el agua subterránea de la salmuera sean los sulfatos de calcio, magnesio y sodio estos últimos, a pesar de ser mucho más solubles que los de calcio, incrementan su solubilidad ante la presencia del cloruro de sodio debido a la formación de cloruros de calcio y sulfatos de sodio.

De acuerdo con el diagrama de Stiff descrito por Custodio y Llamas (1976) utilizado en la clasificación de aguas por sus iones dominantes; para las aguas de la Sulfatera de Viesca Coahuila se muestra en la figura No.15

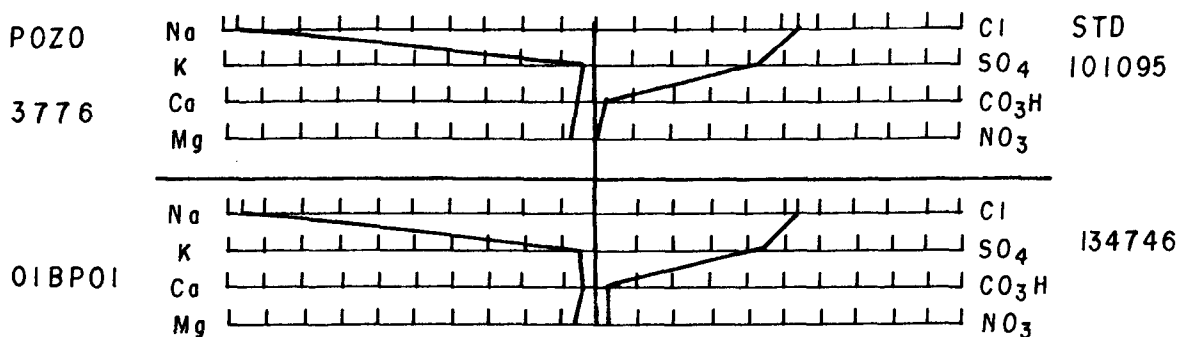


Figura 15.- Diagrama de Stiff

De acuerdo con los diagramas anteriores, las aguas de la salmuera se clasifican como cloruradas - sódicas, donde la concentración de cloruros es mayor que la de sulfatos en contradicción al orden inverso que comúnmente guardan estas concentraciones en agua subterráneas, lo que representa ser un caso excepcional., que sólo puede ser explicado cuando el acuífero subterráneo que contiene mayor concentración del anión cloruro, que la de sulfatos se encuentre en contacto con:

Descargas de aguas industriales, como es el caso de la industria " Sulfatos de Viesca S.A. de C.V. "

Aguas fósiles y depósitos de rocas evaporitas entre estas la Halita o sal común NaCl.,

Por otra parte se conoce también que los radicales fluoruro y cloruro afectan la solubilidad de la mayoría de los cationes incrementandola.

La presencia de el elemento arsénico se identifica al relacionar los minerales arsenato que tienen en su estructura básica al magnesio y calcio , (cuadro A1 del anexo.) entre los Arsenatos más importantes se encuentran

Brassita	$MgHAsO_4 \cdot 4H_2O$
Talmesita	$Ca_2Mg (AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$
Tilasita	$CaMg AsO_4 F$

De la información analizada y discutida, se concluye que la fuente principal de arsénico en el área (C) de Matamoros coahuila y Viesca Coahuila es :

La salmuera ubicada en la parte baja de la cuenca de las exlagunas de Mayrán y Viesca (cuenca endorreica), que se originó durante el Jurásico y terciario continental y constituida geológicamente por las formaciones de la Casita y Ahuichila respectivamente.



El origen de estas sales, (sales lacustres) se formaron por leixiviación y disolución de rocas evaporitas que circundan la cuenca hacia donde fueron transportadas y depositadas en sus partes bajas por corrientes subterráneas y ríos bajo condiciones de evaporación extrema debido al escaso aporte de agua así como el efecto de venas hidrotermales que incrementan el proceso de evaporación y que se manifiestan por una alta concentración de litio, flúor, boro y arsénico y como evidencia puntual la temperatura de 42°C del agua subterránea del pozo No. 3089 ubicado en la localidad de Bilbao, en el municipio de Viesca Coahuila., y localizable a 102° 52' de Longitud y 25°30' de latitud Norte., presentando también 0.1938 mg/l de As.

La existencia de dos estratos de agua de calidad diferente, se debe a la cristalización y precipitación de las sales contenidas en solución en orden inverso a sus solubilidades, precipitando en primer lugar las sales menos insolubles y depositandose en el estrato inferior del acuífero subterráneo.

Los arsenatos son acarreados por las diversas sales generadas en el medio principalmente por los carbonatos.

El arsénico soluble se libera, simultáneamente a la formación de los carbonatos en presencia del CO<sub>2</sub> atmosférico y a la mayor solubilidad de los arsenatos sobre los carbonatos. El arsénico liberado, se adhiere y combina en el medio acuoso de los estratos superiores como arsenatos de calcio, magnesio y sodio.

El arsenato de sodio representa ser el de mayor peligro potencial bajo condiciones reductoras en virtud de transformarse a arsenito de sodio que es un polvo blanco grisáceo altamente soluble en agua y agudamente tóxico a la salud humana teniendo como dosis letal media: LD 50 de 10 a 50 mg/kg

Determinación de la fuente principal del arsénico en área (A) norte y noreste de la Región Lagunera que comprende los municipios de Tlahualilo Durango; Fco.I. Madero Coahuila y San Pedro Coahuila.

La distribución de la contaminación por arsénico, en el agua subterránea de esta área, exhibe una dispersión muy amplia, lo que sugiere que la fuente de contaminación por arsenico es de caracter no puntual..(figs. 9 y 10) sin embargo, las máximas concentraciones se puntualizan en los pozos :

Cuadro 12.- Relación de pozos en el área A con máxima concentración de arsénico

Clave de pozo	Localidad	Municipio	[As mg/l ]
1993	El Dorado	Fco.I.Madero.Coah.	0.4330
2510	Providencia del Norte	Fco.I.Madero.Coah.	0.4326
2819	Atila	San Pedro, Coah.	0.3650
3035	El Capulin	Tlahualilo, Dgo.	0.3530
1036	El Esfuerzo	San Pedro, Coah.	0.1940

Todos estos pozos, se localizan en el noreste del municipio de Fco. I. Madero Coahuila. La actividad principal en el área es agrícola y ganadera.

El Cerro de Santiago, y los dos cono volcánicos de composición basáltica derivados de rocas igneas extrusivas (INEGI, 1986 ) que se formaron en el Terciario continental son las evidencias de un posible fallamiento y fracturamiento más próximos al área como fuente principal de arsénico en el agua subterránea.

De acuerdo con la geología local, se infiere que el flujo del agua que nace en la parte baja de la cuenca de la Laguna del Rey circula lentamente através de las tobas sedimentarias con presencias de rocas bentoniticas.

Este flujo contacta con Dique - estratos de Batolitos que son masas intrusivas tabulares que representan una falla o fractura que fué rellena por magma formando espesores hasta de 50 metros, orientado NW-NE y que corta diagonalmente a las rocas sedimentarias de la parte alta ( figs. A2 y A3 del anexo).

Estas rocas, tienen una composición basáltica que contiene hasta 2.0 p.p.m. ( Onishi, 1960,1973) en forma de arsenatos asociados a los compuestos principales como los feldespatos que son silicatos aluminico representados por las ortoclasas y plagioclasas con elementos monoclinicos como el potasio y el sodio.

El agua subterránea disuelve y transporta los minerales anteriores a bajas velocidades debido los altos contenidos de arcilla de las Tobas y en función de la diferencia de niveles piezométricos que se producen en el Valle Central ya que ahí se localizan la mayor densidad de pozos profundos que extraen agua del subsuelo.

El agua subterránea cederá evidentemente mayor cantidad de arsénico en los primeros sitios de intercepción lo que explica porque se encuentra más contaminado la parte alta del área en estudio.

A pesar de que existe un cono de abatimiento en los niveles estáticos, en esta área, el gradiente es menor que el que se ubica en el área (C) de Matamoros Coahuila, en razón de sus fuentes de recarga.

La recarga es mayor en la zona norte de la Región al tenerse dos fuentes ; una en la parte alta con los escurrimientos de los abanicos aluviales cercanos y otra representada por la recarga estacional del paso del agua del Río Nazas durante cada ciclo agrícola recargando los pozos del valle central

Los basaltos se encuentran constituidos porcentualmente por :

- 46.2 % de feldespatos
- 36.9 % de hornblenda
- 7.6 % de olivino
- 6.5 % de minerales de hierro
- 2.8 % de otros minerales

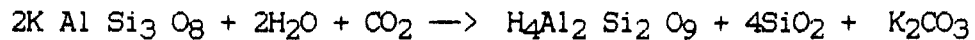
Considerando a los feldespatos por su magnitud porcentual en la composición de las basaltos, se tiene que los feldespatos a su vez se encuentran representados por:

ortoclasa	$K Al Si_2 O_8$
plagioclasas	
- albita	$Na Al Si_2 O_8$
- anortita	$Ca Na_2 ( SiO_4 )_2$

La ortoclasa es uno de los minerales de mayor importancia agrícola por ser formadora de arcillas ricas en potasio., en este estudio se confirmó lo anterior al analizar la distribución de las series de suelos en la Región Lagunera.

La serie de suelos dominante en el área, corresponde a suelos de la serie Coyote (Cy) (fig. A4 del anexo.), donde la descripción correspondiente menciona como particularidad la riqueza en potasio que contienen estos suelos.

Las rocas que contienen a la ortoclasa, y que están sujetas al efecto del intemperismo, se desintegran dando principio a la formación de suelos, después, bajo la acción del agua y del anhídrido carbónico, la ortoclasa se descompone originando arcilla, bióxido de carbono y carbonato de potasio conforme la siguiente ecuación.



Reacción similar sucede con las plagioclasas diferenciándose solamente por los cationes de sodio y calcio en la formación de carbonatos.

Las aguas de esta zona se clasifican por su dureza como aguas suaves donde el sodio es mayor que calcio y magnesio, la dureza se encuentra expresada como  $CaCO_3$  con altos contenidos de arsénico.

Lo anterior, coincide plenamente con lo expuesto por Henríquez (1978) en el sentido de que las máximas concentraciones de arsénico se localizan en aguas muy alcalinas, ricas en bicarbonatos de sodio y dureza baja.

Por otra parte, considerando que los cationes dominantes de la estructura de los compuestos basálticos son el K, Na, Al y Si, del cuadro A2 del anexo, se indican los principales arsenatos asociados que son:

Duranguita	$\text{NaAl AsO}_4 \text{ F}$
Alumofarmacosiderita	$\text{K Al}_4 (\text{AsO}_4)_3 (\text{OH})_4 \cdot 6.5 \text{ H}_2\text{O}$
Mansfieldita	$\text{Al AsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

El arsénico soluble se libera simultáneamente durante la formación de los carbonatos entre ellos el de sodio que conllevan a los arsenatos y son más solubles que los carbonatos.

Es importante comentar que existe otra posible fuente de contaminación para esta área y a reserva de confirmarlo en estudios posteriores se menciona como potencial a "SALINAS DEL REY" también propiedad de la empresa metalurgica Peñoles S.A. de C.V cuya actividad principal es la producción de sal y que se encuentra en la misma dirección del flujo del agua de recarga.



Acumulación del arsénico en el sistema suelo - planta - producto., relacionado directamente con la irrigación con aguas que contienen concentraciones máximas de arsénico.

En el cuadro 13 , se registran los resultados de las concentraciones de arsénico pentavalente, exclusivamente para cada una de las tres áreas descritas anteriormente como las de mayor contaminación.

Cuadro 13.- Concentración promedio de arsénico en suelo, alfalfa (*Medicago sativa* L) y leche

Area	Agua mg/l	Suelo mg/g ( 0-60 cm ) Total Extractable	Alfalfa mg/g	Leche mg/g	
A =	0.433	0.04	0.0022	0.0014	0.000016
B =	0.296	0.03	0.0050	0.0025	0.000002
C =	0.041	0.02	0.0070	0.0120	0.0000002

\* 0.050                      0.006                      0.045                      0.00004

\* [ As ] max. tolerable ( NAS, 1977 )

**Areas:**

A: Tlahualilo Durango, Francisco I. Madero Coahuila y San Pedro Coahuila.

B: Mapimí y Bermejillo Durango; C: Matamoros y Viesca Coah.

Acumulación de arsénico en el suelo.

En base a los resultados anteriores y respecto a la concentración del arsénico en el suelo expresado como total y extractable se hace un análisis comparativo entre el **arsénico total** y el que indica la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA.1985) como nivel máximo permisible que es de 0.006 mg/l ( 6  $\mu$ g/g ) de donde se concluye que las tres áreas exceden muy significativamente este nivel (figs.16 y 17) lo que representa un enriquecimiento por arsénico en estos suelos, siendo mayor en las áreas A y B que se explica por los altos contenidos de arcillas en sus estratos superiores ( Figs. A4 y A5 del anexo ) y que retienen a los iones arsenatos en sus estructuras fijandolos fuertemente. ( Jacobs, *et. al*; 1970; y Woolson, 1973 ).

Dentro de estas áreas que presentan suelos enriquecidos por factores geologicos combinados con factores humanos de carácter puntual, el área (A) de Tlahualilo Durango, Francisco I. Madero Coahuila y San Pedro Coahuila; registra los niveles máximos que se explica porque los suelos proceden de la disolución de los feldespatos que son minerales alumino-silicatados

Fig. 16 [As mg/L] Tot. en tres texturas de suelo  
A.-Mig.Arc. B.-Fr.Arc. C.-Arena

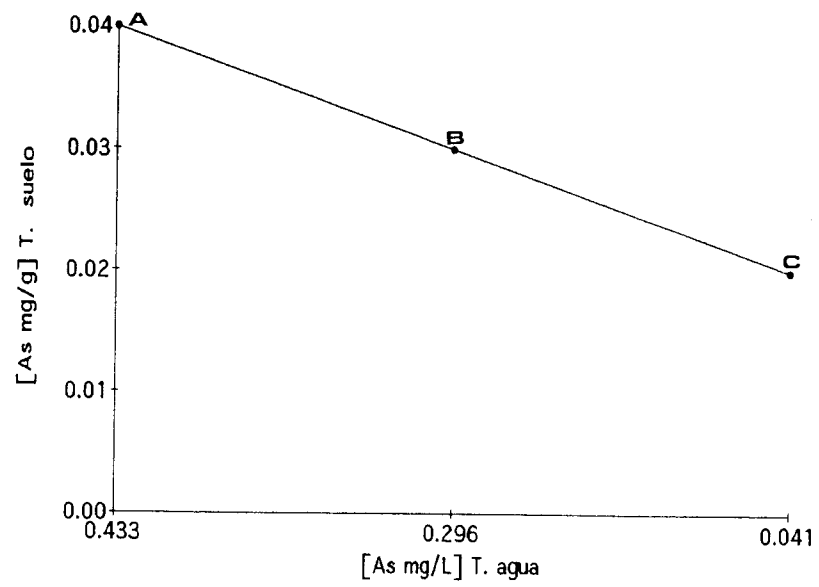
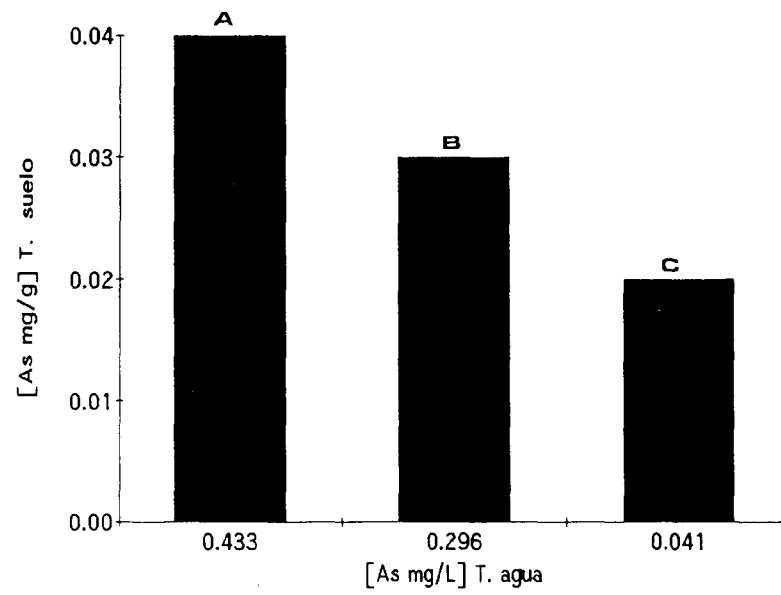


Fig. 17 [As mg/L] Tot. en tres texturas de suelo.  
A.-Mig.Arc. B.-Fr.Arc. C.-Arena



(Walsh *et. al*: 1977) donde el aluminio retiene principalmente a los ortofosfatos y al arsénico debido a que los iones arsenato se asemejan a las estructuras químicas de los ortofosfatos ( Bohon, 1976 ).

Es importante recordar que los ortofosfatos son la forma como el sistema radicular de la alfalfa absorbe el fósforo, el cual está relacionado directamente con los procesos de reproducción celular, expansión, fotosíntesis y metabolismo de los carbohidratos en la fisiología de la planta.

Por otra parte el suelo que presentó menor acumulación de arsénico total fué el área C; de Matamoros y Viesca Coahuila., debido principalmente a que la mayor superficie del área agrícola y ganadera corresponden a la serie de suelos " San Pedro " ( fig. A6 del anexo ).

Estos suelos se caracterizan por tener estratos superficiales arenosos con altos contenidos de arsénico soluble disponible para los cultivos principalmente la alfalfa como se observa en el cuadro 13 y en las figs. 18 y 19

Fig. 18

[As mg/g] Extr. en tres texturas de suelo  
A.-Mig.Arc. B.-Fr.Arc. C.-Arena

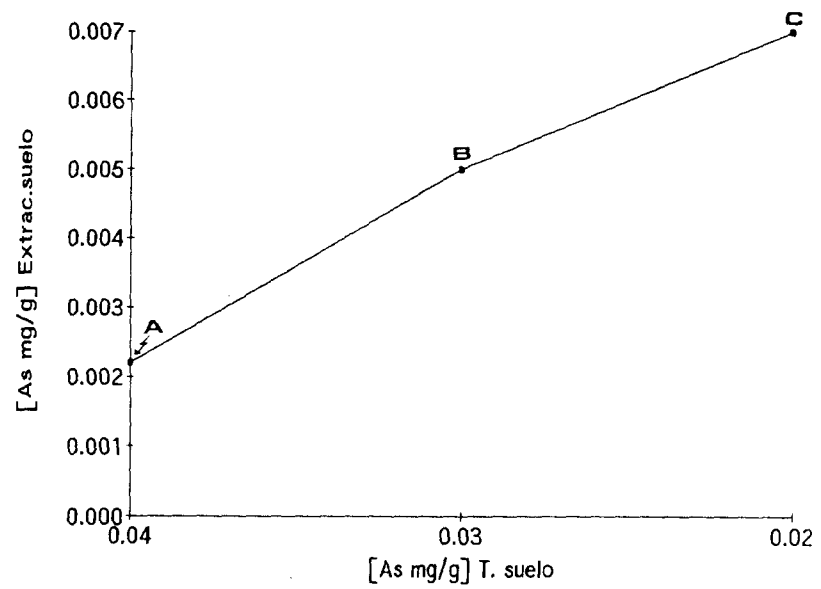
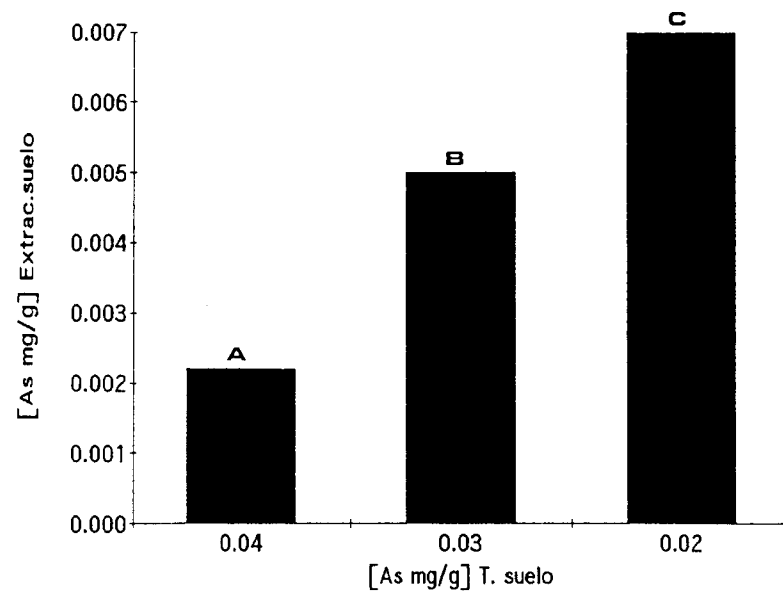


Fig. 19 [As mg/g] Extr. en tres texturas de suelo  
A.-Mig.Arc. B.-Fr.Arc. C.-Arena



## Acumulación de arsénico en planta

( Alfalfa : *Medicago sativa* L )

Con base en los resultados del cuadro No.13 se observa que la concentración de arsénico por la alfalfa se encuentra muy por debajo de los límites establecidos como máximos permisibles o tolerables para que la planta no se considere fitotóxica.

Aún cuando las concentraciones son muy reducidas y no representan ningún riesgo de toxicidad en los tres sitios estudiados, se realiza el análisis siguiente a efecto de detectar posibles tendencias.

En las figuras 20 y 21 se evidencian las tendencias de asimilación o absorción del arsénico por la alfalfa.

Se aprecia que la mayor cantidad de arsénico absorbido por la alfalfa se origina en suelos de textura arenosa donde la proporción de arsénico extractable o disponible es mayor como se presentó en el área C correspondiente a los municipios de Matamoros y Viesca, Coahuila.



Fig. 20 [As mg/g] en alfalfa (*Medicago sativa* L.)  
[Máx. perm] = 0.045 mg/g

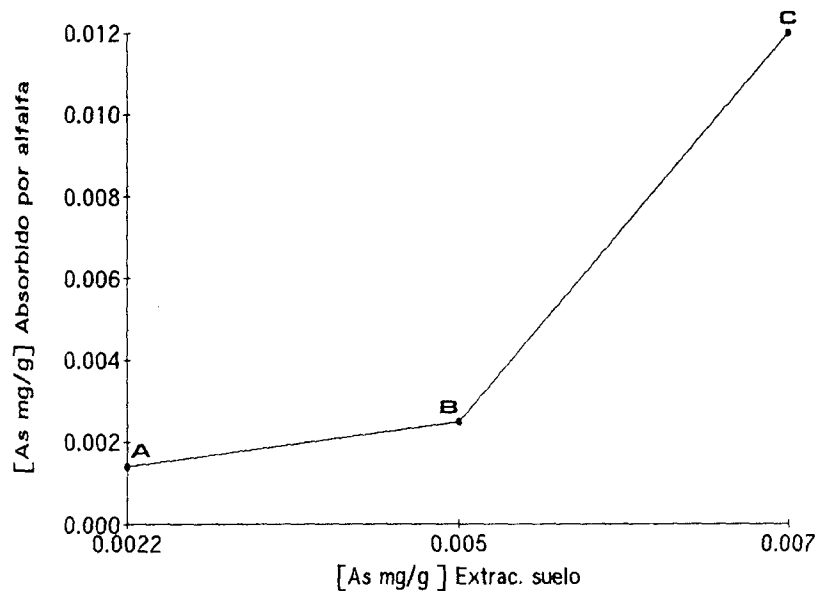
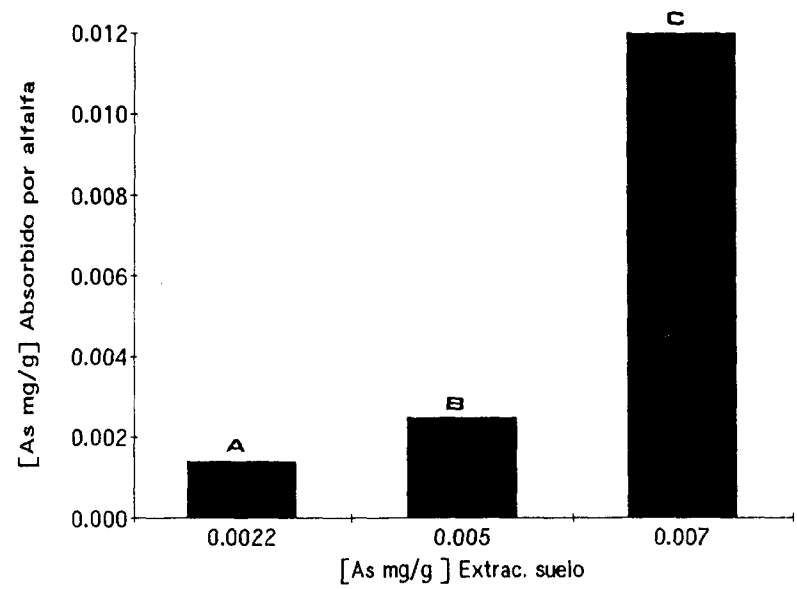


Fig. 21 [As mg/g] en alfalfa (*Medicago sativa* L.)  
[Máx. perm] = 0.046 mg/g



La fracción de arsénico 0.012 mg/g absorbida por la alfalfa comparado con el nivel permisible y correlacionado también con las evidencias de otros autores como Teodoro Gutiérrez de la Rosa (1979) quién menciona que aún con 7.0 p.p.m (7.0 mg/l) de arsénico soluble en el suelo el cultivo de la alfalfa no reporta daños, se deduce que la fracción absorbida resulta ser insignificante.

Basados en estos resultados se puede inferir que el arsénico soluble en el suelo en las concentraciones en que ocurre en la Región Lagunera, no le producen ninguna toxicidad a la alfalfa, al contrario le sirve como nutriente ya sea directamente como ortoarsenato o sustituyendo a los ortofosfatos debido a la analogía de su estructura química., lo que confirma las tesis de diversos autores de que el arsénico en pequeñas cantidades estimula el crecimiento de los cultivos y que es avalada por los comentarios de excelentes cosechas en alfalfa por los productores del ejido de Bilbao, en el municipio de Viesca Coahuila.(2)

---

(2) Comunicación personal con ejidatarios del ejido de Bilbao, Mpio. de Viesca, Coahuila México.

Para complementar estas afirmaciones, es conveniente mencionar que el arsénico inorgánico es más tóxico que sus formas orgánicas ( Pontius 1990 ).

Tomando al fósforo como modelo para analizar la dinámica del arsénico en la fisiología de la planta por su similitud, se tiene que el fósforo es absorbido por las raíces como  $H_2PO_4^-$  y puede permanecer en el interior como un fosfato inorgánico (  $P_i$  ) o ser esterificado mediante grupos hidroxilos a un carbón principal (  $C - P - C$  ) como un ester fosfato simple o puede ser adherido a otro fosfato por la fuerte energía de enlace de los pirofosfatos  $p \sim p$  por ejemplo en la formación de la adenosín trifosfato ( ATP ) .

Las tasas de intercambio entre  $P_i$  y el  $p$  en los esteres y en los enlaces pirofosfato son muy altas, por ejemplo :

El  $P_i$  absorbido por las raíces de la alfalfa se transforma en unos cuantos minutos a la forma orgánica  $p$  para posteriormente ser liberado nuevamente como  $P_i$  dentro del xilema , que tiene como función principal regular las funciones de fotosíntesis en las hojas y el metabolismo de los carbohidratos.

## Acumulación del arsénico en producto ( Leche )

De los resultados del cuadro No. 13 se observa que las concentraciones de arsénico acumulado en la leche expresados en mg/g para cada área fueron :

$$A = 1.6 (10)^{-5} \quad B = 0.2 (10)^{-5} \quad C = 0.2 (10)^{-5}$$

Comparados con el nivel máximo permisible  $4 (10)^{-5}$  (NAS,1977).. se concluye de que no representan ningún riesgo actual para la salud humana.

Sólamante con el objeto de observar las tendencias de la fracción acumulable se grafican los datos en las figuras 22 y 23.

La fracción de arsénico detectado en la leche presenta un comportamiento inversamente proporcional al contenido de sales en el suelo donde fué sembrada la alfalfa con que se alimentó el ganado.

A mayor contenido de sales solubles ( área C ), menor cantidad de arsénico detectado en la leche.

Fig. 22 [As mg/g] Acumulado en leche  
[As máx. perm.] = 0.00004 mg/g

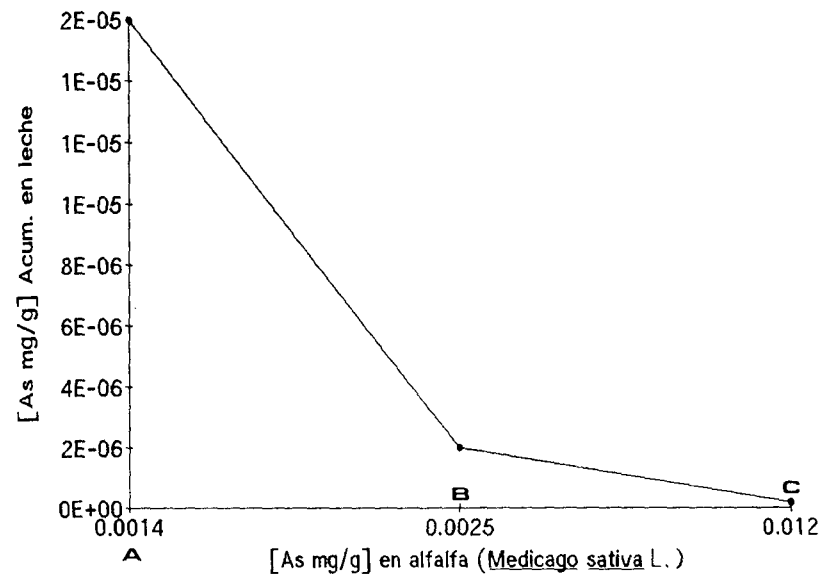
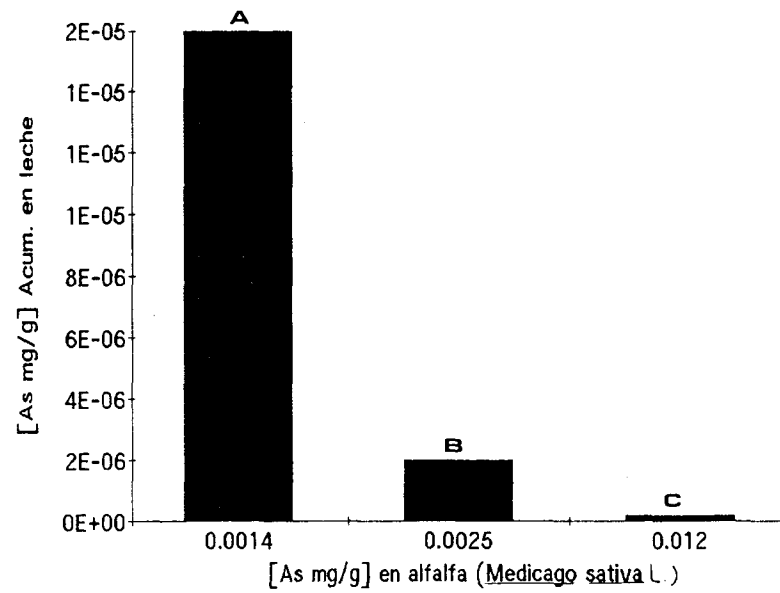


Fig. 23 [As mg/g] Acumulado en leche  
[As máx. perm] = 0.00004 mg/g



Esto puede ser explicado mediante una revisión de fisiología y nutrición animal específicamente en el metabolismo de los aminoácidos que son los constituyentes principales de la leche.

Se conoce que tanto el cloro como el sodio que son los cationes principales de las sales solubles, se absorben fácilmente del tracto digestivo intestinal y se excreta con esa misma facilidad la mayor parte del exceso por los riñones ( 90 % ) del total.

El sodio predomina en los líquidos intersticiales ( existentes entre las células ) y se le encuentra asociado con el cloro, bicarbonatos y proteínas ( posible ubicación de los arsenatos ) el desplazamiento del cloruro hacia los conductos sanguíneos libera bióxido de carbono a partir de las células, el cual solubiliza de manera significativa a los arsenatos que finalmente son excretados en grandes cantidades en la orina de de los animales.



Del análisis de la información anterior se concluye que para el sistema suelo - planta - producto :

La concentración de arsénico asimilable reduce significativamente sus niveles tóxicos que son los inorgánicos a través de la serie de resistencias que tiene que atravesar mediante su dinámica en el sistema suelo-planta-animal y las transformaciones a formas orgánicas consideradas menos tóxicas y que no representan ningún riesgo de bioacumulación ya sea por la fisiología propia de los organismos vivos o por la acción combinada de la flora y fauna de los organismos superiores en concordancia con lo expuesto por Wood (1974) Y D'Itri (1992).

## CONCLUSIONES

Bajo las condiciones y metodología con las que se llevó a cabo la presente investigación, se concluye lo siguiente :

Las fuentes principales del arsénico que contaminan el agua subterránea de la Región Lagunera son tres, de naturaleza geológica y humana de carácter puntual.

La fuente principal de arsénico al noreste de la Región Lagunera que comprende los municipios de Tlahualilo Durango ; Francisco I. Madero Coahuila y San Pedro Coahuila, son las rocas extrusivas básicas que constituyen el cerro de Santiago y dos conos volcánicos denominados " Tetas de Juana ".

La fuente principal del hidroarsenicismo en la Región Lagunera, que se localiza al Noroeste (NW) y comprende los municipios de de Mapimí y Bermejillo Durango está representada por la planta lavadora de metales propiedad de la empresa Peñoles S.A. de C.V ubicada en Bermejillo Durango.

La fuente principal de arsénico detectada al sureste (SE) de la región y que comprende los municipios de Matamoros y Viesca Coahuila, se ubica puntualmente en las actividades de la empresa "Sulfatos de Viesca S.A de C.V"

La variación del hidroarsenicismo en la Región Lagunera, se debe en todos los casos al movimiento del agua subterránea como respuesta inmediata a los gradientes de los niveles piezométricos generada por los densidades de pozos en operación en cada una de las áreas.

Los suelos de textura arcillosa presentan mayor enriquecimiento de arsénico total.

Los suelos de textura arenosa presentan mayor cantidad de arsénico extractable disponible a los cultivos.

No existe bioacumulación de arsénico en la alfalfa (*Medicago sativa* L).

La principal fuente de afección a la salud humana por contaminación arsenical en la Región Lagunera, es la ingesta directa y crónica del agua subterránea.

## RESUMEN

La presencia de arsénico en el agua subterránea de la Región Lagunera de Coahuila y Durango México ; se ha evidenciado en impactos a la salud por la ingesta crónica del agua para consumo humano desde 1963 en que se registra el primer estudio epidemiológico por contaminación arsenical. Posteriormente han proseguido diversos estudios que confirman la existencia de valores anómalos de arsénico en el agua subterránea, sin precisar las fuentes principales de contaminación y el grado de difusión del hidroarsenicismo en la región.

El presente estudio identifica tres fuentes principales de contaminación regional cuyo origen es de naturaleza geológica magnificada por factores humanos de carácter puntual. Asimismo determina la variabilidad espacial del hidroarsenicismo como una función directa de los gradientes piezométrico del área y estudia la acumulación del arsénico en el sistema agua - suelo - planta (alfalfa : *Medicago sativa* L.) y producto final (leche).. concluyendo que no existe acumulación de arsénico en leche que represente riesgos a la salud humana.

## LITERATURA CITADA

- Arguello, A., Cenget, D., Tello, E. 1938. Regional endemic cancer and arsenical intoxication in Cordoba. Argentina Review of Dermatosyphilology. Vol. 23: 4 Presented at 6th. National Medical Congress. Cordoba. october 16-21.
- Benítez., A. 1973. Captación de aguas subterráneas, nuevos métodos de prospección y de cálculo de caudales. Segunda Edición. Dosat. Madrid, España. p. 579-585.
- Bohn, H. 1976. Arsenic Eh-pH diagram and comparisons to the soils chemistry of phosphorus. Soil Sci. 121: 125.
- Boyle, R.W. y Jonasson, I.R. 1973. The geochemistry of arsenic and its use as an indicator element in geochemical prospecting. J. Geo., Exploration. Vol. 2: 251-296.
- Bracho, A.R. 1971. Arsenicismo Crónico en la Comarca Lagunera de Coahuila. Tesis recepcional. Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Coahuila. México.
- Caballero, G.L. 1986. Evaluación General del Hidroarsenicismo en la Región Lagunera. Tesis. Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila, México. p. 90.
- Cantellano, A.L., Viniegra, G., Eslava, G.R. y Alvarez, A.J. 1964. El arsenicismo en la Comarca Lagunera. Salud Pública. (Méx.) 6: 375-385.
- Cantor., L.W. 1987. Ground Water Quality Protection. Lewis Publishers, Chelsea, Mich.
- Cebrián, M.E., Albores, A., Aguilar, M. y Blakely, E. 1983. Chronic Arsenic poisoning in the North of México. Human Toxicology. 2: 121-133.

- Colbourn, P., Alloway, B.J. y Thornton, I. 1975. Arsenic and heavy metals in soils associated with regional geochemical anomalies in south-west England. *Sci. Environ.* 4: 359-363.
- Cooper, R.M. y Jonathan D. Istok. 1988. Geostatistic applied to groundwater contamination. I, II Methodology. *J. Environ. Engrg., ASCE.* 114: 2
- Custodio, E. y M. Llamas D. 1976. Hidrología subterránea. Tomo II. Ediciones Omega, S.A. España. p. 1886-1926.
- Chávez, A., Pérez, H.C., Tovar, E. y Carmilla, M. 1964. Estudio en una comunidad con arsenicismo crónico endémico. *Manifestaciones clínicas. Salud Pública. (Méx.)* 6: 432-435.
- Chávez, G., R. 1989. Panorama Actual de las Aguas Subterráneas en la República Mexicana. Seminario Internacional sobre Tecnificación del Riego y Uso Eficiente de la Energía. Torreón, Coahuila, México. p. 278-281.
- Davis, N.S., y J.M.R. De Wiest. 1971. *Hidrogeología*. Ediciones Ariel. Barcelona, España. p. 160-165
- Dirección de Aguas Subterráneas. SARH. 1986. Estudio Geohidrológico en la Región Lagunera, Coahuila-Durango.
- D'lttri, M.F. 1992. El ciclo del metilmercurio y otros metales pesados en ambientes lacustres. *Ingeniería Hidráulica en México. Vol. VII* No. 2, 3 II Epoca. mayo-diciembre. p. 75-86.
- Environmental Protection Agency. 1988. *Pesticide Fact Handbook*. Noyes Data Corporation. Park Ridge, New Jersey. U.S.A. p. 57-56, 106-108, 712-718.
- Escobar, G.V.E., y Monhemius, A.J. 1988. The mineralogy of arsenates relating to arsenic impurity control. Department of Mineral Resources Engineering, Royal School of Mines. London, England.

Espinoza, G. E. 1963. Mass arsenic poisoning in Torreón, Coahuila State, México. *Eol. Epidemiol.* Vol 27 (4): 213-220.

Fairchild., D.M. 1987. A National Assesment of Ground Water Contamination from Pesticides and Fertilizers. *Ground Water Quality and Agriculture Practices*. Lewis Publishers, Chelsea, Mich.

Flores, E.E. 1992. Antología genética del hidroarsenicismo en la Región Lagunera. Comisión Nacional del Agua. (CONAGUA). Gerencia Regional Norte. Torreón, Coahuila, México. p.5.

Geney., S. R. 1988. Reservoir Management for Water Quality Improvement. Proc. AWWA Annual Conf., Orlando, Fla.

Goldblatt, E.L., Van Denburgh, A.S. and Marsland, R.A. 1963. The unusual and widespread occurrence of arsenic in well waters of land country, Oregon. Oregon Department of Health. p. 24.

González, C.A., Hernández, A.H., Guzmán, B.J., y Mora, F.J.R. 1972. Arsenicismo crónico en una comunidad Rural y subdesarrollada. *Revista de investigación en Salud Pública*. 32 (2) :82-88.

Gulledge, J.H. and O'Connor, J.T. 1973. Removal of Arsenic (V) from water by absorption on aluminium and ferric hidroxides. *Journal American. Water Works Assoc.* Vol. 65 (8): 548,555

Gutiérrez De la Rosa, T. 1979. Comportamiento del Arsénico en productos agropecuarios. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Representación en la Región Lagunera, Coahuila y Durango. México. p. 29,30.

Hindin., E. 1981. Treatment of Mount St. Helens Volcanic Ash Suspensions by Plain Sedimentation, Coagulation, and Flocculation. *Journal AWWA* 73 : 3 p. 160

Henríquez, A.H. 1978. Misión relativa al Programa de Cooperación Subregional sobre

Espinoza, G. E. 1963. Mass arsenic poisoning in Torreón, Coahuila State. México. Bol. Epidemiol. Vol 27 (4): 213-220.

Fairchild, D.M. 1987. A National Assessment of Ground Water Contamination from Pesticides and Fertilizers. Ground Water Quality and Agriculture Practices. Lewis Publishers. Chelsea, Mich.

Flores, E.E. 1992. Antología genética del hidroarsenicismo en la Región Lagunera. Comisión Nacional del Agua. (CONAGUA). Gerencia Regional Norte. Torreón. Coahuila, México. p.5.

Geney, S. R. 1988. Reservoir Management for Water Quality Improvement. Proc. AWWA Annual Conf., Orlando, Fla.

Goldblatt, E.L., Van Denburgh, A.S. and Marsland, R.A. 1963. The unusual and widespread occurrence of arsenic in well waters of land country. Oregon. Oregon Department of Health. p. 24.

González, C.A., Hernández, A.H., Guzman, B.J., y Mora, F.J.R. 1972. Arsenicismo crónico en una comunidad Rural y subdesarrollada. Revista de investigación en Salud Pública. 32 (2) :82-88.

Gulledge, J.H. and O'Connor, J.T. 1973. Removal of Arsenic (V) from water by absorption on aluminium and ferric hydroxides. Journal American. Water Works Assoc. Vol. 65 (8): 548,555

Gutiérrez De la Rosa, T. 1979. Comportamiento del Arsénico en productos agropecuarios. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Representación en la Región Lagunera, Coahuila y Durango. México. p. 29,30.

Hindin, E. 1981. Treatment of Mount St. Helens Volcanic Ash Suspensions by Plain Sedimentation, Coagulation, and Flocculation. Journal AWWA 73 : 3 p. 160



Henríquez, A.H. 1978. Misión relativa al Programa de Cooperación Subregional sobre Arsénico y otros Contaminantes en el agua en Relación con el Vulcanismo Cuaternario. ( Argentina, Bolivia, Chile y Perú ). Programa Hidrología Internacional. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (UNESCO) Montevideo, Uruguay. p.1-18.

Ingenieros Agrónomos del Tecnológico de Monterrey ( IATEM ) Sección Laguna y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología ( CONACYT ) 1985. Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Agricultura. Ciclo Internacional de Conferencias. Torreón, Coahuila, México, marzo de 1985.

INEGI (Inst. Nac. Estad. Geogr. e Informática). 1990. Geología de la República Mexicana. p. 33-42.

INEGI (Inst. Nac. Estad. Geogr. e Informática). 1986. Hidrología del Estado de Coahuila. p. 105.

INEGI (Inst. Nac. Estad. Geogr. e Informática). 1990 Censo de población.

Jacobs, L. W., Syers, J.K., y Keeney, D.R. 1970. Arsenic sorption by soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34: 750.

Kemmer., F.N. 1988. The Nalco Water Handbook. 2a. Edición. Mc. Graw-Hill Book Company. p. 6: 1-28

Kuo., T. 1968. Arsenic content of artesia in well water in endemic area of chronic arsenic poisoning. Rep. Inst. Pathol. Natl. Taiwan Univ. 20: 7-13.

Latorre, C., J.M. Lesser, L. Quijano y B. Paine., 1979. Isótopos Ambientales Aplicados al Estudio de Interconexión de los Acuíferos Calizos y de Relleno en la Región Lagunera de Coahuila-Durango, México. SARH-OIEA.

Longtin., J.P. 1987. Radon, Radium, and Uranium Occurrence in Drinking Water from Grand Water sources. Proc. AWWA Annual Conf., Kansas City, Mo. June 1987.

López, R. E. 1983. Geología General. Tomos I,II,III Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México.UNAM.

Maeda, V.L. 1992. El hidroarsenicismo crónico regional. Un estudio descriptivo. Consejo Cívico Asesor del Departamento de Ecología. R. Ayuntamiento de Torreón. Torreón. Coauila, México. p. 11.

Mata, A.I., Sánchez, D.L.F., y Luis González Hita. 1992. Estudio hidrogeoquímico e isotópico del acuífero granular de la Comarca Lagunera. Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua ( IMTA ).

McBride, B.C. and R.S. Wolfe. 1971. Biosíntesis de dimethylarsine by methanobacterium. Biochemistry. 10: 4312-4317.

Montemayor, T.J.A. 1988. Diagnóstico del hidroarsenicismo del acuífero de la Región Lagunera. Tesis de Maestría en Ciencias espec. Riego y Drenaje. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Saltillo. Coahuila, México. p. 7,27-29.

Moore, P.B. and Ito, J. 1978. Kraisslite, a new platy arsenosilicate from Sterling Hill, New Jersey. Am. Mineral. Vol. 63: 939.

National Academy of Sciences (NAS) 1977. Medical and biological effects of environmental pollutants : Arsenic. Washington. D.C. National Academy of Sciences.

Nishimura, T., Itoh, C.T., y K. Tozawa. 1988. Stabilities and solubilities of metal arsenites and arsenates in water and effect of sulfate and carbonate ions on their solubilities. U University of Nevada, Reno Nevada. p. 77-97.

- Onishi, F.H. 1969. " Arsenic " Handbook of Geochemistry. Ed. by Wadepohl. K.H. Springer-Verlag. Vol. 11 (1): 33.
- Ortiz, M.C., Olivera, T.R., y Verduzco, E. G. 1963. Intoxicación colectiva por Arsénico en Torreón, Coahuila, México. Valoración final. Bol. Epidemiológico (Méx.) 27: 220-252.
- Pontius, W.F. 1990. Water Quality and Treatment. A Handbook of Community Water Supplies. American Water Works Association. Fourth edition. McGraw-Hill, Inc.
- Ramana, G.R., L.H., James, y B.P. Queneau. 1988. Arsenic Metallurgy Fundamentals and Applications. University of Nevada. Reno. Nevada. p. 515.
- Rankama, K.D. y Sahama, H.D.G. 1962. Geoquímica. 2a. Edición. Editorial Aguilar. España. p. 687-690.
- Reinert, P.E. y J.A. Hroncich. 1990. Source Water Quality Management. Paramus, New Jersey. p.189
- Ridley, W.P., Dizikes, L.J., and J.M. Wood. 1977. Biomethylation of toxic elements in the environment. Science.. 197: 329-332.
- Sánchez de la Fuente, E. 1976. Arsenicismo crónico en la zona rural de la Comarca Lagunera. XXXIV Reunion anual de la Asociación Fronteriza Mexicana-Estadounidense de Salud Pública.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1977. Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la Región Lagunera de Coahuila-Durango. Elaborado por Técnicas Modernas S.A.
- Sergeyeva, E.I. and Khodakovsky, I.L. 1969. Physicochemical conditions of formation of native arsenic in hydrothermal deposits. Geo. Int. 846-859.

- Sirachi, D.Y., Shing, H.T., y John P. McGowan. 1986. Carcinogenic potential of arsenic compounds in drinking water. United States Environmental Protection Agency ( US EPA ). EPA/600/S1-86/003 June 1986.
- Sirachi, D.Y., Shing, H.T., y John P. McGowan. 1987. Carcinogenic effects of arsenic compounds in drinking water. United States Environmental Protection Agency. ( US EPA ). EPA/600/S1-87/007 Nov. 1987.
- Small, H. y C. McCants. 1962. Residual arsenic in soil and concentration in tobacco. Tobacco Sci. 6: 34-36.
- Tammes, P.M., y De Lint, M.M. 1969. Leaching of arsenic from soil. J. Agr. Sci. 17: 128.
- Torres de Navarro, E. 1976. Intoxicación arsenical en el ganado vacuno. Salud Pública. Méx. 18: 1037-1044.
- Wagner, S.L., Maliner, J.S., Morton, W.E., and R.S. Braman. 1979. Skin cancer and arsenical intoxication from well water. Arch. Dermatol. 115: 1205-1207.
- Walker, W.W. 1983. Significance of Eutrophication in Water Supply Reservoirs. Journal AWWA 75: 1 P.38
- Walsh, L.M., Sumner, M.E. y Keeney, D.R. 1977. Occurrence and distribution of arsenic in soils and plants. Environ. Health Perspec. 19: 67-61.
- Weaver, R.W., Melton, J.R., Deshin, W., y R.L. Doble. 1984. Uptake of arsenic and mercury from soil by Bermuda Grass. Environmental Pollution. 33: 133.
- Weiler, R.R. 1987. Ministry of the environment of Toronto, Ontario. Report No. 87-48-45000-057. U.S. EPA.

Wood, J.M. 1974. Biological cycles for toxic elements in the environment. *Science*. 183: 1049-1052.

Wood, J.M., and Y.T. Fanchiang. 1979. Mechanisms for B<sub>12</sub> dependent methylation. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. VII. No. 2.3 II Epoca. mayo-diciembre. p. 91.

Woolson, E.A., Axley, J.H. and P.C. Kearney. 1971. Correlation between available soil arsenic, estimated by six methods, and response to corn ( *Zea mays* L. ). *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35: 101-105.

Woolson, E.A. 1973. Arsenic phytotoxicity and uptake in six vegetable crops. *Weed Sci.* 21: 524.

Woolson, E.A. 1976. Generation of dimethylarsine from soil. Paper presented at 16th. Meeting, Weed Science Society of America. Paper No. 218.

Whanger, P.D., Weswing, P.H., y Stoner, J.C. 1977. Arsenic levels in Oregon waters. *Environ. Health Perspec.* 19: 139-143.

Zaldivar, r. 1974. Arsenic contamination of drinking water and foodstuffs causing endemic chronic poisoning. *Beitr. Pathol.* vol 151: 384-400.

**A N E X O**

## Cuadro A1 CLASSIFIED LISTING OF ARSENATE MINERALS

The minerals are classified according to the major cation in the structure. To find a named mineral, use the alphabetical index (Table A2) to determine its composition and hence major cation. Then refer to the relevant section in Table A1 to find the mineral. The names and compositions of associated minerals can be identified from Table A2 using the numbers given in the relevant column of Table A1.

Mineral	Formula	Crystal. Symmetry	Cell Dimensions (Å)	Associated Minerals	References
<b>Aluminium</b>					
Mansfieldite	$\text{AlAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 10.10 b = 9.66 c = 8.72	81, 161 242	5, 40, 111
Bulachite	$\text{Al}_2\text{AsO}_4(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 15.53 b = 17.78 c = 7.03	27, 38, 40, 127	231
Durangite	$\text{NaAlAsO}_4\text{F}$	Mon.	a = 6.57 b = 8.505 c = 7.019	67, 140	5, 90, 118
Alumopharmacosiderite	$\text{KAl}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 6.5\text{H}_2\text{O}$	Cub.	a = 7.745	68, 192 221, 242, 266	41
Arsenogoyazite	$\text{SrAl}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Hex.	a = 7.10 c = 17.16	58, 42, 188 221, 321	109
Arsenoflorencite-Cc RE = rare earths	$\text{REAl}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6$	Hex.	a = 7.029 c = 16.517		257

Liskcardite Al : Fe = 6 : 1	$(\text{AlFe})_3\text{AsO}_4(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Orth.	n.d.	29, 73, 249, 268	5
Ceruleite	$\text{Cu}_2\text{Al}_7(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_{13} \cdot 11.5\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 14.359 b = 14.687 c = 7.440	39, 192 242	102
Gerdtrummelite	$(\text{Zn,Fe})(\text{Al,Fe})_2\text{AsO}_4(\text{OH})_5$	Tric.	a = 5.169 b = 13.038 c = 4.931	242	42
Arsenocrandallite	$(\text{Ca,Sr})\text{Al}_3\text{H}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6$	Hex.	a = 7.08 c = 17.27	58, 72 192, 225	201
Sulphate-free weilerite	$\text{BaAl}_3\text{H}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6$	Hex.	a = 7.10 c = 17.39	312	201
Weilerite	$\text{BaAl}_3\text{AsO}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	Hex.	a = 7.05 c = 17.16	281	15
Kemmlitzite	$(\text{Sr,Ce,La})\text{Al}_3\text{AsO}_4(\text{P,S})\text{O}_4(\text{OH})_6$	Hex..	a = 7.072 c = 16.51	9, 17 323	130
<b>Barium</b>					
Morcelandite	$\text{Ba}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$	Hex.	a = 10.169 c = 7.315	64, 135	230
<b>Berilium</b>					
Bearsite	$\text{Be}_2\text{AsO}_4\text{OH} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 8.55 b = 36.90 c = 7.13	24, 86 202, 227 268, 300	148



## Bismuth

Rooseveltit	$\text{BiAsO}_4$	Mon.	a = 6.878 b = 7.163 c = 6.735	53	5, 228 229
Arsenobismite	$\text{Bi}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	n. d.		52, 53	5, 39
Preisingerite	$\text{Bi}_3\text{O}(\text{AsO}_4)_2\text{OH}$	Tric.	a = 9.933 b = 7.404 c = 6.937	51, 53	226, 254
Atleclsite	$\text{Bi}_8(\text{AsO}_4)_3\text{O}_5(\text{OH})_5$	Mon.	a = 10.88 b = 7.42 c = 6.98	52, 104 242	5, 64 163

## Calcium

Machatschkiite	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Hex.	a = 15.127 c = 22.4719	226, 232 260	184, 185
Raunthalite	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 12.564 b = 12.169 c = 6.195	232	204, 213 222
Phaunouxite	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 12.563 b = 12.181 c = 6.205	18, 107	204, 213
Johnbaumite	$\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})$	Hex.	a = 9.70 c = 6.73	112	239
Weilitz	$\text{CaHAsO}_4$	Tric.	a = 7.059 b = 6.890 c = 7.200	226	222, 223

Haindingerite	$\text{CaHAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 6.946 b = 16.14 c = 7.93	226, 232 260, 313	5, 186, 187, 188, 216, 222
Pharmacolite	$\text{CaHAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 5.974 b = 15.434 c = 6.2797	132, 232 237, 260 310, 313	5, 171, 216, 217 222
Sainfeldite	$\text{Ca}_5\text{H}_2(\text{AsO}_4)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 18.64 b = 9.81 c = 10.12	146, 226 232	222
Vladimirite	$\text{Ca}_5\text{H}_2(\text{AsO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 5.81 b = 10.19 c = 22.7	45, 102 242	214, 222
Gucrinite	$\text{Ca}_5\text{H}_2(\text{AsO}_4)_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 17.63 b = 6.734 c = 23.47	226, 232	155, 219 222
Ferrarisite	$\text{Ca}_5\text{H}_2(\text{AsO}_4)_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 8.294 b = 6.722 c = 11.198	232, 244	194, 199, 214
Talmessite	$\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 5.874 b = 6.943 c = 5.537	18, 94	90, 180, 191
Wendwilsonite	$\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 5.806 b = 12.912 c = 5.623	102, 285	177
Brandite	$\text{Ca}_2\text{Mn}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 5.66 b = 12.83 c = 5.66	39, 64 212, 261	5, 70 72, 190
Zincroselite	$\text{Ca}_2\text{Zn}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 5.832 b = 12.889 c = 5.644	242, 279 297	176

Gaitite	$\text{Ca}_2\text{ZnH}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2$	Tric.	a = 5.90 b = 7.61 c = 5.572	2, 37, 39 71, 86, 238, 242	178, 179
Adelite	$\text{CaMgAsO}_4\text{OH}$	Orth.	a = 5.88 b = 8.85 c = 7.43	57, 135 261	5, 39, 182
Bergslagite	$\text{CaBcAsO}_4\text{OH}$	Mon.	a = 4.8818 b = 7.809 c = 10.127		225, 246
Tilassite	$\text{CaMgAsO}_4\text{F}$	Mon.	a = 7.56 b = 8.95 c = 6.66	7, 39, 57, 64 86, 176	69, 193, 206, 208
Irtomite	$\text{Ca}_4\text{MgH}_2(\text{AsO}_4)_4$	Mon.	a = 16.73 b = 9.48 c = 10.84	102, 260	248
Fluckite	$\text{CaMnH}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 8.44 b = 7.608 c = 6.958	226, 232	195, 208, 218
Roselite	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Co})(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 5.801 b = 12.898 c = 5.617	64, 70	175, 177
Beta-roselite (Triclinoroselite)	$\text{Ca}_2(\text{Co,Mg})(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 5.88 b = 6.96 c = 5.58	64, 102 256	149, 191
Mcnearite	$\text{NaCa}_5\text{H}_4(\text{AsO}_4)_5 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 13.5 b = 14.10 c = 6.96	130, 132 226, 232	5, 114
Cafarsite ?	$\text{Ca}_3(\text{Fe Ti})_3 \text{Mn}(\text{AsO}_4)_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Cub.	a = 16.01		151, 200

Turneaucrite	$\text{Ca}_5((\text{As}, \text{P})\text{O}_4)_3\text{Cl}$	Hex.	a = 9.81 c = 6.868	10, 64 187	207
Picropharmacolite	$\text{Ca}_4\text{Mg}(\text{HAsO}_4)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 13.547 b = 13.500 c = 6.710	113, 194	5, 116, 220, 227
Svabite	$(\text{Ca}, \text{Pb})_5(\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$	Hex.	a = 9.72 c = 6.96	55, 123, 140 261, 263	237
<b>Cobalt</b>					
Erythrite	$(\text{Co}, \text{Ni})_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon	a = 10.18 b = 13.34 c = 4.73	2, 188, 207, 268, 283	5, 173 174
Cobaltkoritnigite	$(\text{Co}, \text{Zn})\text{HAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 7.95 b = 15.83 c = 6.67	39, 64, 102, 234, 242	32
Smolyaninovite	$(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Ca}, \text{Mg})_2(\text{Fe}, \text{Al})(\text{AsO}_4)_2\text{OH} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 6.40 b = 11.72 c = 21.9	243, 258, 269	233, 234
<b>Copper</b>					
Lammerite	$\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$	Mon.	a = 5.079 b = 11.611 c = 5.394	13, 174 221	87, 88
Olivinite	$\text{Cu}_2\text{AsO}_4\text{OH}$	Orth.	a = 8.16 b = 8.54 c = 5.86	2, 38 188, 226 242, 268	89, 90 96

Clinoclase	$\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)(\text{OH})_3$	Mon.	a = 7.24 b = 6.46 c = 12.38	88, 221	91
Euchroite	$\text{Cu}_2\text{AsO}_4\text{OH}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 10.05 b = 10.50 c = 6.11	38, 188 221, 280	5, 96 115
Arhbarite	$\text{Cu}_2\text{AsO}_4\text{OH}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 16.988 b = 15.901 c = 6.10	102, 140 181, 226	101
Cornubite	$\text{Cu}_5(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4$	Tric.	a = 6.121 b = 6.251 c = 6.790	82, 89 221	92, 93, 94
Cornwallite (Erinite)	$\text{Cu}_5(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4$	Mon.	a = 17.61 b = 5.81 c = 4.6	38, 82, 100, 179 188, 221	38, 62 92
Strashimirite	$\text{Cu}_8(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 9.71 b = 18.85 c = 8.94	38, 188 221	187
Conichalcite (Higginsite)	$\text{CaCuAsO}_4\text{OH}$	Orth.	a = 5.83 b = 9.22 c = 7.393	37, 38, 82, 177	20, 90, 96, 113, 181 240, 241,
Luethcite	$\text{Cu}_2\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4\cdot \text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 15.006 b = 5.189 c = 5.724	74, 140	105
Bayldonite	$\text{PbCu}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2$	Mon.	a = 5.03 b = 5.97 c = 6.93	38, 188, 221, 225	115
Lindackerite	$\text{H}_2\text{Cu}_5(\text{AsO}_4)_4(8-9)\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 3.95 b = 8.02 c = 6.277	15, 102, 264	5,

Chlorotic RE = rare earths	$\text{RECu}_6(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Hex.	a = 13.61 c = 5.92		98, 169
Mixite	$\text{Cu}_6\text{Bi}(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Hex.	a = 13.84 c = 5.9623	53, 210 269	104, 201
Geneveite	$(\text{Cu,Zn})_9(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_{12}$	Hex.	a = 8.26 c = 14.7	242, 300	100
Tyrolite	$\text{Cu}_9\text{Ca}_2(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_{10} \cdot (9-10)\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 10.50 b = 54.71 c = 5.59	38, 42 89, 172	115
Keyite	$(\text{Cu,Zn,Cd})_3(\text{AsO}_4)_2$	Mon.	a = 11.65 b = 12.68 c = 6.87	2, 221	108
Goudeyite	$\text{Cu}_6(\text{Al,Y})(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Hex.	a = 13.472 c = 5.902	82, 89, 161 221, 225	104, 211
Agardite	$\text{Cu}_6(\text{Y,CaH})(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Hex.	a = 13.55 c = 5.87	38, 91, 188, 242	98
Richelsdorfite	$\text{Ca}_2\text{Cu}_5\text{SbCl}(\text{OH})_6(\text{AsO}_4)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 14.17 b = 14.43 c = 13.57	64, 96, 288, 300	107
Lavendulanite (Freirinite)	$\text{Na}(\text{Cu,Ca})_6(\text{AsO}_4)_4\text{Cl}(4-5)\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 9.73 b = 41.0 c = 9.85	72, 102, 192	115
Liroconite	$\text{Cu}_2\text{Al}(\text{As,P})\text{O}_4(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 12.67 b = 7.55 c = 9.86	38, 82, 188	5, 96
Clinotyrolite	$\text{Cu}_9\text{Ca}_2(\text{AsO}_4, \text{SO}_4)_4(\text{OH}, \text{O})_{10} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$		a = 10.513 b = 5.56 c = 27.61		205

Theisite	$\text{Cu}_5\text{Zn}_5(\text{AsO}_4\text{,SbO}_4)_2(\text{OH})_{14}$	Orth.	a = 8.225 b = 7.123 c = 14.97	38, 188	99, 100
Philpsburgite	$(\text{Cu,Zn})_6(\text{AsO}_4\text{,PO}_4)_2(\text{OH})_6\cdot\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 12.33 b = 9.20 c = 10.69	33, 42, 92, 297	106
Parnauite	$\text{Cu}_9(\text{AsO}_4)_2(\text{SO}_4)(\text{OH})_{10}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 14.98 b = 14.223 c = 6.018	33, 82, 89, 188	104
Chalcophyllite	$\text{Cu}_{18}\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{27}\cdot 33\text{H}_2\text{O}$	Trig.	a = 10.77 c = 57.51	38, 51, 58, 203	38, 111
<b>Iron</b>					
Scorodite	$\text{FeAsO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 10.28 b = 10.00 c = 8.90	33, 51, 70 175, 227, 242, 305	5, 6, 8, 39
Kankite	$\text{FeAsO}_4\cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$	Cub.	a = 7.98	24, 51, 102 177, 234, 268	5, 8, 10 39
Kaatialaite	$\text{Fe}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 15.340 b = 19.800 c = 4.752	181	11, 12
Ferrisymplesite	$\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$			102	5
Symplesite	$\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 7.85 b = 9.39 c = 4.71	15, 102, 177, 227, 268	5, 112
Parasymplesite	$\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 10.276 b = 13.480 c = 4.711	219	12, 13

Angelclite	$\text{Fe}_4(\text{AsO}_4)_2\text{O}_3$	Tric.	a = <del>5.03</del> b = 6.49 c = 7.11	<del>54, 93</del> 232
Kolfanite	$\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_3\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 17.86 b = 19.66 c = 11.11	128
Chenevixite	$\text{Cu}_2\text{Fe}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 12.3 b = 15.4 c = 10.7	221, 268 38, 39
Carminite	$\text{PbFe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2$	Orth.	a = 16.595 b = 7.58 c = 12.295	12, 24, 51, 268 15, 18, 86, 111 153
Ojuelaite	$\text{ZnFe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 10.247 b = 9.665 c = 5.569	2, 127 268, 279 286 17
Mapimite	$\text{Zn}_2\text{Fe}^{3+}_3(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 11.425 b = 11.296 c = 8.667	2, 268, 270 17
Dussertite	$\text{BaFe}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_5\text{H}_2\text{O}$	Hex.	a = 7.4 c = 17.48	24, 65 5, 15
Pharmacosiderite	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Fe}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cub.	a = 7.98	24, 51, 102, 177, 234, 268, 283 1, 2, 3 4, 15
Bariumpharmacosiderite	$\text{BaFe}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Tetrag.	a = 7.97 b = 8.10 c = 3.0	39, 177 15, 35
Sodium-pharmacosiderite	$\text{Na}_2\text{OHFe}^{3+}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Cub.	a = 8.01	24, 29, 268 35
Bariumalumo-pharmacosiderite	$\text{Ba}(\text{Al}, \text{Fe})_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Cub.	a = 7.89	24, 268 15



Arseniosiderite (Mazapilite)	$\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}_4(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 17.76 b = 19.53 c = 11.30		144
Yukonite	$\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}_9(\text{AsO}_4)_6(\text{OH})_9 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Amorph.		219	37
Jamesite	$\text{Pb}_2\text{Zn}_2\text{Fe}^{3+}_5(\text{AsO}_4)_5\text{O}_4$	Tric.	a = 5.622 b = 9.593 c = 10.279	96, 127, 287	23
Ogdensburgite	$\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}_4(\text{Zn,Mn})^{2+}(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 11.381 b = 14.829 c = 6.569	2, 164, 182	196, 197
Sarmientite	$\text{Fe}_2\text{AsO}_4\text{SO}_4\text{OH} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 6.55 b = 18.55 c = 9.70	87, 109	25
Bukovskyite	$\text{Fe}_2\text{AsO}_4\text{SO}_4\text{OH} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 10.722 b = 14.079 c = 10.284		27, 36
Beudantite	$\text{PbFe}_3\text{AsO}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	Hcx.	a = 7.32 c = 17.02	65, 160, 268, 297	18, 30, 86, 111
Arthurite	$\text{Cu}_2\text{Fe}_4(\text{AsO}_4, \text{PO}_4, \text{SO}_4)_4(\text{O,OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 10.09 b = 9.62 c = 5.55	227, 268	34, 146 147
Zykaite	$\text{Fe}_4^{3+}(\text{AsO}_4)_3(\text{SO}_4)(\text{OH})15\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 20.853 b = 7.033 c = 36.991	131, 160, 177, 234, 268	26
Walentaite	$\text{H}_4(\text{Ca,Mn,Fe})_4\text{Fe}^{3+}_{12}(\text{AsO}_4)_{10}(\text{PO}_4)_6 \cdot 28\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 26.24 b = 10.31 c = 7.38	118, 181 208, 252	198

Obradovicite	$H_4(K,Na)CuFe_2AsO_4(MoO_4)_5 \cdot 12H_2O$	Orth.	a = 15.046 b = 14.848 c = 11.05	155, 316	183
Piticitic	$(Fe_2O_3)_{1-x-y}(ZnO)_x(CoO)_y As_2O_5 \cdot 9-10 H_2O$	Amorph.		84	32, 37
<b>Lead</b>					
Schultenite	$PbHAsO_4$	Mon.	a = 4.859 b = 6.756 c = 5.843	12, 38, 42, 203	5, 133
Mimetite	$Pb_5(AsO_4)_3Cl$	Hex.	a = 10.38 c = 7.54	92, 114, 315, 316	90, 97 131, 132
Sahlinite	$Pb_{14}(AsO_4)_2O_9Cl_4$	Mon.	a = 12.710 b = 22.498 c = 11.360	94, 135	5, 137
Caryadesite	$Pb_{16}(AsO_4)_4Cl_{14}(OH)_{16}$	Mon.	a = 13.83 b = 7.91 c = 10.812	110, 171, 215, 231	138
Gabrielsonite	$PbFeAsO_4OH$	Orth.	a = 7.86 b = 8.62 c = 5.98	39, 64, 111	22
Arsendesclöizite	$PbZnAsO_4OH$	Orth.	a = 6.075 b = 9.358 c = 7.634	71, 127, 203, 315	78, 79
Dufite	$PbCuAsO_4OH$	Orth.	a = 7.778 b = 9.207 c = 6.000	38, 69, 188, 317	111

Helmutwinklerite	$\text{PbZn}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 5.63 b = 7.76 c = 5.60	167, 242 311, 315	139
Hedyphane	$\text{Ca}_2\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$	Hex.	a = 10.14 c = 7.185	64, 134,	237, 238
Nealite	$\text{Pb}_4\text{Fe}(\text{AsO}_4)_2\text{Cl}_4$	Tric.	a = 6.537 b = 10.239 c = 5.589	15	21
Philipsbornite	$\text{PbAl}_3\text{H}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6$	Hex.	a = 7.11 c = 17.05	38, 42, 140 188, 297	50, 83 253
Arsenbrackebuschite	$\text{Pb}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Zn})(\text{AsO}_4)_2(\text{OH}, \text{H}_2\text{O})$	Mon.	a = 7.764 b = 6.045 c = 9.022	12, 42, 51, 203, 278	18, 33 85
Tsumcorite	$\text{PbZnFe}(\text{AsO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 9.131 b = 6.326 c = 7.583	12, 44 51	19, 24, 85
Duftite B	$\text{Pb}(\text{Cu}, \text{Ca})\text{AsO}_4\text{OH}$	Orth.	a = 7.49 b = 9.36 c = 5.9	96, 188, 203, 317	115
Thomtzekite	$\text{Pb}(\text{Cu}, \text{Zn})_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 22.40 b = 22.44 c = 7.67	131	252
Hidalgoite	$\text{PbAl}_3\text{AsO}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	Hex.	a = 7.04 c = 16.99	51, 177 293	15, 157
Arsentsumebite	$\text{Pb}_2\text{CuAsO}_4\text{SO}_4\text{OH}$	Mon.	a = 8.85 b = 5.92 c = 8.74	69, 151, 242, 316	24, 29

Fornacite	$\text{Pb}_2\text{CuAsO}_4\text{CrO}_4\text{OH}$	Mon.	a = 7.91 b = 5.91 c = 17.46		127
Molyfomacite	$\text{Pb}_2\text{CuOH}(\text{As,P})\text{O}_4(\text{Mo,Cr})\text{O}_4$	Mon.	a = 8.10 b = 5.946 c = 17.65	64,96 177,242	189
<b>Magnesium</b>					
Hoernesite	$\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 10.26 b = 13.44 c = 4.74	15,102 123	57, 58
Brassite	$\text{MgHAsO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 7.474 b = 10.891 c = 16.585	22, 132 226, 232	43
Rocsslerite	$\text{MgHAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 11.61 b = 25.92 c = 6.728	102, 132 226	5, 171
Johillerite	$\text{Na}(\text{MgZn})_3\text{Cu}(\text{AsO}_4)_3$	Mon.	a = 11.87 b = 12.755 c = 6.77	71, 86, 156, 286	80
Chudobaite	$(\text{Na,K})(\text{Mg,Zn})_2\text{H}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 7.69 b = 11.37 c = 6.59		170
Magnesium- Chlorophoenicite	$(\text{Mg}_{1.39}\text{Mn}_{1.18}\text{Zn}_{0.43})\text{Zn}_2(\text{OH})_6(\text{As}_{0.5}\text{H}_{0.5}(\text{O.OH})_3)_2$		n.d.	10, 64, 235	74

## Manganese

Sarkinite	$\text{Mn}_2\text{AsO}_4(\text{OH})$	Mon.	a = 12.779 b = 13.596 c = 10.208	26, 135, 136	39, 60
Eveite	$\text{Mn}_2\text{AsO}_4(\text{OH})$	Orth.	a = 8.57 b = 8.77 c = 6.27	6, 135	61
Sterlinghillite	$\text{Mn}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	n.d.		64, 181	129
Flinkite	$\text{Mn}^{2+}_2\text{Mn}^{3+}\text{AsO}_4(\text{OH})_4$	Orth.	a = 5.25 b = 13.11 c = 9.55	39, 55 261	63, 64
Jarosewichite	$\text{Mn}^{3+}\text{Mn}^{2+}_3(\text{AsO}_4)(\text{OH})_6$	Orth.	a = 6.56 b = 25.20 c = 10.00	10, 63, 112, 116, 135	73
Arsenoclasite	$\text{Mn}_5(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4$	Orth.	a = 18.29 b = 5.75 c = 9.31	3, 221	62, 69
Allactite	$\text{Mn}_7(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_8$	Mon.	a = 11.03 b = 12.12 c = 5.51	3, 39, 61, 76, 175, 315	68, 69 143
Krautite	$\text{MnHAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 8.012 b = 15.956 c = 6.801	226	215, 216 218
Retzian (Y rare earth content)	$\text{Mn}_2\text{Y}^{3+}(\text{AsO}_4)(\text{OH})_4$	Orth.	a = 5.67 b = 12.03 c = 4.863	57, 94, 152, 240	65
Retzian(La)	$\text{Mn}_2\text{La}(\text{AsO}_4)(\text{OH})_4$	Orth.	a = 5.67 b = 12.01 c = 4.869	64, 116, 315	66

Retzian(Nd)	$\text{Mn}_2\text{Nd}(\text{AsO}_4)(\text{OH})_4$	Orth.	a = 5.69 b = 12.12 c = 4.874	64, 116, 249, 315	67
Manganese hocmesite	$(\text{Mn},\text{Mg})_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 10.38 b = 28.04 c = 4.74		59
Akrochordite	$\text{Mn}_4\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 5.70 b = 17.60 c = 6.752	39, 105, 135, 240	5, 39 65, 69
Wallkilldellite	$\text{Ca}_4\text{Mn}_6(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Hex.	a = 6.506 c = 23.49	2	247
Chlorophoenicite	$(\text{Mn},\text{Mg})_3(\text{Zn})_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})_7$	Mon.	a = 22.98 b = 3.32 c = 7.32	6, 120, 175, 240	5, 74 75
Villyaelenite	$\text{H}_2(\text{Mn},\text{Ca})_5(\text{AsO}_4)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 18.55 b = 9.52 c = 10.01	113, 209 226, 232	236
Manganberzeliite	$(\text{Ca},\text{Na})_3(\text{Mn},\text{Mg})_2(\text{AsO}_4)_3$	Cub.	a = 12.32	66, 135	5, 70
Grischunite	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mn},\text{Fe})_2(\text{AsO}_4)_2$	Orth.	a = 12.913 b = 13.48 c = 12.076	55, 189 261, 291	210
Berzeliite	$(\text{Ca},\text{Na})_3(\text{Mg},\text{Mn})_2(\text{AsO}_4)_3$	Cub.	a = 12.35-12.5	66, 135 250, 287	70
Caryinite (Arseniopleite)	$\text{Na}_4(\text{Ca},\text{Pb})_4(\text{Ca},\text{Mn})_4(\text{Mn},\text{Mg})_8(\text{AsO}_4)_{12}$	Mon.	a = 11.48 b = 13.17 c = 6.87	48, 64, 135, 136	28, 65, 154, 251
Synadelphite (Hemafibrite)	$\text{Mn}^{2+}_9(\text{AsO}_3)(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_9 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 9.93 b = 17.74 c = 10.67	7, 64, 141, 152, 240	71, 79

Hematolite	$(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Al})_5 \text{AsO}_3 (\text{AsO}_4)_2 (\text{OH})_{23}$	Hex.	a = 8.29 c = 36.58	39, 114, 152 186, 187	5, 244
Holdenite	$\text{Mn}_6 \text{Zn}_3 (\text{AsO}_4)_2 \cdot \text{SiO}_4 (\text{OH})_8$	Orth.	a = 11.99 b = 31.21 c = 8.60	39, 122 240, 315	76, 84
Kolicite	$\text{Mn}_7 \text{Zn}_4 (\text{AsO}_4)_2 (\text{SiO}_4)_2 (\text{OH})_8$	Orth.	a = 18.59 b = 8.784 c = 12.04		245
Kraisslite	$(\text{Mn}^{+2}_{0.89} \text{Mg}_{0.08} \text{Fe}^{2+}_{0.03})_{24} \text{Zn}_4 (\text{AsO}_4)_4 (\text{SiO}_4)_8 (\text{OH})_{12}$	Hex.	a = 8.22 c = 43.88	39, 240, 250, 276	77
<b>Mercury</b>					
Chursinite	$(\text{Hg}_2)_3 (\text{AsO}_4)_2$	Mon.	a = 8.93 b = 5.01 c = 12.38		172
<b>Nickel</b>					
Xanthiosite	$\text{Ni}_3 (\text{AsO}_4)_2$	Mon.	a = 10.174 b = 9.548 c = 5.766	4	117
Aerugite	$\text{Ni}_6 (\text{AsO}_4)_2 \text{O}_3$	Mon.	a = 10.29 b = 5.95 c = 9.79	318	117
Annabergite	$(\text{Ni}, \text{Co})_3 (\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 10.922 b = 13.284 c = 4.698		5, 212

Cabrerite (variety of annabergite)	$(\text{Ni,Mg})_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 19.211 b = 13.335 c = 4.728	14, 64, 242	212
Forbesite	$\text{H}_2(\text{Ni,Co})_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	n. d.			5
<b>Uranium</b>					
Hallimondite	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)(\text{AsO}_4)_2$	Tric.	a = 7.12 b = 10.47 c = 6.84	149, 203	136
Abernathyite	$\text{K UO}_2 \text{AsO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.17 c = 18.126	202, 268	141, 142
Arsenouranylite	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_4\text{AsO}_4(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Orth.	a = 15.40 b = 17.40 c = 13.768	202, 216 265, 303	145
Uranospinite	$\text{Ca}(\text{UO}_2 \text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.15 c = 20.61	201, 296 309	256
Metauranospinite	$\text{Ca}(\text{UO}_2 \text{AsO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.14 c = 17.00	201, 296 309	256
Zcuncrite	$\text{Cu}(\text{UO}_2 \text{AsO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.18 c = 20.79	301	161, 164
Meta-zcuncrite	$\text{Cu}(\text{UO}_2 \text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.12 c = 17.40	301	161, 164 165
Heinrichite	$\text{Ba}(\text{UO}_2 \text{AsO}_4)_2 \cdot 10-12\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.13 c = 20.56	24, 102, 216 234, 321	156
Meta-heinrichite	$\text{Ba}(\text{UO}_2 \text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.07 c = 17.74	321	156



Novacckite	$\text{Mg}(\text{UO}_2\text{AsO}_4)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.11 c = 20.06	30, 137	161
Troegerite	$\text{H}(\text{UO}_2\text{AsO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.16 c = 8.80	202, 309	161, 162
Kahlerite	$\text{Fe}(\text{UO}_2\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 14.30 c = 21.97	234, 268, 283	160, 161
Sodium uranospinite	$(\text{Na}_2\text{Ca})(\text{UO}_2\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.12 c = 8.61	29, 239, 233	140
Huegelite	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Mon.	n.d.	69, 133 203, 321	162
Metakahlerite	$\text{Fe}^{2+}(\text{UO}_2\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.18 c = 8.58	24, 268	166
Kirchheimerite	$\text{Co}(\text{UO}_2\text{AsO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 14.29 c = 21.92	102, 195, 196, 216	256
Metakirchheimerite	$\text{Co}(\text{UO}_2\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.18 c = 8.58	102, 195, 196, 216	163, 165
Metanovacckite	$\text{Mg}(\text{UO}_2\text{AsO}_4)_2 \cdot (4-8)\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.16 c = 8.85		164
Walpurgite	$\text{Bi}_4\text{O}_4(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 7.135 b = 10.426 c = 5.494	292, 296 302, 303, 321	163, 167
Arsenuranospathite	$\text{HAl}(\text{UO}_2)_4(\text{AsO}_4)_4 \cdot 40\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.16 c = 30.37	39, 177, 321	192
Metaloderite	$\text{Zn}(\text{UO}_2\text{AsO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Tetr.	a = 7.16 c = 17.20		249
Naurasphyllite	$\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_3\text{UO}_2\text{AsO}_4$	Tetr.	a = 7.12 c = 8.61		39

Asselbornite	$(\text{Pb,Ba})(\text{UO}_2)_6(\text{BiO})_4[(\text{As,P})\text{O}_4]_2(\text{OH})_{12}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Cub.	a = 15.66		168
<b>Yttrium</b>					
Chemovite	$\text{YAsO}_4$	Tetr.	a = 7.04 c = 6.27	64, 123 140, 241	255
<b>Zinc</b>					
Adamite	$\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$	Orth.	a = 8.306 b = 8.524 c = 6.043	42, 142 267, 286	18, 44, 45 46, 47, 49, 111
Paradamite	$\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$	Tric.	a = 5.81 b = 6.67 c = 5.63	2, 177, 203	46, 48 49, 50
Warikahnite	$\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 6.717 b = 8.989 c = 14.533	81, 167 183, 279, 297	51
Koettigite	$\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 10.241 b = 13.405 c = 4.757	2, 36, 173, 227 268	5, 13 52, 53 54, 55, 123
Legrandite	$\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 12.785 b = 7.916 c = 10.218	2, 164, 227	53, 122, 124, 125
Koritnigite	$\text{ZnHAsO}_4\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 7.948 b = 15.829 c = 6.668	2, 167	221
Stranskiite	$\text{Zn}_2\text{Cu}(\text{AsO}_4)_2$	Tric.	a = 5.05 b = 6.77 c = 5.28	71	119, 120 224

Austinite	$\text{CaZnAsO}_4\text{OH}$	Orth.	a = 7.506 b = 9.046 c = 5.932	2, 177 242	181, 250
Metakoctigite	$(\text{ZnFe}^{3+})(\text{Zn}, \text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+})_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O}, \text{OH})$	Tric.	a = 7.96 b = 9.44 c = 4.72	2, 164	56
Prosperite	$\text{HCaZn}_2(\text{AsO}_4)_2\text{OH}$	Mon.	a = 19.238 b = 7.731 c = 9.765	2, 37, 71, 86, 121, 167	81, 82 209
Lotharmeyerite	$\text{CaZnMn}^{3+}\text{AsO}_4\text{OH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 9.066 b = 6.276 c = 7.408	2, 190	202, 203
O'Danielite	$\text{Na}(\text{Zn}, \text{Mg})_3\text{H}_2(\text{AsO}_4)_3$	Mon.	a = 12.113 b = 12.445 c = 6.793	86, 167	50, 121
<b>Miscellaneous</b>					
Dugganite	$\text{Pb}_3(\text{ZnCu})_3(\text{Te}^{+6}\text{O}_6)_x(\text{AsO}_4)_{2-x}(\text{OH})_{6.3x}$	Hex	a = 8.472 c = 5.208	69	110
Macgovernite	$\text{Mg}_4\text{Mn}_9\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{AsO}_4)_2\text{O}(\text{OH})_{14}$	Hex.	a = 8.22 c = 20.5		7
Cahnite	$\text{Ca}_2\text{BAsO}_4(\text{OH})_4$	Tetr.	a = 7.095 c = 6.19		103, 152
Fermorite	$(\text{Ca}, \text{Sr})_5(\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$	Hex	a = 9.60 c = 6.96		5, 39

Betpakdalite	$\text{CaFe}_2\text{H}_8[(\text{MoO}_4)_5(\text{AsO}_4)_2] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Mon	a = 19.44 b = 11.096 c = 15.25	2,71,93 143, 242	31, 150
Sodium betpakdalite	$(\text{Na}, \text{Ca})_3\text{Fe}_2[(\text{AsO}_4)_2(\text{MoO}_4)_6] \cdot 15\text{H}_2\text{O}$	Mon.	a = 11.28 b = 19.30 c = 17.67	108, 127, 131, 155 222	235
Kamitugaite	$\text{PbAl}(\text{UO}_2)_5[(\text{P}, \text{As})\text{O}_4]_2(\text{OH})_9 \cdot 9.5\text{H}_2\text{O}$	Tric.	a = 10.98 b = 15.96 c = 9.068		16
Schlossmacherite	$(\text{H}_3\text{O}, \text{Ca})\text{Al}_3((\text{OH})_6((\text{S}, \text{As})\text{O}_4)_2$	Hex	a = 6.998 c = 16.67	39, 74 , 127, 192, 227, 242	242

**Cuadro A2 ALPHABETICAL INDEX OF ARSENATE AND ASSOCIATED MINERALS**

1	abcmathyite	$\text{KUO}_2\text{AsO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
2	adanite	$\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$
3	adelite	$\text{CaMgAsO}_4\text{OH}$
4	aerugite	$\text{Ni}_6(\text{AsO}_4)_2\text{O}_3$
5	agardite	$\text{Cu}(\text{Y}, \text{CaH})(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
6	akrochordite	$\text{Mn}_4\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
7	allactite	$\text{Mn}_7(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_8$
8	alumopharmacosiderite	$\text{KAl}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 6.5\text{H}_2\text{O}$
9	anatase	$\text{TiO}_2$
10	andradite	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$
11	angelellite	$\text{Fe}_4(\text{AsO}_4)_2\text{O}_3$
12	anglesite	$\text{PbSO}_4$
13	anhydrite	$\text{CaSO}_4$
14	ankerite	$2\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{FeCO}_3$
15	annabergite	$\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
16	aolite	$\text{Al}_6(\text{Ta}, \text{Sb}, \text{Li})(\text{SiO}_4)_3\text{BO}_3(\text{O}, \text{OH})_3$
17	apatite	$\text{Ca}_2\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$
18	aragonite	$\text{CaCO}_3$
19	arhbarite	$\text{Cu}_2\text{AsO}_4\text{OH} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
20	arsenbrackebuschite	$\text{Pb}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Zn})(\text{AsO}_4)_2(\text{OH}, \text{H}_2\text{O})$
21	arsendesclowitzite	$\text{PbZnAsO}_4\text{OH}$
22	arsenic	As
23	arsenopleite = caryinite	
24	arseniosiderite	$\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}_4(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_3(\text{AsO}_4)_4$
25	arsenobismite	$\text{Bi}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_3$
26	arsenoclasite	$\text{Mn}_5(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4$
27	arsenocrandallite	$(\text{Ca}, \text{Sr})\text{Al}_3\text{H}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6$
28	arsenogoyazite	$\text{SrAl}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$
29	arsenopyrite	FeAsS
30	arsenouranylite	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_4(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
31	arsentsumebite	$\text{Pb}_2\text{CuAsO}_4\text{SO}_4\text{OH}$
32	arsenuranospathite	$\text{HAl}(\text{UO}_2)_4(\text{AsO}_4)_4 \cdot 40\text{H}_2\text{O}$
33	arthurite	$\text{Ca}_2\text{Fe}_4(\text{AsO}_4, \text{PO}_4, \text{SO}_4)_4(\text{O}, \text{OH})_4 \cdot 8\text{HO}$
34	asselbornite	$(\text{Pb}, \text{Ba})(\text{UO}_2)_6(\text{BiO})_4[(\text{As}, \text{P})\text{O}_4]_2(\text{OH})_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
35	atelestite	$\text{Bi}_8(\text{AsO}_4)_3\text{O}_5(\text{OH})_5$
36	aurichalcite	$\text{Zn}_3\text{Cu}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$
37	austinite	$\text{CaZnAsO}_4\text{OH}$
38	azurite	$\text{Cu}_2\text{Cu}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
39	barite	$(\text{Ba}, \text{Sr})\text{SO}_4$
40	bariumalumopharmacosiderite	$\text{Ba}(\text{Al}, \text{Fe})_4(\text{OH})_5(\text{AsO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
41	bariumpharmacosiderite	$\text{BaFe}_4(\text{OH})_4(\text{AsO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
42	bayldonite	$\text{PbCu}_3(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_2$
43	bearsite	$\text{BeAsO}_4\text{OH} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
44	beaverite	$\text{PbCuFe}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$

45	belovite	$\text{NaSr}_3\text{Ce}(\text{PO}_4)_3\cdot\text{OH}$
46	bergsлагite	$\text{CaBeAsO}_4\text{OH}$
47	beryl	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
48	berzeliite	$(\text{Ca},\text{Na})_3(\text{Mg},\text{Mn})_2(\text{AsO}_4)_3$
49	beta-roselite	$\text{Ca}_2\text{Co},\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
50	betpakdalite	$\text{CaFe}_2\text{H}_8(\text{MoO}_4)_5(\text{AsO}_4)_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
51	beudantite	$\text{PbFe}_3\text{AsO}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$
52	bindheimite	$\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$
53	bismutite	$\text{Bi}_2(\text{CO}_3)_2\text{O}_2$
54	bornite	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$
55	brandite	$\text{Ca}_2\text{Mn}(\text{AsO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
56	brassite	$\text{MgHAsO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
57	braunite	$\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_6\text{SiO}_{12}$
58	brochantite	$\text{Cu}_2\text{SO}_4(\text{OH})_6$
59	bukovskiyite	$\text{Fe}_2\text{AsO}_4\text{SO}_4\text{OH}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$
60	bulachite	$\text{Al}_2\text{AsO}_4(\text{OH})_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
61	cabrerite	$(\text{Ni},\text{Mg})_3(\text{AsO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$
62	cafarsite	$\text{Ca}_3(\text{Fe},\text{Ti})_3\text{Mn}(\text{AsO}_4)_6\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
63	cahnite	$\text{Ca}_2\text{AsO}_4[\text{B}(\text{OH})_4]$
64	calcite	$\text{CaCO}_3$
65	carminite	$\text{PbFe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2$
66	caryinite	$\text{Na}_4(\text{Ca},\text{Pb})_4(\text{Ca},\text{Mn})_4(\text{Mn},\text{Mg})_8(\text{AsO}_4)_{12}$
67	cassiterite	$\text{SnO}_2$
68	ceruleite	$\text{Cu}_7\text{Al}_7(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_{13}\cdot 6.5\text{H}_2\text{O}$
69	cerussite	$\text{PbCO}_3$
70	chalcodony	$\text{SiO}_2$
71	chalcocite	$\text{Cu}_2\text{S}$
72	chalcophyllite	$\text{Cu}_{18}\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{27}\cdot 33\text{H}_2\text{O}$
73	chalcopyrite	$\text{CuFeS}_2$
74	chenevixite	$\text{Cu}_7\text{Fe}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4\cdot \text{H}_2\text{O}$
75	chloanthite	$(\text{Ni},\text{Co})\text{As}_3$
76	chlorite	Aluminium silicate with ferrous iron, magnesium and chemically combined water $(\text{H}_4\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_4)$ $(\text{H}_4\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{SiO}_9)$
77	chlorophoenicite	$(\text{Mn},\text{Mg})_3\text{Zn}_2\text{AsO}_4(\text{OH})_7$
78	chlorotile	$\text{R.E. Cu}_6(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ R.E. = Rare earth elements.
79	chudobaite	$(\text{Na},\text{K})(\text{Mg},\text{Zn})_2\text{H}(\text{AsO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
80	chursinite	$(\text{Hg}_2)_3(\text{AsO}_4)_2$
81	claudetite	$\text{As}_2\text{O}_3$
82	clinoclase	$\text{Cu}_3\text{AsO}_4(\text{OH})_3$
83	clintyrolite	$\text{Cu}_9\text{Ca}_2[(\text{As},\text{S})\text{O}_4]_4(\text{OH},\text{O})_{10}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
84	cobaltkoritnigite	$(\text{Co},\text{Zn})\text{HAsO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$
85	columbite	$(\text{Mn},\text{Fe})(\text{Ta},\text{Nb})_2\text{O}_6$
86	conichalcite	$\text{CaCuAsO}_4\text{OH}$
87	copiapite	$(\text{Mg},\text{Fe})\text{Fe}_4(\text{H}_2\text{O})_{20}(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2$
88	cornubite	$\text{Cu}_5(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4$
89	cornwallite	$\text{Cu}_5(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4$

90	cuprian adamite	$(Zn,Cu)_2AsO_4OH$
91	cuprite	$Cu_2O$
92	descloizite	$Pb(Zn,Cu)VO_4OH$
93	digenite	$Cu_8^{1+}Cu^{2+}S_5$
94	dolomite	$Ca(Mg,Fe)(CO_3)_2$
95	domeykite	$Cu_3As$
96	duftite	$PbCuAsO_4OH$
97	duftite beta	$(Cu,Ca)PbAsO_4OH$
98	durangite	$NaAlAsO_4F$
99	dussertite	$BaFe_3(AsO_4)_2(OH)_5H_2O$
100	enargite	$Cu_3As_4$
101	erinite = cornwallite	
102	erythrite	$(Co,Ni)_3AsO_4 \cdot 8H_2O$
103	euchroite	$Cu_2AsO_4OH \cdot 3H_2O$
104	eulytite	$Bi_4(SiO_4)_3$
105	eveite	$Mn_2AsO_4OH$
106	fermorite	$(Ca,Sr)_5(AsO_4,PO_4)_3(F,OH)$
107	ferrarisite	$Ca_5H_2(AsO_4)_4 \cdot 9H_2O$
108	ferrimolybdenite	$Fe^{3+}_2(MoO_4)_3 \cdot 7H_2O$
109	fibroferrite	$Fe(SO_4)OH \cdot 5H_2O$
110	fiedlerite	$Pb_3(OH)_2Cl_4$
111	finnemanite	$Pb_5As_3O_9Cl$
112	flinkite	$Mn^{2+}_2Mn^{3+}AsO_4(OH)_4$
113	fluckite	$CaMnH_2(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$
114	fluorite	$CaF_2$
115	forbesite	$H_2(Ni,Co)_2(AsO_4)_2 \cdot 7H_2O$
116	franklinite	$ZnFe_2O_4$
117	friedelite	$Mn_{16}(Si_{12}O_{30})(OH)_{20}$
118	frondelite	$(Mn,Fe)Fe_4(PO_4)_3(OH)_5$
119	gabrielsonite	$PbFeAsO_4OH$
120	gageite	$Mg_2Mn_5Si_3O_{10}(OH)_6$
121	gaitite	$Ca_2ZnH_2(AsO_4)_2(OH)_2$
122	galena	$PbS$
123	garnet	$RII_3RIII_2(SiO_4)_3$ $RII = Ca, Mg, Fe^{2+}, Mn^{2+}$ $RIII = Al, Fe^{3+}, Cr, Ti^{3+}$
124	geneveite	$(Cu,Zn)_9(AsO_4)_2(OH)_{12}$
125	georgiadesite	$Pb_9(AsO_4)_4Cl_{14}(OH)_{16}$
126	gerdtremmelite	$(Zn,Fe)(Al,Fe)_2AsO_4(OH)_5$
127	goethite	$FeOOH$
128	goudeyite	$Cu_6(Al,Y)(AsO_4)_3(OH)_6 \cdot 3H_2O$
129	grischunite	$(Ca,Na)(Mn,Fe)_2(AsO_4)_2$
130	guerinite	$Ca_5H_2AsO_4 \cdot 9H_2O$
131	gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
132	haindingerite	$CaHASO_4 \cdot H_2O$
133	hallimondite	$Pb_2(UO_2,AsO_4)_2$
134	hancockite	$(Ca,Pb)_2(Al,Sr)_2O_3 \cdot FeSi_3O_{12}OH$
135	hausmannite	$MnMn_2O_4$
136	hedyphane	$Ca_2Pb_3(AsO_4)_3Cl$

137	heinrichite	$\text{Ba}(\text{UO}_2, \text{AsO}_4)_2 \cdot (10-12)\text{H}_2\text{O}$
138	helmutwinklerite	$\text{PbZn}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
139	hemafibrite = synadelphite	
140	hematite	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
141	hematolite	$(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Al})_5\text{AsO}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2$
142	hemimorphite	$\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
143	hidaigoite	$\text{PbAl}_3\text{AsO}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$
144	higginsite = conichalsite	
145	hodgkinsonite	$\text{MnZn}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_2$
146	hoernesite	$\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
147	holdenite	$\text{Mn}_6\text{Zn}_3(\text{OH})_8(\text{AsO}_4)_2\text{SiO}_4$
148	hollandite	$\text{BaMnMn}_7\text{O}_{16}$
149	huegelite	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
150	irhemite	$\text{Ca}_4\text{MgH}_2(\text{AsO}_4)_4$
151	iron oxides	hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )
152	jacobsite	$\text{MnFe}_2\text{O}_4$
153	jamesite	$\text{Pb}_2\text{Zn}_2\text{Fe}^{3+}_5(\text{AsO}_4)_5\text{O}_4$
154	jarosewichite	$\text{Mn}^{3+}\text{Mn}^{2+}_3\text{AsO}_4(\text{OH})_6$
155	jarosite	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
156	johillerite	$\text{Na}(\text{Mg}, \text{Zn})_3\text{Cu}(\text{AsO}_4)_3$
157	johnbaumite	$\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{OH}$
158	kaatialaite	$\text{Fe}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
159	kahlerite	$\text{Fe}^{2+}(\text{UO}_2, \text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
160	kankite	$\text{FeAsO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$
161	kaolinite	$\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$
162	kemmlitzite	$(\text{Sr}, \text{Ce}, \text{La})\text{Al}_3\text{AsO}_4(\text{P}, \text{S})\text{O}_4(\text{OH})_6$
163	keyite	$(\text{Cu}, \text{Zn}, \text{Cd})_3(\text{AsO}_4)_2$
164	koettigite	$\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
165	kolfanite	$\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_3\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
166	kolicite	$\text{Mn}_7\text{Zn}_4(\text{AsO}_4)_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_8$
167	koritnigite	$\text{ZnHASO}_4\text{H}_2\text{O}$
168	kraisslite	$(\text{Mn}^{2+}_{0.89}\text{Mg}_{0.08}\text{Fe}^{2+}_{0.03})_2\text{Zn}_4(\text{AsO}_4)_4(\text{SiO}_4)_8(\text{OH})_{12}$
169	krautite	$\text{MnHASO}_4\text{H}_2\text{O}$
170	lammerite	$\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$
171	laurionite	$\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$
172	lavandulanite	$\text{Na}(\text{Cu}, \text{Ca})_6(\text{AsO}_4)_4\text{Cl}(4-5)\text{H}_2\text{O}$
173	legrandite	$\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH} \cdot \text{H}_2\text{O}$
174	leightonite	$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Cu}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
175	leucophoenicite	$\text{Mn}_7(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})_2$
176	limestone	$\text{CaCO}_3$
177	limonite = mixture of hydrous iron oxides (mainly goethite)	
178	lindackerite	$\text{H}_2\text{Cu}_5(\text{AsO}_4)_4 \cdot (8-9)\text{H}_2\text{O}$
179	liroconite	$\text{Cu}_2\text{Al}[(\text{As}, \text{P})\text{O}_4](\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
180	liskeardite	$(\text{AlFe}^{3+})_3(\text{OH})_6\text{AsO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
181	loellingite	$\text{FeAs}_2$
182	lotharmeyerite	$\text{CaZnMn}^{3+}\text{AsO}_4\text{OH} \cdot \text{H}_2\text{O}$
183	ludlockite	$\text{PbFeg}(\text{As}_2\text{O}_6)_9$



184	luetheite	$\text{Cu}_2\text{Al}_2(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4\text{H}_2\text{O}$
185	machatschkiite	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
186	magnesium-chlorophoenicite	$(\text{Mg}_{1.39}\text{Mn}_{1.18}\text{Zn}_{0.43})\text{Zn}_2(\text{OH})_6[\text{As}_{0.5}\text{H}_{0.5}(\text{O.OH})_3]_2$
187	magnetite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
188	malachite	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
189	manganberzeliite	$(\text{Ca,Na})_3(\text{Mn,Mg})_2(\text{AsO}_4)_3$
190	manganese oxides	$\text{Mn}_2\text{O}_3$ (Bixbyite), $\text{MnO}$ (Manganosite)
191	manganese-hoernesite	$(\text{Mn,Mg})_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
192	mansfieldite	$\text{AlAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
193	mapimite	$\text{Zn}_2\text{Fe}^{3+}_3(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
194	mcnearite	$\text{NaCa}_5\text{H}_4(\text{AsO}_4)_5 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
195	meta-heinrichite	$\text{Ba}(\text{UO}_2 \cdot \text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
196	metakahlerite	$\text{Fe}(\text{UO}_2 \cdot \text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
197	metakirchheimerite	$\text{Co}(\text{UO}_2 \cdot \text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
198	metakoettigite	$(\text{Zn,Fe}^{3+})(\text{Zn,Fe}^{3+},\text{Fe}^{2+})_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O,OH})$
199	metaloderite	$\text{Zn}(\text{UO}_2 \cdot \text{AsO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
200	metanovacekite	$\text{Mg}(\text{UO}_2 \cdot \text{AsO}_4)_2(4-8)\text{H}_2\text{O}$
201	metauranocircite	$\text{Ba}(\text{UO}_2 \cdot \text{PO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
202	metazeunerite	$\text{Cu}(\text{UO}_2 \cdot \text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
203	mimelite	$\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$
204	mixite	$\text{Cu}_6\text{Bi}(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
205	molybdenite	$\text{Pb}_2\text{CuOH}(\text{As,P})\text{O}_4(\text{Mo,Cr})\text{O}_4$
206	morelandite	$\text{Ba}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$
207	morenosite	$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
208	muscovite	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
209	native arsenic	As
210	native bismuth	Bi
211	native copper	Cu
212	native lead	Pb
213	natrojarosite	$\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
214	naurasphyllite	$\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{UO}_2 \cdot \text{AsO}_4)$
215	nealite	$\text{Pb}_4\text{Fe}(\text{AsO}_4)_2\text{Cl}_4$
216	novacekite	$\text{Mg}(\text{UO}_2 \cdot \text{AsO}_4)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
217	o'danielite	$\text{Na}(\text{Zn,Mg})_3\text{H}_2(\text{AsO}_4)_3$
218	obradovicite	$\text{H}_4(\text{K,Na})\text{CuFe}_2\text{AsO}_4(\text{MoO}_4)_5 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
219	ogdensburgite	$\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}_4(\text{Zn,Mn})^{2+}(\text{AsO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
220	ojuelaite	$\text{ZnFe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot (\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
221	olivinite	$\text{Cu}_2\text{AsO}_4\text{OH}$
222	opal	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
223	paradamite	$\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$
224	parasymplectite	$\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
225	parnauite	$\text{Cu}_9(\text{AsO}_4)_2\text{SO}_4(\text{OH})_{10} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
226	pharmacolite	$\text{CaHAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
227	pharmacosiderite	$(\text{K,H}_3\text{O})\text{Fe}_4(\text{OH})_4(\text{AsO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
228	phaunouxite	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
229	philipsbornite	$\text{PbAl}_3\text{H}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6$

230	philpsburgite	$(\text{Cu,Zn})_6(\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
231	phosgenite	$\text{Pb}_2\text{CO}_3\text{Cl}_2$
232	picroparmacolite	$\text{Ca}_4\text{Mg}(\text{HAsO}_4)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
233	pitchblende	$\text{UO}_2, \text{UO}_3, \text{ThO}_2, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{MnO}, \text{PbO}, \text{etc}$
234	pitticite	$(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{1-x-y}(\text{ZnO})_x(\text{CoO})_y\text{As}_2\text{O}_5 \cdot (9-10)\text{H}_2\text{O}$
235	plumcusulasite = arsentsumebite	
236	powellite	$\text{CaMoO}_4$
237	preisingerite	$\text{Bi}_3\text{O}(\text{AsO}_4)_2\text{OH}$
238	prospelite	$\text{HCaZn}_2(\text{AsO}_4)_2\text{OH}$
239	pyrite	$\text{FeS}_2$
240	pyrochroite	$\text{Mn}(\text{OH})_2$
241	pyrolusite	$\text{MnO}_2$
242	quartz	$\text{SiO}_2$
243	rammelsbergite	$\text{NiAs}_2$
244	rauenthalite	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
245	reinerite	$\text{Zn}_3(\text{AsO}_3)_2$
246	retzian	$\text{Mn}_2\text{Y}^{3+}\text{AsO}_4(\text{OH})_4$
247	retzian (La)	$\text{Mn}_2\text{LaAsO}_4(\text{OH})_4$
248	retzian (Nd)	$\text{Mn}_2\text{NdAsO}_4(\text{OH})_4$
249	rhodochrosite	$\text{MnCO}_3$
250	rhodonite	$\text{MnSiO}_3$
251	richelsdorfite	$\text{Ca}_2\text{Cu}_5\text{Sb}[\text{Cl}(\text{OH})_6(\text{AsO}_4)_4] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
252	rockbridgeite	$(\text{Mn,Fe})\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_5$
253	romeite	$\text{Ca}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$
254	roosevelite	$\text{BiAsO}_4$
255	rosasite	$(\text{ZnCu})_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
256	roselite	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Co})(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
257	roesslerite	$\text{HMgAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
258	safflorite	$\text{CoAs}_2$
259	sahlinite	$\text{Pb}_{14}(\text{AsO}_4)_2\text{O}_9\text{Cl}_4$
260	sainfeldite	$\text{Ca}_5\text{H}_2(\text{AsO}_4)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
261	sarkinite	$\text{Mn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$
262	sarmientite	$\text{Fe}_2\text{AsO}_4\text{SO}_4\text{OH} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
263	schefferite	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Mn})\text{Si}_2\text{O}_6$
264	schlossmacherite	$(\text{H}_3\text{OCa})\text{Al}_3(\text{AsO}_4, \text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
265	schoepite	$\text{UO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
266	schlossmacherite	$(\text{H}_3\text{O,Ca})\text{Al}_3(\text{OH})_6((\text{S,As})\text{O}_4)_2$
267	schultenite	$\text{PbHAsO}_4$
268	scorodite	$\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
269	smaltite	$(\text{Co,Ni})_4(\text{As}_4)_3$
270	smithsonite	$\text{ZnCO}_3$
271	smolyaninovite	$(\text{Co,Ni,Ca,Mg})_2(\text{Fe,Al})(\text{AsO}_4)_2\text{OH} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
272	sodium betpakdalite	$(\text{NaCa})_3\text{Fe}_2[(\text{AsO}_4)_2(\text{MoO}_4)_6] \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
273	sodiumpharmacosiderite	$\text{Na}_2\text{Fe}^{3+}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
274	sodiumurzospinite	$(\text{Na}_2\text{Ca})(\text{UO}_2, \text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
275	sonolite	$\text{Mn}_9(\text{SiO}_4)_4(\text{OH})_2$
276	sphalerite	$\text{ZnS}$
277	sterlinghillite	$\text{Mn}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
278	stolzite	$\text{PbWO}_4$

279	stranskiite	$Zn_2Cu(AsO_4)_2$
280	strashimirite	$Cu_8(AsO_4)_4(OH)_4 \cdot 5H_2O$
281	sulphate free weilerite	$BaAl_3H(AsO_4)_2(OH)_6$
282	svabite	$(Ca,Pb)_5(AsO_4,PO_4)_3(F,Cl,OH)$
283	symplesite	$Fe_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$
284	synaldehyite	$Mn^{2+}_9(OH)_9(H_2O)_2(AsO_3)(AsO_4)_2$
285	talmessite	$Ca_2(Mg,Co)(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$
286	tennantite	$Cu_3AsS_3$
287	tephroite	$Mn_2SiO_4$
288	tetrahedrite	$Cu^{1+}_4Cu^{2+}_2(Sb,As)_4(Cu^{1+}S_2)_6S$
289	theisite	$Cu_5Zn_5(As,Sb)_4(OH)_2(OH)_{14}$
290	thomtzekite	$Pb(Cu,Zn)_2(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$
291	tilasite	$CaMgAsO_4F$
292	torbernite	$Cu(H_2O)_8(UO_2,PO_4)_2$
293	tourmaline	$HgAl(B,OH)_2Si_4O_{19}$
294	trichalcite = tyrolite	
295	triclinoroselite = beta -roselite	
296	troegerite	$H(UO_2,AsO_4) \cdot 4H_2O$
297	tsumcorite	$PbZnFe(AsO_2)_2 \cdot H_2O$
298	tsumebite	$Pb_2Cu(PO_4,SO_4)OH$
299	turneaureite	$Ca_5[(As,P)O_4]_3Cl$
300	tyrolite	$Cu_9Ca_2(AsO_4)_4(OH)_{10} \cdot (9-10)H_2O$
301	uraninite	$U_2UO_7$
302	uranosphaerite	$Bi_2O_3 \cdot 2UO_3 \cdot 3H_2O$
303	uranospinite	$Ca(UO_2,AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$
304	villyaellenite	$H_2(Mn,Ca)_5(AsO_4)_4 \cdot 4H_2O$
305	vivianite	$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$
306	vladimirite	$Ca_5H_2(AsO_4)_4 \cdot 5H_2O$
307	walentaite	$H_4(Ca,Mn,Fe)_4Fe^{3+}_{12}(AsO_4)_{10}(PO_4)_6 \cdot 28H_2O$
308	walkilldellite	$Ca_2Mn^{2+}_3(AsO_4)_2(OH)_4 \cdot 9H_2O$
309	walpurkite	$Bi_4O_4(UO_2)(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$
310	wapplerite	$HCaAsO_4 \cdot 3.5H_2O$
311	warikahnite	$Zn_3(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$
312	weilerite	$BaAl_3AsO_4SO_4(OH)_6$
313	weilite	$CaHASO_4$
314	wendwilsonite	$Ca_2Mg(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$
315	willemite	$Zn_2SiO_4$
316	wulfenite	$PbMoO_4$
317	wurtzite	$ZnS$
318	xanthiosite	$Ni_3(AsO_4)_2$
319	yeatmanite	$Mn_{14}Zn_2Sb_2(SiO_4)_4O_{13}$
320	yukonite	$CaFe^{+3}_9(AsO_4)_6(OH)_9 \cdot 18H_2O$
321	zeunerite	$Cu(UO_2,AsO_4)_2 \cdot 12H_2O$
322	zincroselite	$Ca_2Zn(AsO_4)_2 \cdot H_2O$
323	zircon	$ZrSiO_4$
324	zykaite	$Fe^{3+}_4(AsO_4)_3SO_4OH \cdot 15H_2O$

## Cuadro A3

DATOS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE LA COMARCA LAGUNERA, MEXICO

Clave Pozo	Municipio	Localidad	Fecha	Temp. (°C)	STD (mg/l)	pH	Cond. (uS/cm)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Li (mg/l)	Pb (mg/l)	Hg (ng/ml)
1	17 Gómez P.	Las Luisas	07-Sep-90	26	560	7.97	921	60.00	4.53	0.06	0.2	
2	55 Gómez P.	Joló	05-Nov-90	26	3000	7.33	3540	344.00	11.07	0.07	0.2	0.15
3	104 Gómez P.	La Competencia	07-Sep-90	26	3400	7.98	3510	244.00	12.90	0.13	0.2	
4	116 Gómez P.	Ihuicamina	05-Nov-90	26	1900	7.49	2350	122.90	8.03	0.03	0.2	0.15
5	158 Gómez P.	Sta. Rosita	07-Sep-90	26	478	8.12	761	102.30	3.38	0.13	0.2	
6	186 Gómez P.	Lorenzo Avalos	07-Sep-90	26	422	8.05	670	39.00	3.54	0.04	0.2	
7	233 Gómez P.	Cinco de Mayo	07-Sep-90	26	560	8.04	908	49.30	5.85	0.06	0.2	
8	251 Gómez P.	Mextlalpan	05-Nov-90	26	600	7.70	776	42.70	5.58	0.03	0.2	0.15
9	257 Gómez P.	Granja Nazas	07-Sep-90	26	899	8.04	1427	63.10	7.33	0.08	0.2	
10	268 Gómez P.	La Esmeralda	07-Sep-90	26	250	8.26	371	31.70	3.30	0.03	0.2	
11	297 Gómez P.	Sta. María	07-Sep-90	26	610	8.12	988	64.10	5.64	0.07	0.2	
12	331 Torreón	Rancho Marsella	05-Nov-90	26	500	8.65	578	128.70	2.35	0.03	0.2	0.15
13	336 Torreón	El Tajito-SAPAC	05-Nov-90	26	700	7.92	873	45.20	7.50	0.03	0.2	0.15
14	338 Torreón	El Fresno-SAPAC	05-Nov-90	26	450	7.96	524	36.80	5.18	0.02	0.2	0.15
15	342 Torreón	El Tajito	07-Sep-90	26	460	7.92	751	40.10	5.16	0.06	0.2	
16	357 Gómez P.	Sn. José del Viñedo	05-Nov-90	26	340	7.85	396	41.20	4.10	0.02	0.2	0.15
17	363 Torreón	La Concha	05-Nov-90	26	240	7.90	307	32.70	3.44	0.02	0.2	0.15
18	368 Torreón	Albia	07-Sep-90	26	220	8.11	330	50.90	2.34	0.07	0.2	
19	374 Torreón	Ana	05-Nov-90	26	600	7.68	760	44.80	5.92	0.03	0.2	0.15
20	379 Torreón	Cdad. Ind.-SAPAC	05-Nov-90	26	400	8.08	611	39.80	5.35	0.02	0.2	0.15
21	504 Gómez P.	Venecia	05-Nov-90	26	800	8.05	989	98.10	3.23	0.04	0.2	0.15
22	520 Matamoros	El Pilar	07-Sep-90	26	360	7.92	553	44.00	3.25	0.08	0.2	
23	541 Gómez P.	Sta. Ma. Bertin	07-Sep-90	26	970	8.05	1508	78.20	6.68	0.09	0.2	
24	554 Mapiimi	Peñoles	05-Nov-90	26	3500	7.35	3190	341.00	20.20	0.24	0.2	0.15
25	756 Matamoros	Purísima	07-Sep-90	26	1440	8.02	2480	185.50	6.75	0.13	0.2	
26	774 Torreón	La Partida	07-Sep-90	26	205	8.21	299	27.40	2.80	0.03	0.2	
27	847 Matamoros	El Rosario	07-Sep-90	26	3700	7.95	3660	247.00	6.71	0.12	0.2	
28	852 Fco. I. Madero	Fresno del Norte	07-Sep-90	26	250	7.93	359	51.80	1.42	0.07	0.2	
29	901 San Pedro	Santa Mónica	07-Sep-90	26	1900	8.05	3120	192.50	6.40	0.15	0.2	
30	1000 Fco. I. Madero	Lequeitio	07-Sep-90	26	591	8.17	919	197.20	1.57	0.13	0.2	
31	1036 San Pedro	El Esfuerzo	07-Sep-90	26	720	8.17	1160	204.20	2.07	0.16	0.2	
32	1040 Fco. I. Madero	Florencia	07-Sep-90	26	420	8.05	661	100.30	1.76	0.1	0.2	
33	1125 Matamoros	La Esperanza	05-Nov-90	26	600	8.13	703	107.00	2.23	0.04	0.2	0.15
34	1198 Matamoros	El Refugio	07-Sep-90	26	540	8.24	890	131.70	5.89	0.14	0.2	
35	1219 Matamoros	Valverde	05-Nov-90	26	700	7.94	962	105.60	7.53	0.04	0.2	0.15
36	1228 Matamoros	Sn. Cristobal	07-Sep-90	26	920	8.16	1468	103.90	10.38	0.11	0.2	
37	1308 Gómez P.	Santander	05-Nov-90	26	2600	7.44	3030	294.00	9.23	0.07	0.2	0.15
38	1349 Matamoros	Filipinas	07-Sep-90	26	1740	8.08	2960	269.00	15.35	0.29	0.2	
39	1337 San Pedro	Udalla	07-Sep-90	26	1720	8.10	2660	542.26	7.12	0.2	0.2	
40	1400 Torreón	La Sagra	05-Nov-90	26	1700	7.84	1980	468.00	6.59	0.07	0.2	0.15
41	1489 San Pedro	Iacubaya	07-Sep-90	26	4360	7.97	4720	562.00	11.76	0.23	0.2	
42	1515 San Pedro	Las Flores	07-Sep-90	26	930	8.11	1459	244.00	4.95	0.18	0.2	
43	1657 San Pedro	La Esperanza	07-Sep-90	26	1780	7.96	2950	222.00	6.16	0.14	0.2	
44	1695 San Pedro	Rancho Alegre	07-Sep-90	26	940	8.15	1502	212.50	3.26	0.17	0.2	
45	1884 Matamoros	La Sagra	05-Nov-90	26	1300	8.25	1550	428.00	3.94	0.04	0.2	0.15
46	1892 Sn. Pedro	Sn. Carlos	05-Nov-90	26	500	8.25	609	95.00	1.32	0.06	0.2	0.15
47	1975 Matamoros	Benito Juárez	07-Sep-90	26	325	8.20	493	81.40	1.26	0.07	0.2	
48	1993 Fco. I. Madero	El Dorado	05-Nov-90	26	2000	8.30	2330	448.00	1.96	0.05	0.2	0.15
49	2016 Torreón	El Tajito	07-Sep-90	26	370	8.24	570	96.80	3.82	0.07	0.2	
50	2024 Matamoros	Andalucía	07-Sep-90	26	920	8.12	1571	225.50	4.01	0.1	0.2	
51	2075 Gómez P.	Numancia	07-Sep-90	26	1090	8.12	1825	231.20	8.12	0.25	0.2	
52	2087 Gómez P.	El Barro	07-Sep-90	26	262	8.13	372	62.40	1.88	0.03	0.2	

## DATOS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE LA COMARCA LAGUNERA, MEXICO

Clave Pozo	Mo (mg/li)	As (ng/ml)	F (mg/l)	Ca (mg/l)	Hg (mg/l)	Cl (mg/l)	NO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	B (mg/l)	Fe (mg/l)	CO3 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Alcali. (mg/l)	
53	2115	97.65	2.86	40.00	4.56	43.29	4.24	304.76	0.72	0.04		112.20	92	
54	2178	150.85	4.47	609.21	46.00	200.27	24.18	3119.95	2.86	0.11		200.10	164	
55	2234	0.2	136.50	3.16	47.42	6.73	24.72	1.87	443.85	1.29	2.393	130.54	107	
56	2240		7.89	1.80	102.70	11.63	32.03	25.42	229.67	0.45	0.04	92.70	76	
57	2314		25.13	1.41	19.16	1.07	6.96	3.55	67.15	0.16	0.04	124.40	102	
58	2344		20.01	3.16	232.46	98.40	71.91	342.40	1040.89	0.85	0.04	153.70	126	
59	2349		59.66	1.88	30.50	4.89	28.15	13.76	201.49	0.42	0.04	139.10	114	
60	2382	0.2	3.40	0.11	66.76	6.64	11.33	6.14	83.91	0.18	0.04	168.36	138	
61	2408		6.62	1.66	7.21	15.08	9.27	14.10	74.40	0.17	0.04	202.50	166	
62	2479	0.2	175.00	2.63	15.25	0.60	17.25	2.93	84.85	0.32	0.04	146.40	120	
63	2504	0.2	296.00	3.74	198.30	148.00	113.55	57.93	2253.00	2.50	0.04	152.50	125	
64	2510		432.60	5.01	13.85	0.99	14.18	31.79	171.65	0.67	0.06	246.40	202	
65	2538	0.2	26.20	2.4	76.80	32.00	26.28	53.53	495.44	0.84	0.04	307.44	300	
66	2554		261.20	6.97	300.80	68.60	709.74	162.00	7384.81	6.01	0.04	258.69	212	
67	2575		22.97	2.40	283.10	102.81	140.48	508.93	1160.42	1.63	0.04	157.40	129	
68	2592		12.68	1.97	206.60	55.48	16.23	45.29	627.82	0.24	0.04	128.10	105	
69	2596		13.15	2.00	72.30	27.96	39.80	56.51	68.40	0.13	0.04	258.69	212	
70	2605	0.2	11.50	2.22	313.80	103.00	222.66	1718.00	433.72	0.33	0.04	180.56	148	
71	2612		41.56	3.40	402.00	194.00	213.24	177.67	2463.41	2.52	0.13	150.10	123	
72	2624		18.97	2.01	191.40	72.00	85.91	110.06	939.55	1.57	0.04	190.30	156	
73	2654		183.30	3.90	23.22	0.83	15.60	6.69	242.20	0.50	0.12	135.40	111	
74	2679		5.88	2.50	92.90	13.04	13.15	10.66	180.80	0.32	0.04	276.90	227	
75	2686	0.2	16.00	1.45	46.70	17.80	6.88	12.11	76.71	0.17	0.04	190.32	156	
76	2708		12.45	2.60	132.35	35.42	64.27	171.19	357.89	0.41	0.04	205.10	168	
77	2734	0.2	11.10	1.18	110.00	32.70	81.08	155.85	267.60	0.32	0.04	129.32	106	
78	2755		23.28	4.58	493.00	74.10	264.83	99.07	2297.36	2.19	0.04	131.79	108	
79	2775	0.2	13.50	1.55	60.00	37.00	46.97	150.66	246.00	0.45	1.285	203.74	167	
80	2787		3.00	2.57	60.48	38.40	35.20	93.13	234.96	0.40	0.04	222.10	182	
81	2812		19.53	2.08	55.06	13.74	35.56	26.33	190.75	0.34	0.04	173.20	142	
82	2819	0.2	365.00	3.18	35.87	10.50	95.26	83.61	1171.71	1.32	0.04	193.76	158	
83	2910		74.55	3.93	227.80	4.24	36.06	3.24	1039.15	0.85	0.10	46.40	38	
84	2912		11.79	1.50	182.00	46.18	77.48	178.87	390.62	0.57	0.04	164.70	135	
85	2984		22.37	3.25	240.80	54.10	77.61	13.80	1503.03	1.07	0.04	141.50	116	
86	3035	0.2	353.00	3.36	62.30	6.70	157.18	2.93	650.20	1.04	1.2	158.60	130	
87	3054		28.49	2.69	110.65	31.60	52.84	13.38	353.56	0.30	0.04	153.70	126	
88	3089		193.80	6.44	633.26	160.41	457.95	0.50	2646.49	0.55	0.04	114.70	94	
89	3143		9.25	2.03	64.90	8.37	14.45	12.20	130.00	0.20	0.04	119.60	98	
90	3252		4.85	1.84	130.85	15.54	19.30	53.39	258.12	0.46	0.04	385.60	316	
91	3345		15.67	1.90	80.30	8.43	17.62	8.61	88.19	0.17	0.04	283.10	232	
92	3383		10.71	1.64	60.38	11.50	11.69	8.93	88.30	0.17	0.04	187.90	154	
93	3775		6.85	1.31	51.40	3.84	10.66	11.79	61.71	0.15	0.04	161.10	132	
94	3776	0.2	304.00	78.21	97.10	592.73	23430.00	0.50	25811.00	9.35	1.21	319.05	263	
95	018P01	0.2	1010.00	83.65	80.98	1438.56	30593.00	0.50	32547.00	8.14	0.058	378.25	312	
96	Pres a C		6.57	1.13	27.37	2.13	3.88	3.38	10.54	0.25	0.04	112.20	92	
97	Pres a F		12.70	1.54	31.08	2.57	3.99	1.67	16.50	0.17	0.04	128.10	105	
98	Pres a C		8.00	1.70	27.21	2.13	4.19	3.30	11.71	0.13	0.05	107.40	88	
99	Pres a C		8.86	1.27	27.04	2.10	3.50	3.34	10.82	0.20	0.04	8.40	90.30	88
100	Pres a F		8.77	2.57	32.22	2.66	5.65	3.43	21.77	0.10	0.07	4.80	98.80	89
101	Pres a C		17.66	1.29	28.14	2.11	3.63	3.04	11.05	0.15	0.04	9.60	84.20	85
102	Pres a F		7.39	1.91	30.68	2.59	4.76	2.69	17.67	0.11	0.04	2.40	124.40	106

## DATOS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE LA COMARCA LAGUNERA, MEXICO

Clave Pozo	Mo (mg/li)	As (ng/ml)	F (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	NO3 (mg/l)	SO4 (mg/l)	B (mg/l)	Fe (mg/l)	CO3 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Alcali. (mg/l)	
1	17	16.72	6.76	99.25	57.54	34.52	25.32	305.40	0.21	0.04		195.24	160	
2	55	0.2	8.76	1.88	195.50	9.70	217.09	55.09	1231.76	1.33	0.04	158.60	130	
3	104		9.04	3.43	503.50	116.55	199.55	53.63	1738.51	1.55	0.04	112.20	92	
4	116	0.2	26.20	3.46	154.20	75.00	106.21	137.94	911.07	0.38	0.04	151.28	124	
5	158		60.05	4.45	55.30	3.17	14.76	6.20	269.70	0.35	0.04	87.90	72	
6	186		108.30	4.47	69.10	18.41	17.83	29.18	175.90	0.23	0.04	124.40	102	
7	233		16.27	1.74	120.95	19.30	21.04	18.01	306.40	0.23	0.04	122.10	100	
8	251	0.2	2.58	0.42	84.55	8.85	24.86	15.21	185.07	0.21	0.04	124.44	102	
9	257		5.34	1.05	231.60	22.77	56.87	21.65	580.90	0.31	0.55	95.20	78	
10	268		9.76	1.54	39.08	4.12	8.04	9.06	54.13	0.14	0.04	134.20	110	
11	297		4.93	1.28	133.35	9.68	31.25	13.30	324.10	0.26	0.04	98.30	81	
12	331	0.2	304.00	1.48	3.73	1.25	4.30	3.97	44.40	0.28	0.04	22.8	259.86	251
13	336	0.2	2.43	0.27	73.40	11.30	22.23	34.16	143.78	0.18	0.04	173.24	142	
14	338	0.2	4.70	1.08	49.35	5.13	12.10	12.13	92.19	0.15	0.04	168.36	138	
15	342		4.58	1.77	95.95	8.64	44.73	22.03	74.43	0.29	0.08	262.57	215	
16	357	0.2	25.30	0.93	28.00	2.40	6.34	7.86	49.50	0.15	1.29	151.28	124	
17	363	0.2	25.10	0.74	28.36	1.76	4.74	7.01	29.37	0.11	3.72	146.00	120	
18	368		52.00	1.97	21.61	0.72	6.05	4.73	35.55	0.19	0.04	161.10	132	
19	374	0.2	2.96	0.46	63.10	6.70	21.66	15.38	146.07	0.23	0.04	141.52	116	
20	379	0.2	4.00	0.07	55.41	6.13	20.10	20.27	96.53	0.18	0.04	132.98	109	
21	504	0.2	13.90	0.63	95.60	6.00	23.14	21.52	236.28	0.35	1.285	112.24	92	
22	520		6.43	1.21	34.68	4.91	7.94	14.65	76.03	0.25	0.08	194.10	159	
23	541		10.41	2.61	210.60	45.26	23.40	44.83	661.67	0.32	0.04	107.40	88	
24	554	0.2	217.00	3.23	197.80	138.00	90.71	4.27	2003.79	1.90	0.06	126.88	104	
25	756		6.86	1.82	355.50	30.50	162.45	28.12	1075.23	1.03	0.19	128.10	105	
26	774		12.70	1.26	32.58	1.29	6.47	7.05	35.83	0.17	0.04	119.60	98	
27	847		79.00	3.86	589.17	196.87	81.07	53.62	2647.82	1.08	0.04	87.30	75	
28	852		27.30	1.46	25.99	0.77	6.39	7.54	66.26	0.15	0.04	131.80	108	
29	901		112.35	3.31	478.50	109.45	84.83	37.41	1777.33	0.84	0.09	167.10	137	
30	1000		123.80	3.26	19.15	0.35	21.49	33.84	289.50	0.75	0.10	179.30	147	
31	1036		194.35	3.15	38.96	1.68	91.04	6.86	293.35	0.61	0.04	112.20	92	
32	1040		15.55	1.82	41.75	1.58	10.44	7.14	217.80	0.35	0.04	137.90	113	
33	1125	0.2	108.00	1.49	29.96	1.76	19.73	2.01	213.60	0.50	0.04	131.76	108	
34	1198		88.75	2.21	46.99	11.43	40.66	11.96	230.50	0.51	0.04	180.60	146	
35	1219	0.2	23.40	0.6	42.60	17.00	12.87	3.23	312.80	0.42	0.04	136.64	112	
36	1228		17.97	1.50	142.80	33.56	147.35	198.23	232.80	0.22	0.04	85.40	70	
37	1308	0.2	11.30	3.33	162.50	91.00	162.47	148.47	1150.70	0.76	0.04	130.54	107	
38	1349		9.98	2.39	278.80	86.70	248.75	175.50	1066.44	1.11	0.04	168.40	138	
39	1387		192.50	3.22	146.70	13.21	199.87	43.02	1179.38	1.43	0.04	168.40	138	
40	1400	0.2	49.40	2.02	59.00	14.60	83.90	59.37	630.66	0.98	0.04	139.08	114	
41	1489		80.00	0.90	525.00	112.65	196.03	25.12	2560.57	1.24	0.14	107.40	88	
42	1515		165.20	3.46	43.97	1.73	192.29	2.11	272.12	0.74	0.04	90.30	74	
43	1657		76.55	3.27	480.00	43.00	67.64	9.56	1610.71	0.68	0.17	107.40	88	
44	1695		132.25	3.45	111.55	3.10	45.64	32.13	595.70	0.76	0.09	107.40	88	
45	1884	0.2	92.00	2.24	28.85	10.00	52.56	29.36	455.88	0.97	0.04	141.52	116	
46	1892	0.2	68.50	1.08	18.50	0.28	13.08	2.16	126.02	0.30	0.04	141.52	116	
47	1975		93.20	1.99	24.29	0.59	6.02	1.71	126.80	0.27	0.04	135.40	111	
48	1993	0.2	443.00	4.28	22.32	4.67	40.03	80.45	772.90	1.17	0.04	258.64	212	
49	2016		198.50	2.10	27.74	2.62	8.55	6.69	80.87	0.30	0.04	226.90	186	
50	2024		142.20	3.50	117.20	14.79	46.46	90.90	529.62	1.04	0.04	136.60	112	
51	2075		146.70	4.47	164.32	55.90	57.48	55.95	771.51	0.65	0.04	124.50	102	
52	2087		35.36	1.33	21.68	0.67	5.33	4.96	74.40	0.21	0.04	124.50	102	

## DATOS QUIMICOS E ISOTOPICOS DE LA COMARCA LAGUNERA, MEXICO

Clave Pozo	Municipio	Localidad	Fecha	Temp. (°C)	STD (mg/l)	pH	Cond. (uS/cm)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Li (mg/l)	Pb (mg/l)	Hg (ng/ml)
53	2115	Matamoros	José Ma. Morelos	07-Sep-90	26	591	8.16	952	163.40	1.89	0.09	0.2
54	2178	San Pedro	La América	07-Sep-90	26	4620	8.12	5130	791.00	6.71	0.14	0.2
55	2234	Viesca	Las Margaritas	05-Nov-90	26	1100	7.85	1320	360.00	4.81	0.08	0.2
56	2240	Torreón	Col. Metalúrgica	07-Sep-90	26	500	8.01	835	55.10	5.84	0.06	0.2
57	2314	Matamoros	Santo Tomás	07-Sep-90	26	250	8.18	360	57.20	1.62	0.05	0.2
58	2344	Lerdo	Santa Teresa	07-Sep-90	26	1320	8.1	2260	202.20	6.86	0.11	0.2
59	2349	Torreón	La Perla	07-Sep-90	26	486	8.16	786	129.60	2.60	0.07	0.2
60	2382	Gómez P.	Ferroaleaciones	05-Nov-90	26	500	7.39	628	43.70	4.79	0.02	0.2
61	2408	Lerdo	Villa Juárez	07-Sep-90	26	418	8.31	613	42.70	5.05	0.05	0.2
62	2479	Fco. I. Madero	Las Animas	05-Nov-90	26	420	8.28	492	88.80	1.72	0.04	0.2
63	2504	Mapimi	La Hondonada	05-Nov-90	26	3500	7.50	4100	375.00	21.30	0.31	0.2
64	2510	Fco. I. Madero	Prov. del Norte	07-Sep-90	26	560	8.24	696	200.20	1.15	0.07	0.2
65	2538	Lerdo	Mármoles La Gloria	05-Nov-90	26	1500	7.32	1799	394.00	8.63	0.1	0.2
66	2554	Tlahualilo	Ceceda	07-Sep-90	26	14210	7.93	15650	3972.00	10.01	0.3	0.2
67	2575	Lerdo	La Loma	07-Sep-90	26	1990	8.09	3280	328.00	14.02	0.22	0.2
68	2592	Lerdo	El Refugio	07-Sep-90	26	900	8.05	1432	49.20	4.38	0.04	0.2
69	2596	Lerdo	San Jacinto	07-Sep-90	26	450	7.68	699	27.30	4.02	0.03	0.2
70	2605	Lerdo	Juán García	05-Nov-90	26	2300	7.50	3960	134.00	10.75	0.03	0.2
71	2612	Lerdo	León Guzmán	07-Sep-90	26	4230	7.84	4450	516.00	15.11	0.13	0.2
72	2624	Lerdo	6 de Enero	07-Sep-90	26	1400	7.94	2380	294.40	8.67	0.15	0.2
73	2654	Fco. I. Madero	El Vergelito	07-Sep-90	26	480	8.14	744	144.50	1.53	0.12	0.2
74	2679	Lerdo	León Guzmán	07-Sep-90	26	570	7.95	900	88.20	6.36	0.07	0.2
75	2686	Gómez P.	Dinamita	05-Nov-90	26	460	7.55	558	19.90	3.06	0.02	0.2
76	2708	Viesca	San Ignacio	07-Sep-90	26	925	8.10	1503	140.50	10.20	0.18	0.2
77	2734	Matamoros	Noacan	05-Nov-90	26	600	7.91	1380	84.20	7.58	0.04	0.2
78	2755	Tlahualilo	San Rosendo	07-Sep-90	26	4590	7.53	5150	754.50	16.54	0.34	0.2
79	2775	Viesca	Gregorio García	05-Nov-90	26	1000	7.53	1280	109.90	9.05	0.06	0.2
80	2787	Viesca	La Rosita	07-Sep-90	26	660	8.27	1087	116.00	6.40	0.1	0.2
81	2812	Viesca	Mieleras	07-Sep-90	26	510	8.16	865	111.00	8.25	0.13	0.2
82	2819	Sn. Pedro	Atila	05-Nov-90	26	3200	8.04	3670	590.00	3.71	0.07	0.2
83	2910	Tlahualilo	Fco. de Arriba	07-Sep-90	26	1110	7.31	1950	237.90	3.84	0.16	0.2
84	2912	Mapimi	Sta Rita	07-Sep-90	26	940	7.92	1586	97.90	5.40	0.06	0.2
85	2984	Tlahualilo	San Pablo	07-Sep-90	26	1820	7.97	360	435.50	8.58	0.15	0.2
86	3035	Tlahualilo	El Capulín	05-Nov-90	26	1600	7.96	2060	418.00	3.38	0.05	0.2
87	3054	Viesca	Tierra y Libertad	07-Sep-90	26	670	8.12	1130	83.20	6.28	0.08	0.2
88	3089	Viesca	Bilbao	07-Sep-90	26	4620	7.93	5080	541.00	14.06	0.13	0.2
89	3143	Torreón	Casa Inigo	07-Sep-90	26	358	8.07	546	34.80	4.34	0.05	0.2
90	3252	Lerdo	Los Angeles	07-Sep-90	26	720	8.09	1152	106.10	8.93	0.07	0.2
91	3345	Lerdo	Alvaro Obregón	07-Sep-90	26	410	7.56	621	39.90	5.18	0.05	0.2
92	3383	Lerdo	La Curva	07-Sep-90	26	350	8.07	528	36.60	4.78	0.05	0.2
93	3775	Torreón	Torreón	07-Sep-90	26	280	8.15	416.5	30.20	3.62	0.04	0.2
94	3776	Viesca	Sulfato de Viesca	05-Nov-90	26	101093	7.66	155200	32600.00	332.00	0.43	0.84
95	018P01	Viesca	Sulfato de Viesca	05-Nov-90	26	134746	7.63	202200	41480.00	937.80	0.41	1.11
96	Presa Cárdenas	Río Sixtín Sup.		07-Sep-90	26	130	8.10	201	10.83	3.84	0.02	0.2
97	Presa F.Zarco	Tuneles Sup.		07-Sep-90	26	159	8.05	235	14.42	4.11	0.02	0.2
98	Presa Cárdenas	Centro Sup.		07-Sep-90	26	125	8.15	196.2	10.56	3.75	0.02	0.2
99	Presa Cárdenas	Tuneles Sup.		07-Sep-90	26	120	8.13	198.4	10.72	3.75	0.02	0.2
100	Presa F.Zarco	Entrada Sup.		07-Sep-90	26	165	8.14	246	15.18	4.30	0.02	0.2
101	Presa Cárdenas	Río Santiago Sup.		07-Sep-90	26	130	8.12	199.1	11.10	3.72	0.02	0.2
102	Presa F.Zarco	Centro Sup.		07-Sep-90	26	160	8.24	236	14.54	4.12	0.02	0.2

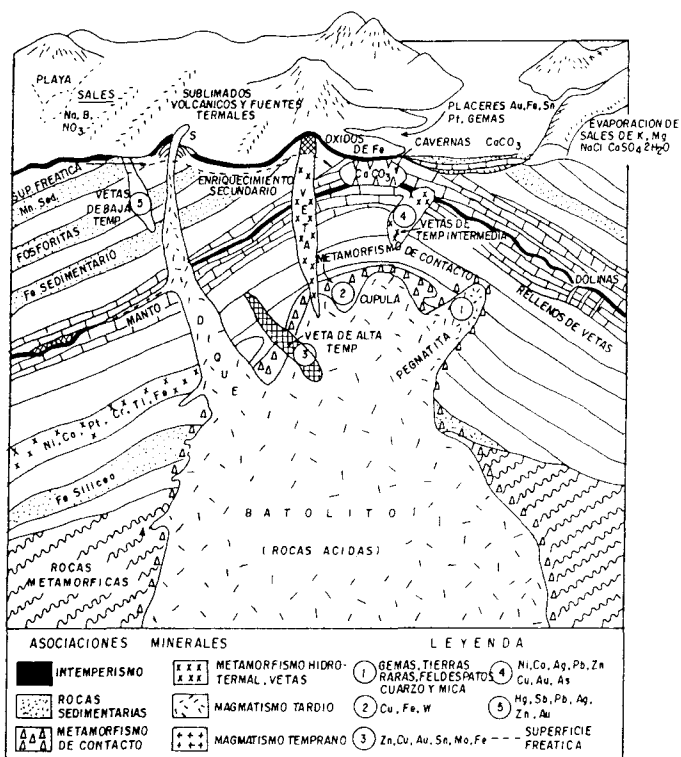


Figura A1 - Diagrama ilustrativo del origen de los minerales.



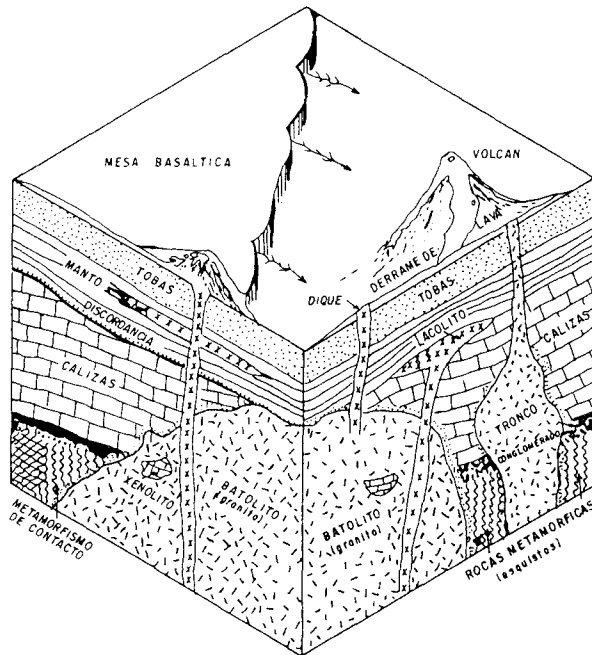


Figura A2 - Diagrama que muestra algunas rocas ígneas y sus relaciones con sedimentarias y metamórficas.

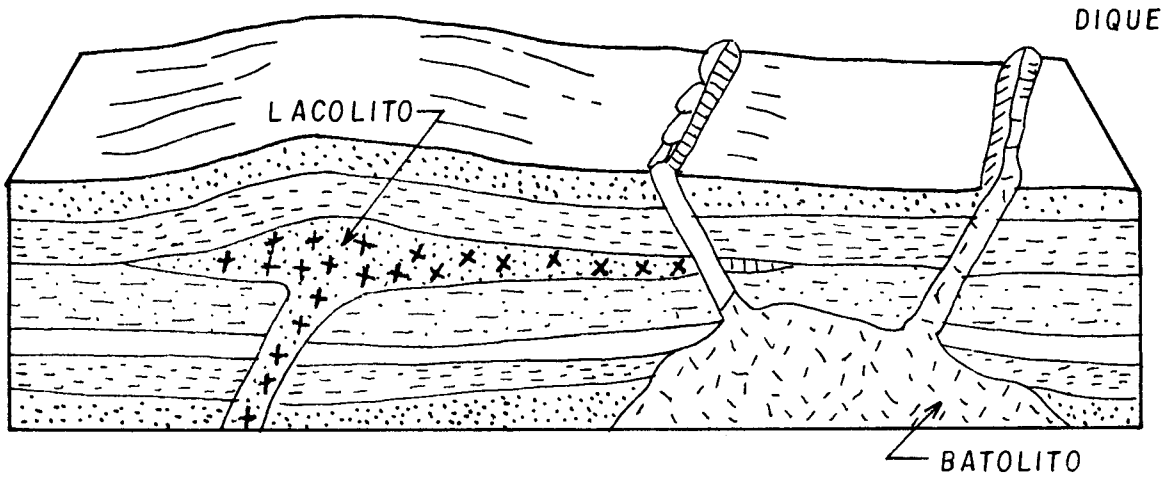


Figura A3.- Clasificación de rocas ígneas

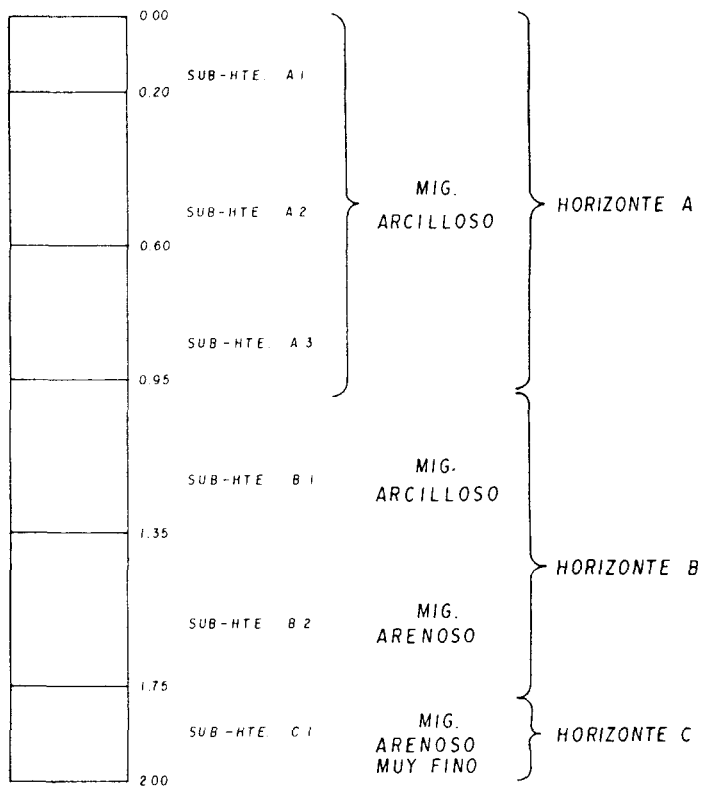


Figura A4.- Perfil de un pozo típico de la serie Coyote. (tipo migojón arcilloso Coyote).

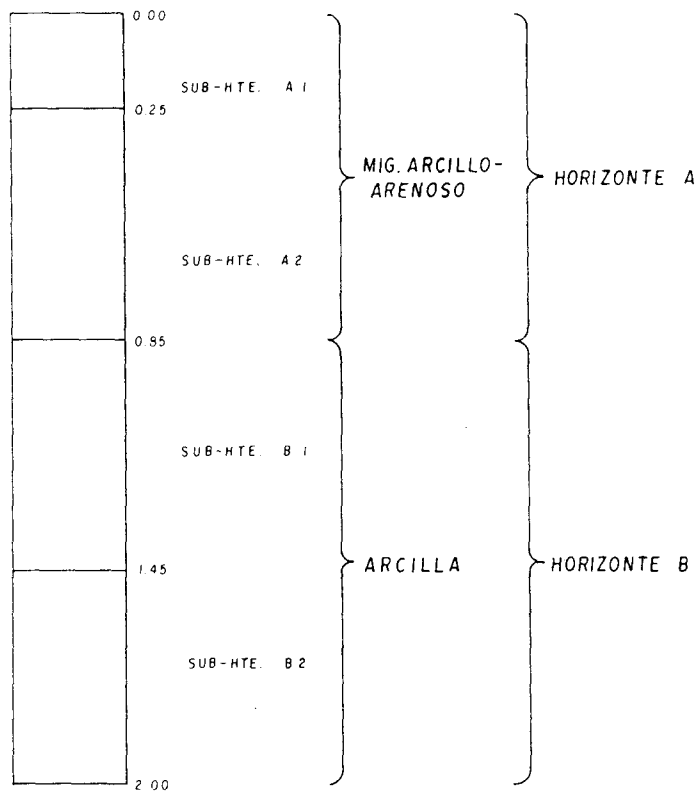


Figura A5 - Perfil de un pozo típico de la serie Bermejillo.

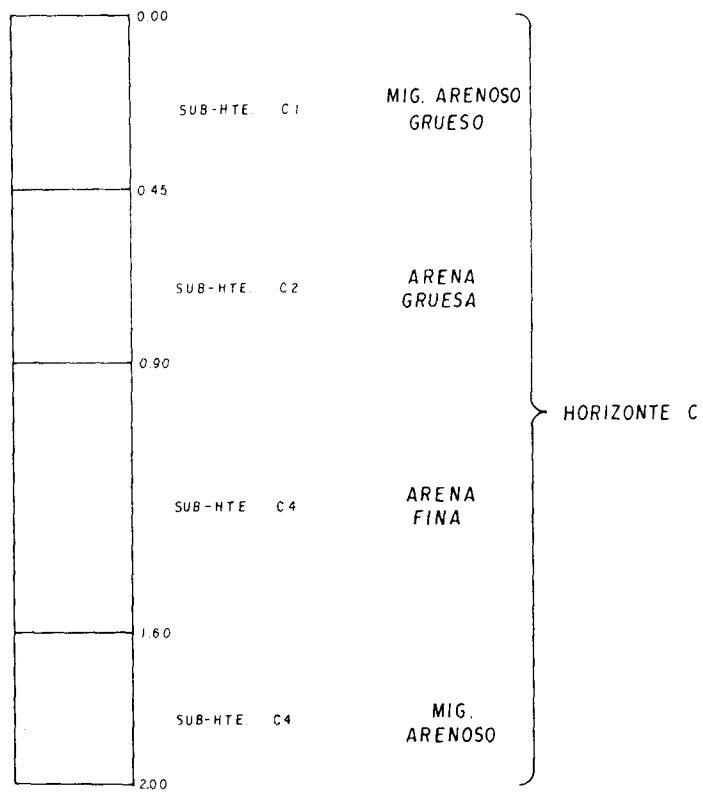


Figura A6 Perfil típico de los suelos de la serie San Pedro.

Centro de Información-Biblioteca



30002005472212