



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

TECNICAS EN TRATAMIENTO DE AGUAS DE
ORIGEN INDUSTRIAL CON CONTENIDO
EN ARSENICO

TRABAJO ESCRITO VIA CURSOS DE EDUCACION
CONTINUA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA

JORGE ORTEGA CARDENAS



EXAMENES PROFESIONALES
MEXICO, D. FACULTAD DE QUIMICA 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente: Prof. Francisco Javier Garfias Vázquez
Vocal: Prof. Aurora de los Ángeles Ramos Mejía
Secretario: Prof. Margarita Rosa Garfias Vázquez
1er. Suplente: Prof. Alfonso Durán Moreno
2do. Suplente: Prof. Sara Elvia Meza Galindo

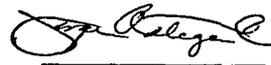
El presente trabajo escrito vía cursos de educación continua fue desarrollado en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, CU.

Asesor del tema: Dr. Francisco Javier Garfias Vázquez



Handwritten signature of Francisco Javier Garfias Vázquez, underlined.

Sustentante: Jorge Ortega Cárdenas



Handwritten signature of Jorge Ortega Cárdenas, underlined.

Índice	página
1. Introducción	1
2. Información General	5
2.1 Estructura química del arsénico	6
2.2 Propiedades físicas del arsénico	7
2.3 Química del arsénico en el agua	12
2.4 Estabilidad del arsénico	18
2.5 Estabilidad del anhídrido arsenioso y los arsenitos	20
2.6 Estabilidad del anhídrido arsénico y los arseniatos	23
2.7 Estabilidad de la arsina	24
2.8 Acción pasivante de compuestos derivados del arsénico	24
2.9 Electrodo de arsénico	25
2.10 Identificación y cuantificación de arsénico en el laboratorio	26
2.11 Usos del arsénico	29
2.12 Aleaciones del arsénico	32
2.13 Aspectos económicos	34
2.14 Toxicidad del arsénico	36
2.15 Normas de calidad del agua de desecho	38
2.16 Técnicas de remoción de arsénico a partir de agua contaminada	42
3. Discusión	49
4. Conclusiones	52
5. Bibliografía	55

Capítulo 1

Introducción

En ciertas zonas del mundo, por razones geológicas naturales, el agua puede contener concentraciones de arsénico más altas que lo habitual. En varios países de América Latina como en Argentina, Chile, México y El Salvador, por lo menos cuatro millones de personas beben en forma permanente agua con niveles de arsénico que ponen en riesgo su salud.

Las concentraciones de arsénico en el agua, sobre todo en el agua subterránea, presentan niveles de concentración que llegan en algunos casos hasta 1.0 mg/L. En otras regiones del mundo como India, China y Taiwán el problema es aún mayor. De acuerdo a la información obtenida, en India existen alrededor de 6 millones de personas expuestas, de las cuales más de 2 millones son niños. En Estados Unidos más de 350,000 personas beben agua cuyo contenido de arsénico es mayor a 0.5 mg/L y más de 2.5 millones de personas están siendo abastecidas con agua con concentraciones de arsénico mayores a 0.025 mg/L.¹

La población con mayor riesgo es la que vive cerca de las instalaciones mineras y sus desechos, y la expuesta a través del aire y agua contaminados por tales actividades, así como también la que vive cerca de las instalaciones en donde se refina el arsénico o se utiliza como materia prima.

La exposición más alta se da entre los trabajadores de las actividades mencionadas y sus familias. Entre las zonas con hidroarsenicismo, como se le denomina al envenenamiento lento y progresivo con arsénico, se encuentran varias de la Comarca Lagunera, en nuestro país, donde el riesgo de exposición es bastante alto.

El arsénico produce intoxicación y envenenamiento a través del agua y alimentos contaminados, por malos hábitos de higiene en el trabajo y por la inhalación de polvos y vapores que lo contienen. En exposiciones agudas (de corta duración) y a altas

concentraciones, el arsénico irrita ojos, piel y tracto respiratorio. Puede causar efectos adversos en los sistemas nervioso y circulatorio; en riñón, hígado y tracto gastrointestinal, causando convulsiones, alteraciones renales, hemorragias, pérdida de fluidos y electrolitos, hasta el *shock* y la muerte. Estos efectos pueden no ser inmediatos ya que el arsénico puede acumularse a lo largo de varios años.

Las exposiciones prolongadas (crónicas) o periódicas, pueden ocasionar inflamación, y a largo plazo, afectar las membranas mucosas y la piel, dando lugar a la perforación del tabique nasal y a alteraciones de la pigmentación epidérmica. Se han descrito también alteraciones vasculares periféricas, caracterizadas por cianosis y pérdida progresiva de la circulación de las extremidades, que puede terminar en gangrena seca, mejor conocida como enfermedad "del pie negro". Esta última, eventualmente conlleva a la amputación del miembro.

Se ha informado incluso, que el arsénico incrementa el riesgo de padecer cáncer, de pulmón y epidérmico, principalmente, además de ser un agente mutagénico comprobado.

En cuanto a sus orígenes, el arsénico se obtiene como producto secundario en la producción y refinación de cobre, plomo, zinc, estaño y oro. Aunque cada vez con menos frecuencia debido a las regulaciones legales o a la aparición de nuevos productos, el arsénico se utiliza en la fabricación de herbicidas, fungicidas e insecticidas. También se utiliza en la industria: en la del vidrio, como decolorante; en la microelectrónica, en la fabricación de semiconductores; y en la de curtiduría y peletería. En las aleaciones para la fabricación de tipos para imprenta, rejillas electrónicas para baterías automotrices, tubería para equipos de intercambio de calor, calentadores y evaporadores; e incluso en la fabricación de perdigones, se utilizan fracciones de

arsénico menores al 5% en la mayoría de los casos, ya que este mejora la maleabilidad, la ductilidad, la fidelidad al moldeado en la fundición, e incluso eleva la resistencia a la corrosión. Curiosamente, el arsénico se utilizó en la elaboración de fármacos desde mediados del siglo XIX y hasta finales de los cuarentas, como único agente efectivo contra la sífilis. Actualmente se reconoce la actividad farmacéutica de ciertos compuestos orgánicos arsenicales como agentes efectivos contra la tripanosomiasis, principalmente.

Por las razones expuestas anteriormente, resulta importante el tratamiento del agua que contiene arsénico, por lo que el objetivo del presente estudio es realizar una recopilación, descripción y comparación de las técnicas de tratamiento del agua que contiene este contaminante, enfatizando en la discusión las principales características de cada proceso de remoción del arsénico, para posteriormente, citar algunas conclusiones.

Para la realización de este estudio, se recopiló información a partir de diferentes fuentes bibliográficas y de medios electrónicos como las páginas de Internet. La información obtenida ha sido organizada en los siguientes temas: estructura química del arsénico, propiedades físicas del arsénico, química del arsénico en el agua, estabilidad del arsénico y sus especies químicas, identificación y cuantificación de arsénico en el laboratorio, usos del arsénico, aleaciones del arsénico, aspectos económicos, toxicidad del arsénico, normas de calidad del agua de desecho, técnicas de remoción de arsénico a partir de agua contaminada, discusión y conclusiones.

Capítulo 2

Información General

2.1 Estructura química del arsénico²

El arsénico, que frecuentemente es considerado como un metal, está clasificado químicamente como un no metal o metaloide y pertenece al grupo 15 (familia VA) de la tabla periódica (así como el nitrógeno, el fósforo, el antimonio y el bismuto). Se ha determinado que sólo hay un isótopo estable del arsénico, el cual tiene una masa atómica de 75 y existe en abundancia de 100% en la naturaleza.

Debido a sus características, el arsénico ha sido ubicado como el tercer miembro de la familia del nitrógeno en la tabla periódica y, ya que posee en su capa externa la configuración electrónica $4s^2 4p^3$, sus estados de oxidación más comunes son $3-$, $3+$ y $5+$, aunque los compuestos que contienen los iones simples As^{3-} , As^{3+} , y As^{5+} son desconocidos. En la mayoría de sus compuestos, el átomo de arsénico está en el estado de valencia tetraédrico. Los compuestos en los cuales el átomo de arsénico es tricoordinado, se suponen con el átomo de arsénico con hibridación tetraédrica y un par de electrones solitarios en uno de sus orbitales híbridos. El arsénico también forma cierto número de compuestos hipervalentes, con cinco o seis ligandos unidos al átomo central. La geometría de tales especies es generalmente trigonal bipiramidal u octaédrica. La existencia de estos compuestos ha sido atribuida a la presencia de orbitales d en la capa de valencia del átomo de arsénico. Esta teoría, sin embargo, se ha puesto en duda. Actualmente se ha sugerido que los tres ligandos ecuatoriales en las moléculas de tipo trigonal bipiramidal, están unidos por ligaduras convencionales y que los ligandos axiales están unidos por tres ligaduras al centro. La participación de los orbitales d puede estabilizar ligeramente la molécula. Razones similares pueden aplicarse a los compuestos hipervalentes con geometría octaédrica.

El arsénico elemental, existe normalmente en la forma metálica cristalina α y tiene apariencia y brillo semejantes al acero gris. En su forma β , el arsénico es un sólido amorfo de color gris oscuro. Otras formas alotrópicas del arsénico son de color amarillo y otras van desde el café rojizo pálido, hasta el café oscuro, pero la evidencia de su existencia es escasa. El arsénico metálico, calentado bajo condiciones normales no exhibe un punto definido de fusión ya que sublima, así que el arsénico fundido puede ser obtenido solamente calentándolo bajo presión.

2.2 Propiedades físicas del arsénico²

Las propiedades físicas del arsénico metálico α cristalino se muestran en la tabla 1. Las propiedades para el arsénico β no están completamente definidas.

Tabla 1. Propiedades físicas del arsénico

Propiedad	Valor
Peso atómico	74.9216
Punto de fusión a 39.1 MPa ^a , °C	816
Punto de ebullición, °C ^b	615
Densidad a 26°C, Kg/m ³	5778
Calor latente de fusión, J/(mol K) ^c	27740
Calor latente de sublimación, J/(mol K) ^c	31974
Calor específico a 25°C, J/(mol K) ^c	24.6
Coefficiente lineal de expansión térmica a 20°C, $\mu\text{m}/(\text{m } ^\circ\text{C})$	5.6
Resistividad eléctrica a 0°C, $\mu\Omega\text{cm}$	28
Susceptibilidad magnética a 20°C ^d	5.5×10^{-6}
Absorción nuclear de sección cruzada ^e	4.3 ± 0.2
Sistema cristalino	Hexagonal (romboédrica)
Constantes cristalinas a 26°C, nm	$a = 0.376, c = 1.0548$
Dureza, escala de Mohs	3.5

^a Para convertir MPa a psi, multiplicar por 145

^b Sublima

^c Para convertir a cal/(mol K), dividir entre 4.184

^d Unidades en sistema cgs

^e Neutrones térmicos del arsénico con masa atómica 75, a 2200 m/s

La densidad del arsénico β es de 4700 Kg/m^3 . Este cambia su forma amorfa a cristalina a 280°C , y su resistividad eléctrica es $107 \text{ }\Omega\text{cm}$.

El arsénico metálico es estable en aire seco, pero cuando se expone al aire húmedo la superficie se oxida, dando una empañadura superficial de color bronceada que cambia hasta negro en exposición continua. La forma amorfa es más estable a la oxidación atmosférica.

Al calentarse en aire, ambas formas subliman y el vapor se oxida hasta formar trióxido de arsénico, As_2O_3 . Aunque el dímero, As_4O_6 , representa su composición cristalina, el óxido es más comúnmente referido como trióxido de arsénico. Durante la oxidación se puede advertir un persistente olor a ajo.

El arsénico elemental se combina con varios metales para formar arseniuros. Cuando se calienta en presencia de halógenos forma trihaluros. Sin embargo, los pentahaluros con la excepción del pentafluoruro de arsénico, AsF_5 , y el inestable pentacloruro de arsénico, AsCl_5 , no se forman fácilmente. El arsénico reacciona con azufre para formar trisulfuro de arsénico, As_2S_3 , sulfuro de arsénico, AsS , pentasulfuro de arsénico, As_2S_5 , y mezclas complejas de estas especies en diversas proporciones.

El vapor de arsénico, As_4 , no se combina directamente con hidrógeno para formar hidruros. Sin embargo la arsina (hidruro de arsénico, AsH_3), un gas altamente venenoso, se forma si un compuesto intermetálico, tal como el arseniuro de aluminio, AlAs , se hidroliza o es tratado con ácido clorhídrico, HCl . La arsina puede ser formada también cuando se reducen compuestos de arsénico usando zinc en ácido clorhídrico. El calentamiento de la arsina a 250°C , la descompone en sus elementos.

El arsénico metálico no es atacado fácilmente por agua, soluciones alcalinas, o ácidos no oxidantes. El arsénico reacciona con ácido nítrico concentrado, HNO_3 , para formar ácido ortoarsénico, H_3AsO_4 . El ácido clorhídrico ataca al arsénico solamente en presencia de un oxidante.

A pesar de que el arsénico en cantidades por arriba de 1 mg puede ser cuantificado gravimétricamente o volumétricamente, el método formal se utiliza rara vez. El arsénico, en el estado de oxidación 3+, puede ser titulado usando yodo, bromato, yodato o permanganato de potasio, aunque también se han utilizado agentes oxidimétricos orgánicos titulantes, tales como las N-haloamidas o N-haloimidias. Para este fin, se sugieren entre otros compuestos, la bromamina-B, la clorobromamina-B, la bromohidantoina (1-bromo, 5-5-dimetilhidantoina) y la N-clorosuccinimida. Aunque estos métodos de titulación pueden ser adaptados para determinar cantidades micrométricas de arsénico, es más común determinar la presencia de arsénico de manera colorimétrica, especialmente en alimentos, por la formación del complejo azul de molibdeno o del dietilditiocarbamato. Las trazas de arsénico, comúnmente se determinan por métodos de absorción atómica o activación de neutrones. Para determinar arsénico en materiales biológicos, la absorción atómica en humo de grafito es la prueba más adecuada.

El arsénico puede ser detectado cualitativamente, como el trisulfuro de arsénico, de color amarillo, As_2S_3 , que puede precipitarse a partir de una solución de ácido sulfhídrico, H_2S , concentrado. Otros elementos de este grupo, que generalmente se precipitan con H_2S , no interfieren si la solución contiene 25% o más de HCl . Las trazas de arsénico pueden ser detectadas, convirtiéndolas primero en arsina, ya que esta se descompone mediante el calentamiento del gas en un pequeño tubo, observándose la

formación de un espejo de arsénico (prueba de Marsh). Alternativamente, la arsina puede hacerse reaccionar con un papel indicador impregnado con cloruro mercuríco, HgCl_2 , (prueba de Gutzeit), formando el arseniuro mercuríco Hg_3As_2 .

El arsénico está distribuido ampliamente en la corteza terrestre en abundancia de aproximadamente 5 g/ton. Se conocen poco más de 150 minerales que contienen arsénico. La tabla 2 enlista los minerales más comunes. Sin embargo, la fuente más importante de arsénico comercial, está en los subproductos del tratamiento de las menas de cobre, plomo, cobalto y oro. La cantidad de arsénico asociada con las menas de plomo y cobre es de 2 a 3%, mientras que en las menas de oro encontradas en Suecia es de 7 a 11%. En algunas localidades se ha llegado a encontrar incluso arsénico elemental.

Tabla 2. Minerales que contienen arsénico

Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
loellingita	FeAs_2	sperrylita	PbAs_2
safforlita	CoAs_2	arsenopirita	FeAsS
niccolita	NiAs	cobaltita	CoAsS
rammelsbergita	NiAs_2	enargita	Cu_3AsS_4
rejalgar	AsS	gersdorffita	NiAsS
oropimente	As_2S_3	glaucodota	$(\text{Co,Fe})\text{AsS}$

En la tabla 3, se citan los diferentes óxidos, hidruros y ácidos de arsénico posibles, según el estado de oxidación, citados por Pourbaix.

Tabla 3. Clasificación de los diferentes óxidos, hidruros y ácidos de arsénico según su número de oxidación y consideración de los mismos en los diagramas de equilibrio de Pourbaix.³

	Números de oxidación (Z)	Considerados	No considerados	Nombre y color
Sustancias sólidas	-1	-----	As ₂ H ₂	dihidruro de diarsénico, café
	-0.5	-----	As ₄ H ₂	dihidruro de tetraarsénico, café-rojizo
	0	As	-----	arsénico, gris acero
	+1	-----	As ₂ O	subóxido de arsénico
	+3	As ₂ O ₃	-----	anhídrido arsenioso, blanco
	+3	-----	As ₂ O ₃	anhídrido arsenioso, incoloro
	+4	-----	As ₂ O ₄	peróxido de arsénico
	+5	As ₂ O ₅	-----	anhídrido arsénico, blanco
Sustancias disueltas	+3	AsO ⁺	-----	ion arsenilo
	+3	HAsO ₂	-----	ácido metarsenioso
	+3	AsO ₂ ⁻	-----	ion metarsenito
	+3	H ₃ AsO ₃	-----	ácido ortoarsenioso
	+3	H ₂ AsO ₃ ⁻	-----	ion mono-ortoarsenito
	+5	H ₃ AsO ₄	-----	ácido ortoarsénico
	+5	H ₂ AsO ₄ ⁻	-----	ion mono-ortoarseniato
	+5	HAsO ₄ ²⁻	-----	ion biortoarseniato
	+5	AsO ₄ ³⁻	-----	ion triortoarseniato
	+5	-----	AsO ₂ ⁺	ion arsenilo
+7	-----	AsO ₃ ⁺	ion perarsenilo	
Sustancias gaseosas	-3	AsH ₃	-----	arsina, incoloro

2.3 Química del arsénico en el agua³

El arsénico se presenta en forma natural en rocas sedimentarias, rocas volcánicas y en aguas geotermales. Así mismo, se presenta en la naturaleza con mayor frecuencia como trisulfuro de arsénico, As_2S_3 , y arsenopirita, que se encuentran como impurezas en los depósitos mineros, o como iones arseniato y arsenito en las aguas superficiales y subterráneas. Así, el arsénico está presente en el agua por la disolución natural de minerales de depósitos geológicos, la descarga de los efluentes industriales y la sedimentación atmosférica.

En aguas superficiales con alto contenido de oxígeno, la especie más común es el arsénico con estado de oxidación 5+ (As^{5+}), mientras que, bajo condiciones de reducción, generalmente en los sedimentos de los lagos o aguas subterráneas, predomina el arsénico con estado de oxidación 3+ (As^{3+}).

La principal vía de dispersión del arsénico al ambiente es el agua. Aún si se considera la sedimentación, la solubilidad de los arseniatos y arsenitos es suficiente para que este elemento se transporte en los sistemas acuáticos. La concentración del arsénico en aguas superficiales es muy variable y depende probablemente de las características del suelo local. En los sistemas acuáticos, bajo condiciones normales, el arsénico se presenta principalmente en sus estados de oxidación trivalente y pentavalente. Las condiciones que favorecen la oxidación química y biológica inducen el cambio de estado de oxidación, de especies trivalentes a especies pentavalentes. Y a la inversa, aquellas que favorecen la reducción, cambiarán el equilibrio del estado pentavalente al estado trivalente. El ión arseniato tiene mayor capacidad de ionización debido a la presencia del doble enlace, así, la molécula del ácido ortoarsénico se disocia y libera iones hidrógeno.

Las reacciones y fórmulas de equilibrio para los compuestos de arsénico son:

1. Estabilidad relativa de las sustancias disueltas.

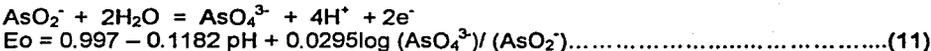
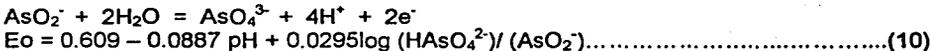
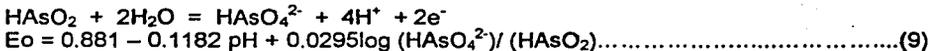
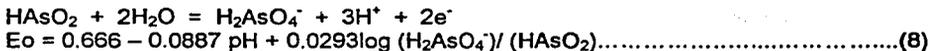
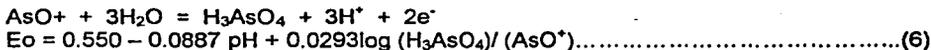
Z= +3



Z= +5



+3 → +5



2. Límites de las zonas de predominio relativas de las sustancias disueltas

$\text{AsO}^+ / \text{HAsO}_2$	pH = -0.34
$\text{HAsO}_2 / \text{AsO}_2^-$	pH = 9.21
$\text{H}_3\text{AsO}_4 / \text{H}_2\text{AsO}_4^-$	pH = 3.60
$\text{H}_2\text{AsO}_4^- / \text{HASO}_4^{2-}$	pH = 7.26
$\text{HASO}_4^{2-} / \text{AsO}_4^{3-}$	pH = 12.47

$\text{AsO}^+ / \text{H}_3\text{AsO}_4$	$E_o = 0.550 - 0.0887 \text{ pH}$
$\text{HAsO}_2 / \text{H}_3\text{AsO}_4$	$E_o = 0.560 - 0.0591 \text{ pH}$
$\text{HAsO}_2 / \text{H}_2\text{AsO}_4^-$	$E_o = 0.666 - 0.0887 \text{ pH}$
$\text{HAsO}_2 / \text{HASO}_4^{2-}$	$E_o = 0.881 - 0.1182 \text{ pH}$
$\text{AsO}_2^- / \text{HASO}_4^{2-}$	$E_o = 0.609 - 0.0887 \text{ pH}$
$\text{AsO}_2^- / \text{AsO}_4^{3-}$	$E_o = 0.997 - 0.1182 \text{ pH}$

3. Límites de las zonas de estabilidad relativa de las sustancias sólidas

0 → +3



0 → +5



+3 → +5



4. Solubilidad de las sustancias sólidas

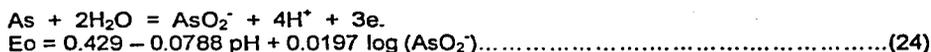
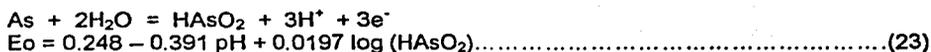
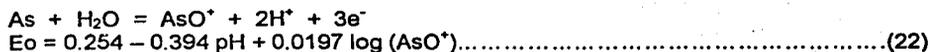
Z = +3



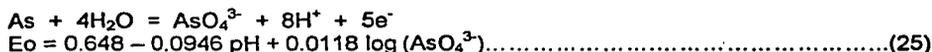
Z = +5



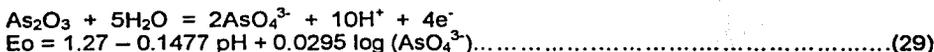
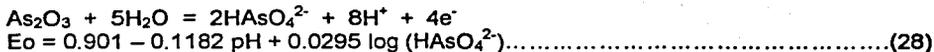
0 → +3



0 → +5



+3 → +5



5. Límites de las zonas de estabilidad relativa de As y de AsH₃.

$$\text{AsH}_3 = \text{As} + 3\text{H}^+ + 3\text{e}^-$$
$$E_0 = -0.608 - 0.0591 \text{ pH} - 0.0197 \log p(\text{AsH}_3) \dots \dots \dots (30)$$

En base a las fórmulas 1 a 30, se trazó la figura 1 (diagrama de equilibrios potencial – pH del sistema arsénico – agua) y la figura 2 (influencia del pH en la solubilidad del anhídrido arsenioso).

Estas figuras sólo son válidas en ausencia de sustancias que pudieran formar con el arsénico complejos solubles o sales insolubles. Los tartratos, los molibdatos y los tungstenatos, acomplejan al arsénico. Los arsenitos y los arseniatos alcalinos son muy solubles, los otros arsenitos y arseniatos sólo son solubles en solución ácida. Entre los arseniatos poco solubles, están principalmente el arseniato triargéntico, Ag₃AsO₄ y el arseniato amoniomagnésico, MgNH₄AsO₄.

Figura 1. Diagrama de equilibrio potencial-pH del sistema arsénico-agua, a 25°C.

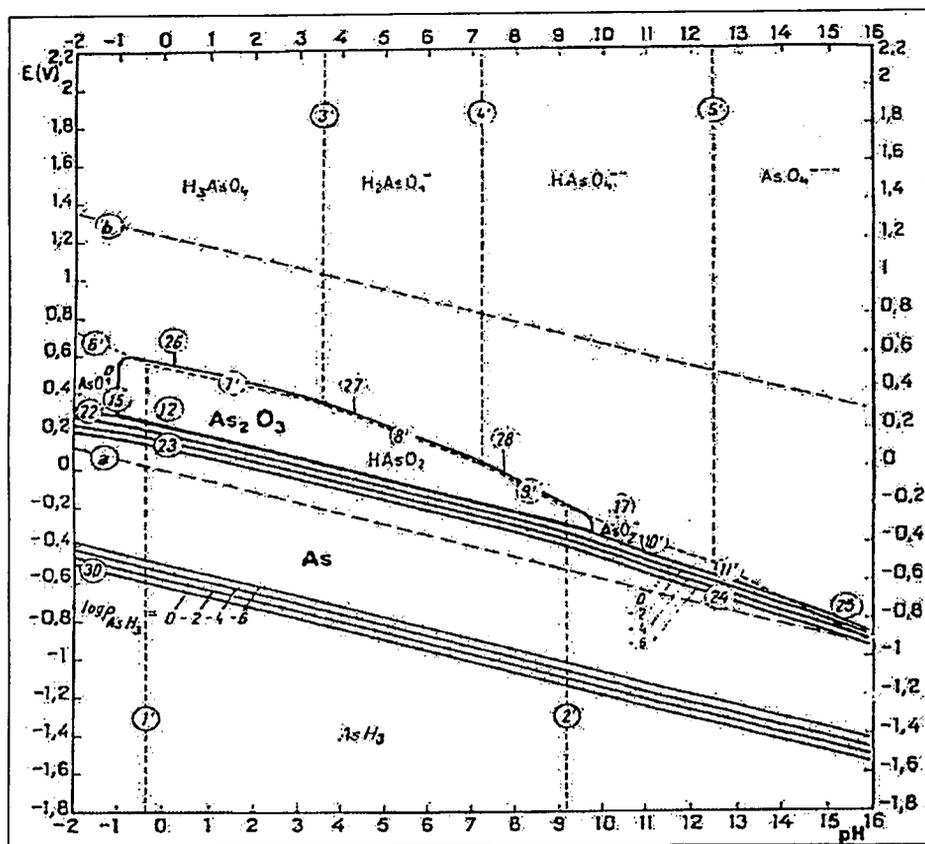
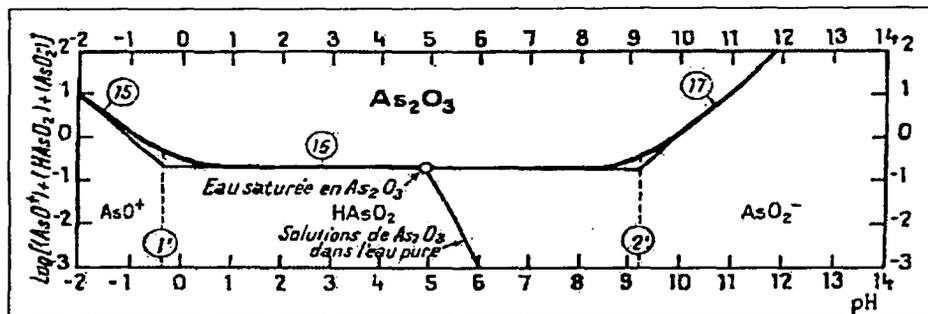


Figura 2. Influencia del pH en la solubilidad del anhídrido arsenioso, a 25°C.



2.4 Estabilidad del arsénico

De acuerdo a la figura 1, el arsénico elemental está presente como un elemento noble, ya que una parte considerable de su zona de estabilidad invade la del agua. El arsénico es, por lo tanto, un elemento estable en presencia del agua y de soluciones acuosas, en todo el rango de pH y en ausencia de oxidantes. Por lo tanto, el agua libre de aire, no altera por tanto al arsénico, que conserva perfectamente su brillo en ella, mientras que en el agua aireada, el arsénico es atacado lentamente formándose anhídrido arsenioso, As_2O_3 , muy soluble. Si se burbujea aire en el agua, dicha oxidación se vuelve aún más rápida.

Expuesto al aire seco, el arsénico es resistente a la oxidación, mientras que al contacto con el aire húmedo, se altera superficialmente y se recubre de un producto de oxidación negro, que puede ser removido por medio de agua de cloro (oxidación al estado de ácido arsénico soluble, H_3AsO_4).

A temperatura ambiente, los ácidos diluidos, como el HCl, HNO₃, H₂SO₄, y H₃PO₄ libres de aire, no tienen acción alguna sobre el arsénico, en contraste, el ácido clorhídrico concentrado lo disuelve, y los ácidos sulfúrico y nítrico concentrados y calientes lo oxidan al estado de ácido arsénico, H₃AsO₄. Las soluciones poco concentradas de ácido nítrico (2.0 a 5.0 M) pueden atacar al arsénico a temperatura ambiente formándose ácido nitroso, HNO₂, que oxida al arsénico al estado de anhídrido arsenioso, As₂O₃. La adición de productos reductores, tales como la hidrazina, N₂H₄, y el nitruro de sodio, NaN₃, que destruyen al ácido nitroso, evitan este ataque. No obstante, cabe señalar que la capacidad reactiva del ácido nítrico frente al arsénico no aumenta con la presencia de ácido nitroso. Las soluciones de sosa cáustica, NaOH, mantenidas bajo atmósfera inerte, actúan débilmente sobre el arsénico, pero en presencia de aire, éstas oxidan al arsénico a arsenito.

La poca reactividad del arsénico se confirma además, con el hecho de que este elemento puede encontrarse en estado nativo. La reducción del arsénico en solución acuosa conduce a la formación de arsina AsH₃, o alguno de los hidruros sólidos, As₂H₂ o As₄H₂, o a varios de éstos compuestos simultáneamente, dependiendo del carácter ácido-base de la solución. Se puede obtener AsH₃ por electrólisis de una solución acética de acetato de sodio entre un ánodo de platino y un cátodo de arsénico. Por electrólisis de soluciones acuosas de HCl, H₂SO₄, H₂CrO₄, KOH y NaOH de diversas concentraciones, se obtienen simultáneamente arsina, AsH₃, y dihidruro de arsénico, As₂H₂.

Dependiendo del pH y la concentración, el arsénico puede oxidarse a catión arsenito, AsO⁺, ácido arsenioso, HAsO₂, anhídrido arsenioso, As₂O₃ y a anión arsenito, AsO₂⁻. Una oxidación más severa, lo transforma, dependiendo del pH de la solución, en

ácido ortoarsenioso, H_3AsO_3 o en arseniatos, H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} y AsO_4^{3-} . El oxígeno oxida al arsénico hasta el óxido As_2O_3 y, los ácidos oxidantes, como el H_2SO_4 y HNO_3 concentrados, así como el agua regia, oxidan al arsénico a ácido arsénico, H_3AsO_4 . El ozono O_3 , el peróxido de hidrógeno H_2O_2 , y el permanganato de potasio KMnO_4 , transforman al arsénico en arseniatos. El ácido perclórico HClO_4 , a una concentración de 60 a 70% y a temperatura ambiente, oxida al arsénico al estado trivalente de anhídrido arsenioso, As_2O_3 . En caliente, dicha oxidación llega hasta el estado pentavalente formándose ácido arsénico, H_3AsO_4 .

El arsénico puede obtenerse, por medio de la reducción de arsenitos y arseniatos, o por la oxidación moderada de los hidruros de arsénico.

2.5 Estabilidad del anhídrido arsenioso y los arsenitos

El anhídrido arsenioso, As_2O_3 , se forma por la oxidación moderada del arsénico con oxígeno mediante tratamiento con HClO_4 en frío.

La posición de la zona de predominio de estabilidad del anhídrido arsenioso en la figura 1, lo caracteriza como una sustancia soluble, termodinámicamente estable en presencia de agua y en presencia de soluciones acuosas ácidas, neutras y ligeramente alcalinas exentas de oxidantes.

Según la figura 2, la influencia del pH sobre su solubilidad en las soluciones exentas de sustancias acomplejantes, el anhídrido arsenioso es un óxido anfótero que se disuelve en agua y en soluciones de pH comprendido entre 1 y 8, dando lugar a la formación de ácido metaarsenioso no disociado, HAsO_2 . La solubilidad, que en esta zona de predominio de pH es constante e igual a $10^{-0.68}$ átomo gramo de $\text{As}_2\text{O}_3/\text{L}$ (o sea 0.21 átomo-gramo/L o 21 gramos de $\text{As}_2\text{O}_3/\text{L}$) aumenta para los pH inferiores a 1 con

formación de iones arsenilo, AsO^+ , así como para los pH superiores a 8, con formación de iones arsenito AsO_2^- . De acuerdo a la figura 2, en las soluciones obtenidas por disolución de As_2O_3 en agua pura de $\text{pH} = 7$, el arsénico existirá principalmente en la forma de HAsO_2 no disociado, con una pequeña proporción de AsO_2^- . Este AsO_2^- se produce mediante la reacción $\text{As}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{AsO}_2^- + 2\text{H}^+$ formándose cantidades iguales de iones H^+ y de iones AsO_2^- . Los contenidos en AsO_2^- y HAsO_2 de las soluciones de As_2O_3 dependerán del pH según las relaciones:

$$(\text{AsO}_2^-) = (\text{H}^+) - 10^{-7} \quad \text{y} \quad \log(\text{HAsO}_2) = \log(\text{AsO}_2^-) + 9.21 - \text{pH}$$

Estas relaciones permiten representar en la figura 2, los valores de pH de las soluciones de As_2O_3 de diferentes concentraciones. mediante una línea con pendiente igual a -2 .

Las características de la solución obtenida por saturación de agua pura con As_2O_3 serán las del punto de intersección de esta línea de pendiente igual a -2 con la línea gruesa trazada que indica la solubilidad de As_2O_3 , lo que corresponde a un pH de 5, valor que fue confirmado experimentalmente. Cabe señalar que éste pH puede ser determinado mediante el cálculo, tomando en cuenta que los contenidos de iones H^+ y sus iones AsO_2^- son prácticamente iguales, y sustituyendo $\log(\text{AsO}_2^-) = -\text{pH}$ en la relación $\log(\text{AsO}_2^-) = -9.89 + \text{pH}$ relativa al equilibrio $\text{As}_2\text{O}_3/\text{AsO}_2^-$. Así se encuentra que el pH es 4.94.

Según la figura 1, el As_2O_3 y las soluciones arseniosas pueden oxidarse dando lugar a la formación de arseniatos y pueden reducirse produciendo arsénico elemental e hidruros de arsénico.

La oxidación de arsenitos en arseniatos es netamente irreversible, aunque teóricamente posible si el potencial es superior a los valores indicados por las líneas 6', 7', 8', 9', 10' y 11'. En la figura 1 sólo se produce tal reacción a tensiones netamente más elevadas y mediando una sobretensión sensible, mientras que los arseniatos son la forma de arsénico termodinámicamente estable en presencia de oxígeno y sólo pueden ser obtenidos por la acción del oxígeno en soluciones de arsenitos en presencia de catalizadores tales como el sistema yodo – yoduro. En ausencia de catalizadores, la oxidación de los arsenitos en arseniatos exige un oxidante más energético, tal como un halógeno o un compuesto halogenado, ácido crómico, ácido nítrico, peróxido de hidrógeno y ión permanganato. Esta oxidación puede llevarse a cabo también electrolíticamente sobre un ánodo de platino.

La reducción de arsenitos a arsénico o hidruro de arsénico puede llevarse a cabo por vía química o vía electrolítica, a potenciales inferiores a las indicadas por la familia de líneas 22 a 24 (para arsénico) y por la familia de líneas 30 (para la arsina).

Por vía química, el cloruro estanoso, SnCl_2 , y el ácido hidrofosforoso, H_3PO_2 , en solución acidificada con HCl , reducen las soluciones arseniosas a arsénico coloidal color café. En condiciones similares, el cobre reduce estas soluciones a arseniuro de cobre, Cu_3As_2 , que recubre el metal de una capa color gris. Los metales que producen un desprendimiento de hidrógeno a bajos potenciales electródicos, tales como el zinc en ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, reducen las soluciones arseniosas produciendo arsina gaseosa. Esta última reacción es la base del procedimiento clásico de investigación toxicológica del arsénico en medicina legal.

Por vía electrolítica, las soluciones arseniosas pueden ser reducidas catódicamente sobre platino o cobre. Según la naturaleza de la solución, del metal

utilizado como cátodo y el valor de la densidad de corriente, se puede obtener únicamente arsénico (brillante, mate, esponjado, adherente, no adherente, etc.) o bien, simultáneamente, arsénico e hidruros de arsénico, principalmente arsina AsH_3 y As_2H_2 .

2.6 Estabilidad del anhídrido arsénico y de los arseniatos

El anhídrido arsénico, As_2O_5 , es el óxido de arsénico termodinámicamente estable en presencia de oxígeno. Es muy higroscópico y muy soluble en agua bajo la forma de ácido arsénico, H_3AsO_4 , y de arseniatos, $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ y AsO_4^{3-} ; esto es debido a su gran solubilidad. Por lo mismo, no aparece en el diagrama de equilibrio, el cual muestra que las soluciones de arseniatos son termodinámicamente estables en ausencia de reductores.

Los arseniatos pueden ser reducidos a arsenitos, así como a arsénico y a hidruro de arsénico. No obstante, al igual que la oxidación de arsenitos a arseniatos, la reducción de arseniatos a arsenitos es netamente irreversible, aunque teóricamente posible desde el momento en que el potencial es inferior a los valores indicados por las líneas 6', 7', 8', 9', 10' y 11' (de la figura 1). Así, ésta sólo se produce a potenciales netamente más bajos y mediando un sobrepotencial sensible. Generalmente, esta reducción sólo se lleva a cabo con una velocidad notable en solución muy ácida, ya que en solución alcalina es extremadamente lenta. El ácido sulfuroso caliente conduce a la formación de ácido arsenioso, $HAsO_2$. El ácido hipofosforoso, H_3PO_2 , y el cloruro estanoso, $SnCl_2$, forman arsénico y el hidrógeno nascente forma arsina. La reducción electrolítica de arseniatos en solución ácida es más difícil de realizar que la de arsenitos y según las condiciones de operación puede producir arsénico o arsina.

2.7 Estabilidad de la arsina, AsH₃

Puede observarse en la figura 1, que el arsénico puede ser reducido a trihidruro de arsénico gaseoso, AsH₃ (arsina), a potenciales inferiores a los indicados por la familia de las líneas 30. Como se indica en los párrafos anteriores, esta reducción puede realizarse químicamente o por electrólisis.

Debido a la posición de su zona de predominio de estabilidad a potenciales muy bajos, la arsina aparece como un compuesto reductor y termodinámicamente inestable.

La arsina se oxida completamente a ácido arsenioso con ácido clórico HClO₃, y a ácido arsénico o a arseniato en presencia de halógenos, ácido sulfúrico concentrado y caliente, ácido nítrico, ión permanganato y ión ferrocianuro. Aunque la arsina tiende termodinámicamente a descomponerse en arsénico e hidrógeno, es sensiblemente estable en presencia de agua destilada exenta de oxígeno a temperatura ambiente. El agua aireada provoca la formación lenta de un precipitado café que puede ser arsénico o un hidruro inferior sólido como el As₂H₂. La arsina seca y pura, se conserva largo tiempo sin alteración, pero el calor la descompone fácilmente.

2.8 Acción pasivante de compuestos derivados del arsénico

Cuando el hierro o un acero ordinario se corroe en presencia de un ácido tal como el H₂SO₄, su potencial de electrodo se sitúa entre -0.2 y - 0.4 V. Bajo estas condiciones, el arsénico elemental es la forma más estable del sistema As-H₂O. Los compuestos arseniosos y arsénicos tienden entonces a ser reducidos por el hierro con formación de una empañadura de arsénico.

Ahora bien, se sabe que en condiciones parecidas, los contenedores de acero para el almacenamiento de H₂SO₄ se corroen menos cuando el ácido que contienen

proviene de cámaras de plomo, que cuando este ácido se prepara por el procedimiento de contacto. Es probable que esta diferencia de comportamiento es debida al hecho de que el ácido de las cámaras contiene compuestos de arsénico, que no están presentes en el ácido de contacto y forman sobre el acero una capa de arsénico que es parcialmente protectora y pasiva imperfectamente el metal.

2.9 Electroodos de arsénico

El arsénico se usa a veces para medir el pH de soluciones acuosas y para la realización de determinaciones potenciométricas.

El funcionamiento del electrodo de arsénico para la determinación del pH se basa, al parecer, en el equilibrio del sistema As/AsO_3 cuyo potencial de electrodo depende linealmente del pH en el intervalo de 0 a 9 según la relación:

$$E = 0.234 - 0.0591 \text{ pH}$$

A reserva de que la solubilidad de equilibrio del arsénico es muy grande (15 g As/L).

Estas deducciones, obtenidas de la figura 1, concuerdan bien con los resultados obtenidos experimentalmente, según los cuales, en presencia de aire, el potencial de un electrodo de arsénico (masiva o en polvo) varía como se indica en la ecuación anterior para los valores de pH comprendidos entre 3 y 10.

El hecho de que el arsénico puede ser adecuado como electrodo de medida de pH, hace posible su uso como electrodo de referencia para las titulaciones potenciométricas de ácidos y bases, principalmente para la valoración de NaOH, HCl, HNO_3 y $H_2C_2O_2$.

2.10 Identificación y cuantificación de arsénico en el laboratorio

La finalidad de los métodos analíticos de detección y cuantificación de diversas sustancias, consiste en crear una referencia que nos permita conocer los límites y comportamiento con respecto a otras variables, tales como temperatura y pH, de los diversos sistemas químicos que nos interesan. En el caso del arsénico existen las siguientes técnicas:

1. Identificación de arsénico. Ensayo de Marsh. Este ensayo se basa en el hecho de que todos los compuestos solubles de arsénico son reducidos por el hidrógeno "naciente" en solución ácida a arsina, AsH_3 , un gas incoloro, extremadamente venenoso con un olor característico a ajo. Si el gas mezclado con hidrógeno se hace pasar a través de un tubo de vidrio caliente, se descompone en hidrógeno y arsénico metálico, que se deposita como un "espejo" negro marrón justo después de la parte caliente del tubo. La mezcla de gases, compuesta de hidrógeno y arsina, por ignición, arde con una llama de color azul brillante y produce humos blancos de As_2O_3 .⁴

2. Identificación de arsénico. Ensayo de Gutzeit. Este ensayo es esencialmente una modificación del ensayo de Marsh, cuya diferencia principal es que sólo se requiere un tubo de ensayo y que se detecta la arsina por medio de nitrato de plata o de cloruro de mercurio (II).⁴

3. Identificación de arsénico. Ensayo de Fleitmann. Este ensayo se basa en el hecho de que el hidrógeno naciente generado en solución alcalina, por ejemplo, a partir de aluminio o zinc y solución de NaOH, reduce a los compuestos de arsénico III a

arsina, pero no afecta a los compuestos de antimonio. Por lo tanto, constituye un método de distinción entre los compuestos de arsénico y antimonio. Los arseniatos se deben reducir primero al estado trivalente antes de efectuar el ensayo. Esta técnica es similar a la del ensayo de Gutzeit.⁴

4. Identificación de arsénico. Ensayo de Reinsch. Si se hierve una tira de lámina de cobre brillante en una solución de un compuesto de arsénico III acidificada, el arsénico se deposita sobre el cobre en forma de una película gris de arseniuro de cobre, Cu_5As_2 . El antimonio, mercurio, plata y otros metales precipitan bajo condiciones similares, por lo tanto, es necesario ensayar arsénico en el depósito por vía seca. Para ello, se lava la tira con agua destilada, se seca entre papeles filtro y se calienta suavemente en un tubo de ensayo. Así, se obtiene un depósito blanco cristalino de As_2O_3 .⁴

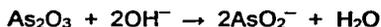
5. Identificación de arsénico. Ensayos por vía seca.

- a. Ensayo al soplete. Los compuestos de arsénico cuando se calientan sobre carbón con carbonato de sodio dan una incrustación blanca de As_2O_3 , produciendo un olor a ajo mientras ésta permanezca caliente.
- b. Cuando los compuestos de arsénico se calientan con un exceso de cianuro de potasio y carbonato de sodio anhidro en un tubo de vidrio seco, se produce un espejo negro de arsénico soluble en la parte más fría del tubo, que es soluble en solución de hipoclorito de sodio.⁴

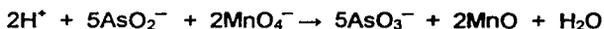
6. Valoración con el método del permanganato.⁵ El uso del permanganato se debe a que es un oxidante fuerte y autoindicador. En la mayor parte de sus aplicaciones, el MnO_4^- se usa en disolución ácida dando Mn^{2+} como producto de reducción. En disolución neutra el MnO_4^- se descompone lentamente, de acuerdo a la reacción:



Las disoluciones ácidas son aún menos estables. La reacción es autocatalizada por el dióxido de manganeso. Las trazas de sustancias reductoras en el agua destilada, utilizada en la preparación de la solución, reducen el MnO_4^- a MnO_2 que cataliza la descomposición, misma que puede también ser catalizada por la luz. Por esto, la solución se somete a ebullición durante 30 minutos aproximadamente para completar la oxidación de las sustancias reductoras del agua. Después de un reposo de dos o más horas, el MnO_2 formado se sedimenta y la solución se filtra y se envasa en un frasco oscuro. Esta solución se normaliza con As_2O_3 (este se disuelve poco en agua, pero lo hace fácilmente en NaOH 2 N), según la reacción:



La disolución de arsenito se valora después de acidificarla:

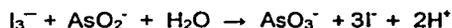


7. Valoración con el método del yodo.⁵ Se prepara una solución de yodo con 3 a 4 veces su peso de KI, agitando fuertemente para conseguir la disolución total del yodo:



Esta solución puede valorarse con As_2O_3 en solución alcalina, con exceso de NaOH . El exceso de álcali se neutraliza con HCl y la solución se tampona después con NaHCO_3 .

La valoración debe llevarse a cabo en un intervalo de pH de 5 a 9, según la reacción siguiente:



2.11 Usos del arsénico²

Los compuestos de arsénico tienen numerosas aplicaciones prácticas. A pesar de que una variedad de compuestos arsenicales orgánicos e inorgánicos son utilizados en el comercio, el trióxido de arsénico representó el 98% del arsénico consumido en 1988. El uso comercial de los compuestos de arsénico en este mismo año, medido en términos de arsénico elemental, fue el siguiente: conservadores para madera, 69%; productos agrícolas (herbicidas y desecantes), 23%; vidrio, 4%; aleaciones no ferrosas y electrónicos, 2% y aditivos para la alimentación animal y farmacéuticos, 2%.

El arseniato de cobre y cromo (CCA) es el conservador para madera mayormente usado de la variedad de compuestos arsenicales. Sin embargo, la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) ha restringido el uso de conservadores para madera con arsénico, para su uso sólo por empresas certificadas.

Los principales proveedores de arsénico para los Estados Unidos en los años 1986, 1987, y 1988 se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Importación anual de compuestos arsenicales. Medidas en toneladas.

País exportador	Año		
	1986	1987	1988
Canadá	1,924	2,012	2,086
Chile	1,659	4,800	6,709
Francia	6,274	5,341	6,909
México	4,408	4,457	4,187
Suecia	7,069	4,824	3,664
Otros*	4,394	5,409	4,501
<i>Total</i>	<i>25,728</i>	<i>26,843</i>	<i>28,056</i>

*Otros incluye Bélgica, Luxemburgo, China, Hong Kong, Japón, Filipinas, Sudáfrica y Alemania.

Los principales productores mundiales de trióxido de arsénico en 1988 fueron Chile, 7000 ton; Francia, 10000 ton; Suecia, 10000 ton y Rusia 8100 ton. La capacidad de producción total al 31 de diciembre de 1988 fue de 70000 ton. El precio del trióxido de arsénico (95% puro) en 1986 fue de 0.726 USD/Kg en Tacoma, Washington. Mientras que el precio para el trióxido arsénico mexicano (99.13% puro) fue en 1986 y 1987 de 0.968 USD/kg en Laredo, Texas.

El principal uso del arsénico en los Estados Unidos, se encuentra en la elaboración de sustancias químicas. Durante la década de los ochentas, los compuestos con arsénico fueron utilizados principalmente en la cosecha del algodón (uso que está actualmente restringido debido a consideraciones ambientales) y en la fabricación de conservadores para la madera, entre otros productos. El producto comercial básico, a partir del cual se manufacturan un número importante de derivados químicos, es el trióxido de arsénico.

El arsonato monosódico de metilo, $\text{CH}_3\text{AsONaOOH}$ (MSMA), el arsonato disódico de metilo, $\text{CH}_3\text{AsO}(\text{NaO})_2$ (DSMA), el ácido cacodílico, $(\text{CH}_3)_2\text{AsOOH}$, y el ácido arsénico, H_3AsO_4 , son usados en la agricultura. El MSMA, DSMA y el ácido cacodílico son usados como herbicidas, especialmente en los campos de algodón para controlar ciertas especies vegetales. El ácido arsénico y el ácido cacodílico pueden ser usados como desecantes para la desfoliación primaria del copo de algodón previa a la cosecha. El arsenato de calcio, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ alguna vez fue un producto químico importante para el control del gorgojo y el gusano del algodón (ya que actualmente no se utiliza). También el uso del arsenato de plomo, $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$, para cosechar fruta, está actualmente restringido.

El trióxido de arsénico refinado (99% mínimo), anteriormente usado como decolorante y afinante para la producción de botellas y otro tipo de objetos de vidrio, está siendo reemplazado por el ácido arsénico por razones ambientales. El ácido arsénico también es utilizado en la formulación de sales preservativas de la madera, como arsenato de cromo y cobre, $\text{CrO}_3 \cdot \text{CuO} \cdot \text{As}_2\text{O}_5$. El ácido arsenílico (ácido p-aminofenilarsónico), $\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_2\text{AsO}(\text{OH})_2$, se utiliza como aditivo en los alimentos para aves y cerdos, y el arsenito de sodio, NaAsO_2 , es útil en el lavado del ganado vacuno y ovino, para prevenir el ataque de parásitos.

Una demanda limitada pero importante de arsénico metálico de 99.99% de pureza, o aún más (arriba de 99.999%), existe en aplicaciones para semiconductores. Este arsénico de alta pureza puede ser preparado mediante la reducción de un compuesto arsenical de alta pureza, utilizando un reductor sólido o gaseoso.

El arsénico de alta pureza puede alearse con aluminio, galio e indio, formando compuestos semiconductores, como el arseniuro de aluminio, AlAs , el arseniuro de galio, GaAs , y el arseniuro de indio, InAs , respectivamente. Estos compuestos o derivados de estos, tales como el arseniuro de galio y aluminio, GaAlAs , el arsenofosfuro de galio GaAsP , y el arseniuro de indio y galio, InGaAs , son utilizados en la fabricación de instrumentos electrónicos. El arseniuro de aluminio y galio es utilizado en la fabricación de celdas solares de mayor eficiencia. Los compuestos de GaAs_xP_y son usados en la manufactura de diodos luminosos (LED) de luz roja (los LED amarillos se producen incrementando el contenido de fósforo). Los emisores y detectores infrarrojos de GaAs se utilizan en aplicaciones de fibra óptica. Este último compuesto también es usado en la elaboración de partes para microondas, circuitos integrados, láseres e instrumentos optoelectrónicos. El InGaAs es usado en láseres y fotodetectores.

El arsénico de alta pureza también es utilizado en la fabricación de aleaciones con selenio para fotorreceptores de copiadoras xerográficas. La cantidad de arsénico puede ser de 0.05%, 5.0% o 35% presente como triseleniuro de arsénico, As_2Se_3 .

En Estados Unidos, las aplicaciones de diversas sustancias químicas arsenicales están sujetas a registro y deben cumplir con las normas ambientales tanto federales como locales.

Hasta finales de los ochentas, los Estados Unidos fueron el principal abastecedor de trióxido de arsénico para uso doméstico. Ahora, sin embargo, este recae totalmente en las importaciones. La tabla 6 muestra la producción anual mundial y la importación de trióxido de arsénico por los Estados Unidos en la segunda mitad de la década de los ochentas.

Tabla 6. Producción mundial e importaciones de los Estados Unidos de trióxido de arsénico.

Año	Producción mundial, ton	Importaciones de EUA, ton	Valor, USD	Precio, USD/ton
1986	53,173	25,728	16,347,000	635.38
1987	52,351	26,843	16,800,000	625.86
1988	52,047	28,056	16,461,000	586.72
1989	52,390	28,348	13,526,000	477.14

2.12 Aleaciones del arsénico²

El arsénico metálico es usado principalmente en aleaciones con plomo, y en un menor contenido en aleaciones con cobre.

Se añaden trazas de arsénico en las rejillas de aleación plomo-antimonio usadas en las baterías de plomo-ácido. La adición de arsénico permite utilizar una menor cantidad de antimonio, minimizando así las características de autodescarga de las baterías que utilizan mayores concentraciones de antimonio, y sin pérdida significativa de las características de fundición, ni de dureza de la rejilla.

El arsénico, añadido en cantidades de 0.1 a 3%, mejora las propiedades de las aleaciones base plomo utilizadas para cojinetes (piezas mecánicas en las que se apoyan y giran los ejes de una maquinaria). El arsénico se añade hasta un 0.75% en las aleaciones utilizadas para tipos de imprenta metálicos para incrementar la dureza y la fidelidad de la fundición. La adición de 0.1% de arsénico en los electrotipos metálicos produce un efecto de grano fino sin afectar apreciablemente la dureza o la ductilidad. La adición de 0.5 a 2% de arsénico mejora la esfericidad de las municiones de plomo ya que aumenta la tensión superficial de la aleación. La soldadura de armazones para automóviles que contienen 92% de plomo, 5% de antimonio y 2.5% de estaño contiene también 0.50% de arsénico.

Adiciones menores de arsénico, 0.02 a 0.5%, al cobre y a las aleaciones de cobre elevan la temperatura de recristalización y mejoran la resistencia a la corrosión. En algunas aleaciones de bronce, pequeñas cantidades de arsénico inhiben la pérdida de zinc (dezincación) y minimizan la ruptura.

El cobre fosforizado y arsenicado (aleación 142) es usado para los intercambiadores de calor y los tubos de condensación. La aleación de cobre y arsénico en plomo, llamada metal Muntz (aleación 366), el bronce de almirante (aleación 443), el bronce naval (aleación 465) y el bronce al aluminio (aleación 687) son utilizados en condensadores, evaporadores, intercambiadores de calor y tubos de destilación. La composición de estas aleaciones se presenta en la tabla 6.

Tabla 6. Aleaciones de cobre-arsénico

No. de la aleación	Composición, por ciento en peso						
	Cu	As	Pb	Fe	Sn	P	Al
142	99.4	0.015 - 0.50				0.015 - 0.040	
366 ^a	58 - 61	0.02 - 0.10	0.40 - 0.9	0.15	0.25		
443 ^a	70 - 73	0.02 - 0.10	0.07	0.06	0.9 - 1.2		
465 ^a	59 - 62	0.02 - 0.10	0.20	0.10	0.5 - 1.0		1.8 - 2.5
687 ^a	76 - 79	0.02 - 0.10	0.07	0.06			

^a El zinc constituye el remanente de la composición.

2.13 Aspectos económicos²

La demanda por arsénico metálico es limitada. En 1990, la demanda en Estados Unidos de arsénico metálico, fue abastecida por la República Popular de China. El arsénico estaba siendo abastecido comúnmente (1974 - 1986) por ASARCO Inc. la cual desmanteló sus operaciones debido a presiones económicas y ambientales. A partir de ese entonces, el arsénico se importó desde Boliden Metall, Suecia, la cual suspendió su producción a finales de 1987 debido al bajo precio ofrecido por China.

El arsénico metálico comercial es vendido en fragmentos o terrones pequeños (de dimensiones entre 5 y 7.5 cm de diámetro, si se les considera esféricos), generalmente a una pureza del 99%. Los embarques de arsénico metálico enviados desde China fueron en ese tiempo esporádicos, y fueron también suspendidos temporalmente, en 1989. El metal no se vende en base a un precio establecido por lo que puede variar con cada cargamento. Los embarques a principios de 1990 se habían nivelado a un precio estimado de 2.20 USD/Kg.

El arsénico metálico de alta pureza (desde 99.99% hasta 99.999%) también está disponible comercialmente. El uso común de este es la fabricación de semiconductores. El arsénico metálico de alta pureza, se almacena normalmente en forma fragmentada, empacado en ampollitas de vidrio selladas al vacío para prevenir la oxidación. Los

Estados Unidos no son autosuficientes para satisfacer su demanda de arsénico de alta pureza y dependen de las importaciones provenientes principalmente de Japón, Canadá y el Reino Unido. El precio común del arsénico metálico grado semiconductor es alrededor de 100 USD/kg, pero el precio varía dependiendo de las especificaciones.

Las importaciones estimadas, tanto del arsénico grado comercial como del arsénico de alta pureza se enlistan en la tabla 7.

Tabla 7. Importaciones de los Estados Unidos de arsénico metálico grado comercial y grado de alta pureza.

Año	Grado comercial			Grado de alta pureza		
	Cantidad, ton	Valor total USD	Valor promedio USD/Kg	Cantidad, ton	Valor total USD	Valor promedio USD/kg
1986	378	1,260,000	3.33	17	1,385,000	81
1987	604	1,281,000	2.12	27	2,179,000	81
1988	574	951,000	1.66	25	1,674,000	67
1989	925	2,014,000	2.18	3	136,000	45

El arsénico y sus compuestos tienen algunos usos basados en sus propiedades físicas y químicas, pero la mayor parte del consumo consiste en aplicaciones relativas a su toxicidad. De la considerable proporción de arsénico blanco empleado en la fabricación de insecticidas, la mayor parte se convierte en arseniato de calcio y arseniato de plomo. Algunos productos farmacéuticos constituyen una partida importante desde el punto de vista sanitario, pero sólo exigen una pequeña fracción del arsénico disponible en el comercio. Algunos compuestos que contienen arsénico se utilizan como pigmentos, tal es el caso del verde de Scheele, diarsenito cúprico CuHASO_3 .⁴

2.14 Toxicidad del arsénico^{1,2}

La toxicidad del arsénico depende de su estado de oxidación, estructura química del compuesto que lo contiene y de la dispersión de éste en la biósfera. La toxicidad del arsénico varía desde niveles muy bajos hasta niveles extremadamente altos, dependiendo del estado químico del mismo. El arsénico metálico y el sulfuro arsenioso, As_2S_3 , son de baja toxicidad, mientras que la arsina es altamente tóxica.

Resultados con animales de laboratorio indican que el As^{3+} es más tóxico que el As^{5+} debido a que los compuestos pentavalentes tienen menor efecto en las actividades enzimáticas, pero el organismo puede reducirlos a compuestos trivalentes. La escala de toxicidad del arsénico decrece en el siguiente orden:



El arsénico ha sido clasificado como un carcinógeno por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC). Se ha reportado cierta asociación entre la exposición prolongada a altas concentraciones de compuestos arsenicales inorgánicos y la aparición de cáncer, pero la evidencia que sustenta esta relación es equívoca. Sin embargo, se ha comprobado la presencia de otras lesiones producidas por este tipo de compuestos, tales como la ulceración y perforación del séptum nasal, causada por As_2O_3 inhalado cuando no se toman las precauciones apropiadas, pero aún así, estas lesiones no han sido asociadas con procesos malignos.

El arsénico elemental ingerido se absorbe lentamente pero después se elimina; mientras que los compuestos solubles de arsénico se absorben rápidamente por el tracto intestinal. El As^{5+} y el arsénico orgánico son eliminados rápida y completamente por los riñones. El tiempo de vida media del arsénico inorgánico en el ser humano es de 2 a 40 días.

La toxicidad aguda de compuestos de arsénico en el hombre está en función de la capacidad de asimilación del cuerpo humano. La arsina (AsH_3) es considerada la forma más tóxica, seguida del arsenito (As^{3+}), de arseniato (As^{5+}) y los compuestos orgánicos de arsénico. La dosis letal para adultos es de aproximadamente de 1.5 mg/Kg de peso corporal. (como As_2O_3). El arsenito es 10 veces más tóxico que el arseniato.

La toxicidad por arsénico puede presentarse en dos formas: toxicidad aguda y toxicidad crónica. La toxicidad aguda es consecuencia de la ingestión de un alto contenido de arsénico en corto tiempo y la toxicidad crónica es el resultado de la ingestión de pequeñas cantidades de arsénico en un período de tiempo prolongado. La Agencia de Protección Ambiental y el Centro de Investigaciones sobre Cáncer de los Estados Unidos clasifican al arsénico como carcinógeno.

Se conoce que las principales vías de exposición del ser humano al arsénico son la ingestión e inhalación. Este se acumula en el organismo por exposición crónica y a ciertas concentraciones ocasiona afecciones tales como: alteraciones de la piel (relajamiento de los capilares cutáneos y dilatación de los mismos) con efectos secundarios en el sistema nervioso, además de irritación de los órganos del aparato respiratorio, gastrointestinal y hematopoyético, acumulación en huesos, músculos y piel, y en menor grado en hígado y riñones.

Entre los efectos tóxicos por consumo de agua con altos contenidos de arsénico pueden mencionarse: hiperpigmentación, hiperqueratosis, enfermedad del pie negro (escoriaciones oscuras en los pies), gangrena seca y cáncer de piel, cirrosis, hemoangioendotelioma, problemas de reabsorción renal, inhibición de la síntesis de la porfirina, alteración de los glóbulos blancos, aborto espontáneo, neuropatía periférica,

parálisis, pérdida de la audición, inhibición de algunas enzimas de la fosforilación oxidativa y de la reparación del ADN.

Los síntomas clínicos tempranos de la intoxicación aguda por arsénico se manifiestan con dolor abdominal, vómitos, diarrea, dolor muscular y debilidad con enrojecimiento de la piel. Estos síntomas están a menudo acompañados de entumecimiento y hormigueo de las extremidades, adormecimiento muscular y aparición de erupción cutánea. Pueden incluir además, parestesia de las extremidades, hiperqueratosis palmar y plantar, aparición de líneas blancas transversales en las uñas y deterioro progresivo de la respuesta sensorial y motora.

La evidencia epidemiológica de personas bajo ingestión prolongada de arsénico inorgánico, vía agua potable, es la hiperqueratosis palmo-plantar cuya manifestación principal es la pigmentación de la piel y callosidades localizadas en las palmas de las manos y plantas de los pies.

2.15 Normas de calidad del agua de desecho ^{6,7}

En México, como en otros países existen normas y leyes que regulan las características que deben cumplir los efluentes provenientes de la industria o de las poblaciones. A continuación se cita el título de la norma que rige actualmente en nuestro país:

NORMA Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

En esta norma se encuentran referencias a otras normas que establecen diferentes características a cumplir. En el caso del arsénico, se cita el título de la norma siguiente:

Norma Mexicana NMX-AA-046 Aguas-Determinación de arsénico en agua, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de abril de 1982.

Esta norma establece lo siguiente en referencia al límite de concentración de arsénico:

4. Especificaciones

4.1 Los límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no deben ser superiores a los indicados en la Tabla 8. Para las grasas y aceites es el promedio ponderado en función del caudal, resultante de los análisis practicados a cada una de las muestras simples.

4.2 Los límites máximos permisibles establecidos en la columna instantáneo, son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan.

Tabla 8. Límites máximos permisibles de metales pesados

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES			
PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Se cita a continuación lo referente a los límites máximos permisibles de metales, entre ellos el arsénico, presentes en las descargas a cuerpos de agua naturales y otros indicados en la tabla 9.

Tabla 9. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros

Parámetros (*)	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras						Suelo			
	Uso en riego agrícola (a)		Uso público urbano (b)		Protección de vida acuática (c)		Uso en riego agrícola (b)		Uso público urbano (c)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (a)		Recreación (b)		Estuarios (b)		Uso en riego agrícola (a)		Humedales naturales (b)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Artenico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuro	2	3	1	2	1	2	2	3	1	2	2	2	2	3	1	2	2	3	1	2
Cobre	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
Cromo	1	1.5	0.5	1	0.5	1	1	1.5	0.5	1	0.5	1	1	1.5	0.5	1	0.5	1	0.5	1
Mercurio	0.01	0.02	0.01	0	0.01	0	0	0	0.01	0	0.01	0.02	0	0.02	0	0	0.01	0	0.01	0
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.

P.D. = Promedio Diario

P.M. = Promedio Mensual

N.A. = No aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

2.16 Técnicas de remoción de arsénico a partir de agua contaminada ^{8,9}

Existen nueve categorías generales de procesos para la remoción del arsénico del agua:

1. Oxidación
2. Coagulación/Co-Precipitación
3. Sedimentación
4. Filtración
5. Adsorción
6. Intercambio Iónico
7. Separación por Membrana/Ósmosis Inversa
8. Tratamiento Biológico
9. Destilación Solar.

A continuación se explican brevemente cada uno de los anteriores:

1. Oxidación. De las dos formas predominantes de arsénico en agua, arsenito y arseniato, la mayoría de los procesos de tratamiento son eficaces para remover el arseniato, pero no el arsenito, ya que éste último no se encuentra ionizado eléctricamente por debajo de pH igual a 9.2. Por consiguiente, el tratamiento para la remoción de arsénico incluye frecuentemente un paso previo de oxidación para convertir el arsenito a arseniato.

La oxidación puede simplemente ser la adición de oxígeno a un compuesto, o cualquier reacción que involucre la pérdida de electrones de un átomo. La aireación oxida al arsénico y convierte el arsenito a arseniato, y éste a su vez, reacciona con el hierro que coexiste en el agua y se precipita como FeAsO_4 . El arsénico también puede ser oxidado a través de otros agentes químicos tales como el cloro, hipoclorito, ozono,

permanganato, peróxido de hidrógeno y el reactivo de Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$). La oxidación fotoquímica puede proceder vía una reacción de energía radiante y el sistema químico. La oxidación no remueve el arsénico de la solución por lo que debe combinarse con un proceso de remoción de arsénico.

2. Coagulación/Co-precipitación. La coagulación abarca todas las reacciones, mecanismos y resultados en el proceso global de crecimiento de la partícula (formación del flóculo) y la agregación de la misma dentro del agua en tratamiento, e incluye también la formación *in situ* del coagulante, desestabilización química de la partícula y contactos físicos entre partículas.

La coagulación involucra la remoción de partículas coloidales (0.001 - 100 micras) y sedimentables (>100 micras). Sin embargo, el término también se refiere normalmente a la remoción de iones disueltos (< 0.001 micras), que conlleva a una precipitación. La precipitación química es el proceso por el que los iones disueltos en la solución forman un sólido insoluble vía una reacción química. Por ejemplo, el hierro disuelto naturalmente en aguas superficiales forma un precipitado cuando se expone al oxígeno. La co-precipitación ocurre cuando un contaminante inorgánico forma un complejo insoluble con el coagulante. Tanto la valencia del contaminante inorgánico como el pH de la solución son factores importantes para la remoción por co-precipitación.

Existen cuatro tipos de fenómenos de co-precipitación:

a) Inclusión. La inclusión es la captura mecánica de una porción de la solución que rodea la partícula creciente. Comúnmente esto sólo es significativo para cristales grandes.

b) Adsorción. La adsorción es la unión de una impureza en la superficie de una partícula o precipitado. Este tipo de co-precipitación generalmente no es importante si el tamaño de la partícula es grande, debido a que éstas tienen áreas de superficie muy pequeñas en proporción a la cantidad de precipitado que contienen. La adsorción puede ser un medio mayor de remoción de contaminantes si las partículas son pequeñas.

c) Oclusión. La oclusión sucede cuando el contaminante es atrapado en el interior de una partícula de precipitado. Este tipo de co-precipitación ocurre por adsorción del contaminante en la superficie de una partícula creciente, seguida por el crecimiento continuo de la partícula hasta que encierra al contaminante adsorbido.

d) Formación del sólido-solución. Otro tipo de oclusión ocurre cuando una partícula de precipitado se contamina con un tipo diferente de partícula que precipita bajo condiciones similares y que se forma a partir de iones cuyos tamaños son casi iguales a aquellos del precipitado original.

La coagulación convierte al arsénico soluble en productos de reacción insolubles y permite la separación por sedimentación y/o filtración. Los factores que afectan la remoción de arsénico por coagulación/co-precipitación incluyen: el tipo de coagulante y la dosis, el tipo de mezclado y la velocidad, el pH, el estado de oxidación del arsénico y su concentración, así como la presencia de solutos inorgánicos. Tres mecanismos están potencialmente involucrados en la remoción del arsénico:

- a) Precipitación: debida a la formación de compuestos insolubles $Al(AsO_4)$ o $Fe(AsO_4)$.
- b) Co-precipitación: debida a la incorporación de especies de arsénico solubles en el flóculo de hidróxido del metal.

c) Adsorción: debida a las fuerzas de atracción electrostática del arsénico soluble a las superficies externas de los hidróxidos metálicos insolubles.

La precipitación directa juega el papel principal en la remoción del arsénico, sin embargo, la co-precipitación y adsorción son mecanismos de remoción de arsénico activo.

3. Sedimentación. La sedimentación es la separación por gravedad de sólidos a partir de líquidos y generalmente se usa junto con la coagulación/co-precipitación.

4. Filtración. La filtración convencional es la separación de partículas sólidas del agua pasando la mezcla a través de un medio poroso. Las partículas son removidas durante la filtración como resultado de un mecanismo o combinación de los siguientes: la fatiga mecánica, la sedimentación, la floculación, adsorción y / o metabolismo biológico. El medio filtrante puede ser de varios materiales, por ejemplo, arena, antracita, carbón activado, tela, papel entre otros, ya que retienen los sólidos en su superficie y permiten el paso del agua. Las partículas más comúnmente removidas incluyen cieno, arcilla, materia orgánica natural precipitada y coloidal, precipitados naturales de hierro y manganeso, precipitados a partir de sales metálicas o coagulación por polímeros y microorganismos.

Los filtros pueden ser clasificados de varias maneras dependiendo del tipo de medio granular usado, el sistema hidráulico utilizado (por ejemplo, gravedad, de flujo inducido), el rango de filtración, y / o el tipo de acumulación de partículas (por ejemplo, torta de filtración, filtración de profundidad).

5. Adsorción. La adsorción es la acumulación de materiales en la interfase, es decir, la capa límite líquido / sólido. Es un proceso de transferencia de masa donde una sustancia se transfiere de la fase líquida a la superficie de un sólido y es limitada por

fuerzas químicas o físicas. La adsorción puede tener lugar en las partículas suspendidas como parte del proceso de coagulación/co-precipitación o en medios de adsorción fijos. Dado que la adsorción es un fenómeno de superficie, mientras mayor sea el área de la superficie del medio, mayor es la capacidad de acumulación de material. Cada medio de adsorción tiene propiedades asociadas diferentes, desempeños y costos. El arsénico es adsorbido en la superficie de varios adsorbentes granulares, activados, arcillosos y celulósicos, incluyendo:

- óxidos (óxido férrico hidratado, óxido de titanio, óxido de silicio),
- arena recubierta de óxido de hierro o dióxido de manganeso ,
- bauxita, hematita, feldespato,
- minerales arcillosos (kaolín, bentonita, arcilla de Bijoypur),
- resinas sintéticas de intercambio aniónico,
- carbón de hueso
- materiales celulósicos (aserrín, pulpa de papel).

6. Intercambio Iónico. El intercambio iónico es el intercambio reversible de iones entre el sólido y la fase líquida de manera que no hay ningún cambio permanente en la estructura del sólido. Desarrollado para las aplicaciones a gran escala, el intercambio iónico probablemente no es apropiado para el volumen que representan los pozos de bombeo manual, pero podría usarse a pequeña escala en poblaciones pequeñas.

Las resinas sintéticas de intercambio iónico están basadas en una matriz de polímeros entrecruzados, comúnmente compuesta de poliestireno entrecruzado con divinilbenceno. Los grupos funcionales cargados se ligan a la matriz a través de enlaces

covalentes, y pueden clasificarse en cuatro grupos: fuertemente ácido, débilmente ácido, fuertemente básico y débilmente básico. Las diferentes resinas de intercambio aniónico de base fuerte son comerciales, y pueden remover el arsénico eficazmente del agua, produciendo efluentes con menos de 1 µg/L. El arsénico que no está ionizado, no será removido, a menos que se incluya en el proceso un paso previo de oxidación para convertir el arsenito a arseniato.

Las resinas sulfato-selectivas convencionales son particularmente adecuadas para la remoción del arseniato. Las resinas nitrato-selectivas también remueven arsénico, pero la ruptura por arsénico ocurre antes. Los intercambiadores iónicos son comúnmente columnas de flujo vertical (gravitacional) empacadas con perlas de la resina de intercambio, estas últimas presaturadas con el ión de intercambio. Se pasa agua de la fuente a través del empaque hasta la desaparición del contaminante no deseado en el efluente. En esta fase, las resinas de intercambio iónico se reactivan con una solución regenerante y se enjuagan con agua durante otro ciclo del tratamiento. Tanto el potencial redox, como el pH, son factores importantes con respecto a la remoción del arsénico por intercambio iónico.

7. Separación por Membrana/Ósmosis Inversa. La separación por medio de membranas, utiliza membranas semi-permeables, es decir, son selectivamente permeables al agua y a ciertos solutos para así separar impurezas del agua. Las membranas son capaces de remover diversos tipos de sólidos disueltos, incluso el arsénico del agua. Sin embargo, son normalmente caras y por consiguiente se utilizan comúnmente en aplicaciones como la desalinización (que es la purificación de agua salobre) y para la remoción de iones específicos.

Existen diferentes alternativas en el uso de membranas: microfiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis, ultrafiltración y nanofiltración. La eficiencia del tratamiento por proceso de membrana depende de la calidad del agua de alimentación y la calidad deseada del agua producida. Generalmente, mientras más contaminada sea el agua de alimentación y más alta la calidad deseada del agua producida, es mayor la probabilidad de falla de la membrana causada por interacción con los materiales, y en particular por el tamaño de partícula e incluso por una reacción biológica.

8. Tratamiento Biológico. El tratamiento biológico transforma, estabiliza y/o remueve el arsénico por medio de ciertas bacterias específicas. Este se lleva a cabo mediante oxidación/reducción, mineralización, destoxificación o metilación. Los factores críticos incluyen provisiones de energía y de carbono, condiciones aerobias o anaerobias, temperatura y pH.

9. Destilación solar. La destilación solar emplea la energía del sol para evaporar el agua que posteriormente se recondensa. El proceso de evaporación y recondensación separa todos los químicos, incluso el arsénico, del agua. En Bangladesh, donde la energía solar es abundante, esta propuesta puede ser adecuada, sobretodo para su aplicación en áreas críticas, y también lo sería en áreas rurales si pueden desarrollarse propuestas rentables.

Capítulo 3

Discusión

Como resultado de las diversas actividades industriales que involucran la utilización de arsénico, se pueden clasificar los efluentes producidos de acuerdo a la concentración y al tipo de especie química con arsénico que contienen, así como al volumen de los mismos. Además, puede especificarse aún más la clasificación caracterizando factores como el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica, entre otros. Esto significa que el tratamiento de remoción de arsénico y sus compuestos derivados, adecuado para un tipo de industria, no será adecuado para otra. Para efluentes de bajo caudal y baja concentración, el tratamiento con membranas sería una buena opción, variando la calidad del agua producida; mientras que, para efluentes muy concentrados y de gran volumen, la oxidación (química o biológica), acompañada de coagulación/co-precipitación y posterior sedimentación y filtración sería la mejor opción en la remoción de un porcentaje alto del contaminante.

Lo anterior ofrece la oportunidad de producir agua para riego, si el tratamiento es eficiente, lo que lo convierte además en una opción económica rentable para el industrial que se preocupa por cumplir las normas ecológicas y al mismo tiempo cuidar la economía de su empresa. Hay que considerar además que, la calidad del agua deseada al final del tratamiento influye en el diseño del proceso a seguir y costo del mismo. No será lo mismo cumplir con los límites permisibles de arsénico para descargar el efluente en aguas costeras, que en ríos o lagos, o reutilizar el agua para riego; o aún más, el tratar el efluente hasta la calidad potable está controlado por límites mucho más estrictos y en consecuencia genera procesos aún más costosos.

Por último, hay que hacer notar que la preocupación por la concentración de arsénico en el agua para consumo humano es de interés mundial debido a que la toxicidad de los compuestos arsenicales y las patologías derivadas de su ingestión,

representan un riesgo público de importancia económica y social notable. De hecho, **la OMS recomendó en 1992 un límite máximo para el arsénico en el agua potable de 10 microgramos por litro**, por lo tanto es notable el interés que existe en encontrar soluciones efectivas. Pro ejemplo, actualmente, por ejemplo, Bayer de Alemania en colaboración con Severn Trent Pic de Gran Bretaña han desarrollado un proceso simple y de bajo costo para remover arsénico del agua potable, al que han denominado Sorb 33TM. El sistema se basa en la adsorción de los compuestos arsenicales sobre una fina capa de óxido de hierro compuesto, llamado Bayoxide E33. Como resultado, en Reino Unido se han instalado plantas de tratamiento en Burton Joyce (septiembre de 2001), Chaddesley Corbett, (noviembre de 2001) y existen 14 plantas más en construcción en la región de Midlands.¹⁰

Capítulo 4

Conclusiones

- El arsénico representa un problema importante de salud nacional debido a la presencia de compuestos arsenicales naturales o derivados de la extracción minera y de actividades industriales en las fuentes abastecedoras de agua de algunos estados de nuestro país. El problema es agudo en países productores de arsénico (México es el segundo productor después de Estados Unidos) tales como la India, Bangladesh y China, donde la concentración de arsénico en el agua puede alcanzar niveles de varios miligramos por litro.
- El arsénico presentará diversas concentraciones y formará diferentes especies químicas en equilibrio, de acuerdo a factores tales como la oxigenación del medio acuático, pH, temperatura, presencia de agentes reductores y de otros iones metálicos como el hierro.
- Los efluentes deberán clasificarse no sólo respecto a la concentración de especies químicas arsenicales que presenten y a las especies químicas que coexisten en equilibrio con las primeras, sino también en función de factores como pH, temperatura y conductividad eléctrica; y de manera importante del caudal, de los límites máximos de arsénico presente en los cuerpos de agua a descargar y de la calidad del agua deseada después del tratamiento.
- Para altas concentraciones y grandes caudales se recomienda el tratamiento vía coagulación/co-precipitación, previo paso de oxidación (que puede ser química o biológica), seguido por una sedimentación y posterior filtración. Este tipo de tratamiento remueve altos porcentajes de arsénico y puede producir agua con calidad para riego.

- Puede recomendarse la utilización de membranas selectivas con ósmosis inversa o de un sistema de intercambio iónico para tratar caudales mínimos y de baja concentración, o para la purificación del agua producida en el tratamiento anterior con el fin de elevar su calidad hasta hacerla potable, lo que obviamente aumenta el costo del proceso. O bien, puede efectuarse el tratamiento por adsorción que resulta más rentable por el menor costo de mantenimiento de los equipos, a diferencia de los equipos de intercambio iónico, cuya operación es más complicada y su costo de mantenimiento es mayor.

Bibliografía

1. Castro de Esparza, M. L. y Young, M. "Remoción de arsénico a nivel domiciliario.", Congreso de Ingeniería Sanitaria, CEPIS: HTDT74 Argentina (1999)
2. Kirk-Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley and Sons, US(1989), V. 3, pp. 625-59
3. Pourbaix, M., Zoubov, N., Van Muylder, J., et al, Atlas d'Equilibres Electrochimiques, Gauthier-Villars et Cie, Paris, France (1963), pp. 516-523
4. Vogel, Arthur I., Química Analítica Cualitativa, Ed. Kapelus, México (1985)
5. Ayres, Gilbert H., Análisis Químico Cuantitativo, Ed. Haría, México (1970)
6. Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
7. Norma Mexicana NMX-AA-046 Aguas-Determinación de arsénico en agua, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de abril de 1982.
8. Clifford, D., "Ion Exchange and Inorganic Adsorption." In: Letterman (Ed). Water Quality and Treatment, 5th Edition. American Water Works Association, McGraw Hill, New York. (1999)
9. Johnston, R.; Heijnen, H. "Safe Water Technology for Arsenic Removal." In: Ahmed, M.F. et. al. [Eds]. Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water. Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka. Bangladesh (2001)
10. <http://www.bayerandina.com/bayerand.nsf/noticias/abr02noti13?OpenDocument>