

Capítulo 1

REMOCIÓN DE ARSÉNICO A NIVEL DOMICILIARIO

Resumen

En México se ha detectado la presencia de arsénico en cuerpos de agua que se utilizan para el abastecimiento de la población: la Comarca Lagunera, Zimapán, Hgo., Acambaro, Gto., Zacatecas, Zac., Delicias, Meoqui, Camargo Jiménez, Chih., Huautla, Mor., lugares donde se alcanzan concentraciones superiores a lo señalado por la NOM.127-SSA1 (0.05 mg L^{-1}).

Las principales rutas de exposición son la ingesta y la inhalación. El arsénico se acumula en el organismo por exposición crónica y puede causar afecciones tales como alteraciones de la piel, efectos secundarios en el sistema nervioso, irritación de los órganos del aparato respiratorio, gastrointestinal y hematopoyético, y acumulación en los huesos, músculos y piel y, en menor grado, en hígado y riñones.

La evidencia epidemiológica de personas que han ingerido por un tiempo prolongado arsénico inorgánico vía agua de bebida, son la hiperqueratosis palmo-plantar, cuya manifestación principal es la pigmentación de la piel, la hiperqueratosis papular, el carcinoma epidermoide y la presencia de callosidades localizadas en las palmas de las manos y pies.

En este estudio se presentan los resultados de la remoción de arsénico mediante el proceso de coagulación-floculación a pH natural del agua, empleando hipoclorito de calcio (CaOCl_2) de alta pureza (65-70%) para oxidar As(III) a As(V); sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) como coagulante, y materiales sólidos (MS) que favorecen la formación de flóculos. Las pruebas en el laboratorio definieron la mejor mezcla de reactivos, obteniéndose remociones de arsénico hasta del 93%.

La mezcla se probó en un prototipo intradomiciliario con agua procedente de Huautla, Morelos, y de Zimapán, Hidalgo, cuyas concentraciones de arsénico eran de 0.1 y 0.5 mg As L^{-1} , respectivamente; después del tratamiento se alcanzaron concentraciones de 0.035 y 0.041 mg L^{-1} de arsénico residual, valores que cumplen con la NOM-127SSA1. El método es de fácil operación y bajo costo, pero debe ser calibrado en función de la calidad del agua a tratar.

Palabras clave: arsénico, potabilización.

Introducción

En México se estima que alrededor de 500,000 habitantes de comunidades rurales del país ingieren agua con concentraciones superiores a $0.05 \text{ mg As L}^{-1}$, lo cual representa un grave problema de salud pública. Dentro de los compuestos arsenicales inorgánicos más comunes destacan la arsina, los arsenatos y arsenitos que se presentan en la atmósfera, en el agua y en el suelo, combinados con elementos como el plomo, zinc, hierro, antimonio, azufre, cobre, plata y oro.

Las principales rutas de exposición del ser humano al arsénico son la ingesta y la inhalación, siendo acumulable este elemento en el organismo por exposición crónica. A ciertas concentraciones el arsénico ocasiona afecciones como: alteraciones de la piel, efectos secundarios en el sistema nervioso, irritación de los órganos del aparato respiratorio, gastro-intestinal y hematopoyético y acumulación en los huesos, músculos y piel, y, en menor grado, en hígado y riñones.



Figura 1. Efecto causado por el arsénico.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América, USEPA, clasifica al arsénico como cancerígeno en el grupo A, debido a la evidencia de sus efectos adversos sobre la salud. La exposición a 0.05 mg L⁻¹ puede causar 31.33 casos de cáncer de la piel por cada 1,000 habitantes. La eliminación natural del organismo humano es por vía urinaria, heces, sudor y epitelio de la piel (descamación). Algunos estudios de toxicidad del arsénico indican que muchas de las normas actuales basadas en las guías de la OMS señalan concentraciones muy altas y plantean la necesidad de reevaluar los valores límites basándose en estudios epidemiológicos. En la Tabla 1 se presentan diferentes valores guías para el arsénico establecidos por varias agencias reguladoras.

Tabla 1. Valores Guías

Valores Guías – Arsénico	
País/Organización	µg L ⁻¹
Canadá	0.025
USA	0.050
Francia	0.050
Alemania	0.040
OMS	0.050
CEE	0.050
India	0.050
China	0.050
Taiwan	0.050

El arsénico en el agua natural

El arsénico presenta cuatro estados de oxidación bajo condiciones normales siendo las más comunes su estados trivalente (arsenitos) y pentavalente (arsenatos). En aguas naturales de pH 5 a 9 predominan las especies H₂AsO₄⁻, HAsO₄⁻², H₃AsO₃ y H₂AsO₃⁻. Las condiciones que favorecen la oxidación química y biológica inducen el cambio a especies pentavalentes y, a la inversa, aquellas que favorecen la reducción cambian el equilibrio al estado trivalente.

La ionización de arsénico está expresada por la constante de disociación, pK_a , cuyos valores para el arsenato y arsenito son:

Arsenato: H_3AsO_4	$pK_1 = 2.2$	$pK_2 = 6.94$	$pK_3 = 11.5$
Arsenito: H_3AsO_3	$pK_1 = 9.2$	$pK_2 = 14.22^*$	$pK_3 = 19.22^*$

*valores extrapolados

Como puede observarse, las constantes de disociación para el As (V) son menores que las del As (III), por lo que su grado de disociación es más elevado. La capacidad de ionización del As (V) le permite combinarse fácilmente con otros compuestos, lo cual hace que su remoción por diversos métodos sea más eficiente, en comparación con la del As(III); de ahí la importancia de oxidar el arsenito antes de someter el agua a algún tipo de tratamiento. Los cambios en el estado de ionización para el arsenato y el arsenito ocurren a diferente pH, tal como se observa en la *Figura 2*.

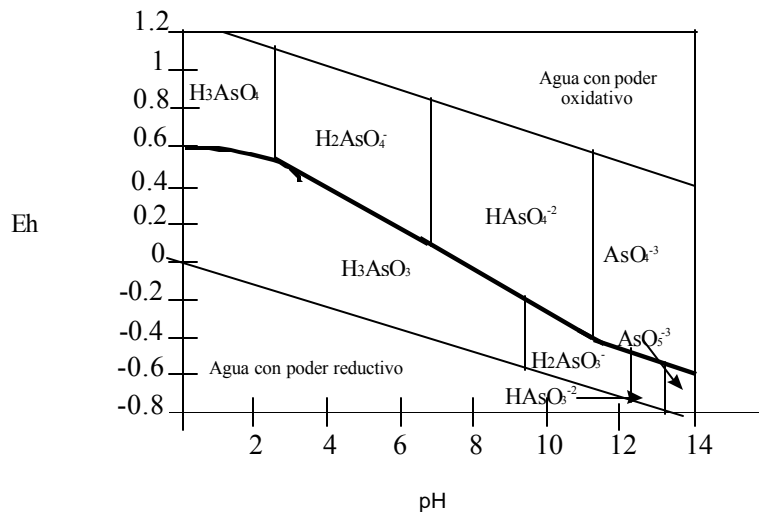


Figura 2. Distribución de las especies de arsénico en función de pH – Eh

Remoción de arsénico del agua

El tratamiento de agua potable convencional está orientado a remover color, turbiedad y microorganismos. Esta remoción se logra a través de una combinación adecuada de procesos de: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Pero cuando se desea remover elementos químicos del agua, como el arsénico es necesario, en ocasiones, recurrir a métodos más complejos.

Las tecnologías utilizadas generalmente para remoción de arsénico, además de coagulación y floculación, son: adsorción-coprecipitación usando sales de hierro y aluminio, adsorción en alúmina activada, ósmosis inversa, intercambio iónico y oxidación seguida de filtración.

En las plantas de tratamiento de agua, el As^{+5} puede ser removido en forma efectiva por coagulación con sulfato de aluminio o hierro y por los procesos de ablandamiento con cal. Los coagulantes señalados se hidrolizan formando hidróxidos, sobre los cuales el As^{+5} se absorbe y coprecipita con otros iones metálicos, mejorando las eficiencias de remoción, con valores semejantes a los señalados en la Tabla 2.

Tabla 2. Eficiencia de coagulantes en la remoción de arsénico.

Coagulante	Arsenato As ⁺⁵		Arsenito As ⁺³	
	Remoción (%)	pH	Remoción (%)	pH
Sulfato férrico (Fe ₂ SO ₄) ₅	100	< 9.0	20	< 9.0
Sulfato de aluminio Al ₂ (SO ₄) ₃	90	< 7.0	50	< 7.0

La remoción de arsénico con procesos convencionales de coagulación con sales de hierro o aluminio y ablandamiento con cal son dependientes del pH del agua tratada, del tipo y dosis de coagulantes así como de la concentración inicial de este elemento.

La eficiencia de remoción de As⁺⁵ comparada con la de As⁺³ justifica la oxidación del agua subterránea antes del tratamiento. La oxidación del As⁺³ a As⁺⁵ se produce de acuerdo a las siguientes reacciones (1 y 2):



Objetivo

Investigar y desarrollar una metodología simple y de bajo costo que permita remover, a nivel domiciliario, el arsénico natural presente en las aguas subterráneas que son usadas para bebida en poblaciones rurales y desprotegidas.

Metodología

El estudio estuvo orientado a desarrollar:

- Bibliografía sobre los posibles métodos de remoción de arsénico en aguas subterráneas.
- La selección de los materiales oxidante, coagulante y arcilla.
- Pruebas de eficiencia de cada producto en forma individual, para establecer la combinación óptima de los productos seleccionados.
- Adecuación de un prototipo intradomiciliario para obtener 20 litros de agua tratada.
- Pruebas con agua natural a diferentes concentraciones de arsénico, para seleccionar la combinación óptima de productos.
- Estimación del costo del dispositivo.

Durante las pruebas se crearon condiciones apropiadas para producir una buena coagulación de los coloides y una buena adsorción del arsénico en éstos y en los flocs formados. Como el agua subterránea y el agua preparada a tratar no tiene turbiedad, se le adicionaron coloides (arcilla verde natural). El estudio se realizó de acuerdo a la siguiente secuencia:

Composición artificial de la calidad del agua a tratar

En el laboratorio se preparó un agua sintética, utilizando para ello sales grado analítico. La concentración de arsénico total en el agua sintética fue de 1 mgAs L⁻¹, en una proporción 30:70 de As(III) : As(V).

Selección de los productos

Oxidante, arcilla natural y coagulante

En la introducción se indicó la conveniencia de la oxidación del As⁺³, que predomina en las aguas subterráneas antes del tratamiento con coagulación. Debido a que los arsenitos se oxidan fácilmente a arsenatos con cloro, se seleccionó el hipoclorito de calcio al 65% de cloro activo como material oxidante. La arcilla empleada fue arcilla verde natural. El coagulante seleccionado para las pruebas fue el sulfato de aluminio comercial en forma granular (de mayor

disponibilidad en el mercado) con 48-49% de pureza, debido a que es conocido que los arsenatos se precipitan o se absorben sobre los hidróxidos de aluminio mediante reacciones superficiales específicas.

Ensayos estándar y parámetros evaluados

Las pruebas se hicieron por lotes a pH natural, evaluando el grado de remoción de As en condiciones de estabilidad del sistema agua/arcilla/coagulante/arsénico.

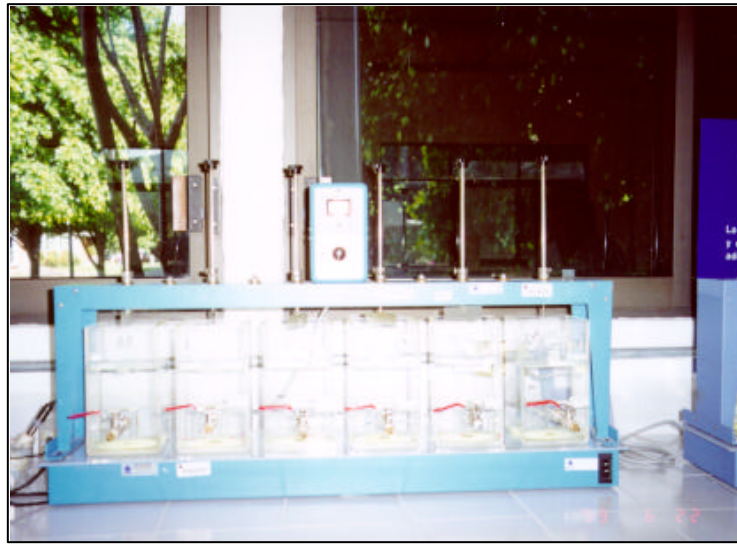


Figura 3. Equipo de prueba de jarras.

También se probó la mejor combinación de productos a nivel laboratorio, empleando para ello agua natural de Zimapán, Hgo. y Huautla, Mor., y un recipiente de plástico de veinte litros de capacidad, al cual se le acondicionó un soporte y manivela giratoria de acrílico que permitieron reproducir las condiciones de mezcla. Los parámetros de operación se optimizaron en el prototipo (gradiente y tiempo de floculación), ya que éstos varían de acuerdo a la calidad del agua de cada localidad.

Métodos y control de la calidad

Los análisis se realizaron de acuerdo a los métodos estándar de la AWWA 19 Edic. El análisis de arsénico y aluminio por espectrofotometría de absorción atómica con llama de óxido nitroso y generador de hidruros respectivamente. El cloro residual se midió con el método de DPD.

Evaluación individual de la capacidad de remoción del sistema

- Dosificación de cada uno de los componentes en forma independiente por proceso de acuerdo a ensayo estándar, para evaluar su comportamiento y servir de comparación en la evaluación de la eficiencia de remoción de las combinaciones utilizadas en el tratamiento del agua con varias concentraciones de arsénico a remover.
- Dosificación de arcillas y coagulantes sin oxidación del agua a tratar.

Evaluación de las combinación y selección de la combinación óptima

- Dosificación en condiciones controladas empleando el equipo de prueba de jarras (Figura 3) a diferentes concentraciones de coloides (arcillas), oxidante (cloro) y coagulantes (sulfato de aluminio).

- Se utilizaron recipientes de dos litros de forma cuadrada, con un dispositivo de toma de muestra a 10 cm por debajo del nivel del agua en la jarra.
- Para la determinación de la mejor dosis de coagulante se utilizó agua sintética con 1 mgAs L⁻¹ y se emplearon dosis de coagulante en un rango que vario entre 40 y 80 mg L⁻¹. Las concentraciones de arsénico residual con respecto a la dosis de sulfato de aluminio mostraron que los valores más bajos se obtienen al aplicar 70 y 80 mg L⁻¹ de coagulante.
- Los diferentes materiales empleados para favorecer la formación de flóculos, se aplicaron en combinación con el coagulante y oxidante, variando las dosis de los diversos materiales con el fin de determinar la mejor combinación entre ellos.

Selección de la mezcla apropiada coagulante/arcilla/oxidante

Se dosificaron 3 tipos de arcilla, dos activadas y una natural, así como dos clases de zeolita una activada y otra natural y finalmente carbón de hueso. En la Tabla 3 se muestran las combinaciones de reactivos y materiales, así como los porcentajes de remoción de arsénico que se obtuvieron en las pruebas de jarras. De acuerdo con estos resultados se comprobó que la mejor dosis corresponde a 80 mg L⁻¹ de coagulante y 500 m L⁻¹ de arcilla verde natural, por ser las cantidades con las que se obtiene la menor concentración de arsénico la cual corresponde a 0.049 mg L⁻¹, valor que cumple con la NOM-127 SSA1.

Tabla 3. Eficiencias de remoción de arsénico de agua sintética (1 mgL⁻¹).

Mezcla Coag/Arcilla/oxidante (mg/l)	Arsénico residual mg/l	% Rem.	Mezcla Coag/Arcilla/oxidante (mg/l)	Arsénico residual mg/l	% Rem.
ARCILLA ACTIVADA 126FF			ARCILLA ACTIVADA 124FF		
60/500/0.8	0.126	86.0	60/500/0.8	0.107	87.8
70/500/0.8	0.088	90.2	70/500/0.8	0.073	91.7
80/500/0.8	0.064	92.9	80/500/0.8	0.057	93.5
60/750/0.8	0.119	86.0	60/750/0.8	0.188	77.7
70/750/0.8	0.078	90.9	70/750/0.8	0.188	77.7
80/750/0.8	0.062	92.7	80/750/0.8	0.102	87.9
60/1000/0.8	0.122	86.1	60/1000/0.8	0.174	79.2
70/1000/0.8	0.083	90.5	70/1000/0.8	0.155	81.5
80/1000/0.8	0.07	92.0	80/1000/0.8	0.121	85.6
ARCILLA VERDE NATURAL			ZEOLITA VERDE		
60/.500/0.8	0.099	88.1	80/300/1.5	0.066	92.7
70/500/0.8	0.067	92.0	80/1000/1.8	0.057	93.3
80/500/0.8	0.049	94.1	ZEOLITA ACTIVADA		
60/750/0.8	0.093	89.0	80/300/1.5	0.054	94.2
70/750/0.8	0.081	90.4	70/500/0.8	0.084	90.6
80/750/0.8	0.05	94.1	80/500/0.8	0.07	92.2
60/1000/0.8	0.3	67.4	70/1000/0.8	0.077	91.8
70/1000/0.8	0.087	90.6	80/1000/0.8	0.049	94.8
80/1000/0.8	0.062	93.3			
CARBÓN DE HUESO					
70/100/1.75	0.088	89.7	80/300/1.75	0.057	93.26
80/100/1.75	0.061	92.9	80/500/2.0	0.069	91.47
70/300/1.75	0.085	89.95	80/1000/1.75	0.106	87.4

Efecto del oxidante (hipoclorito de calcio de alta pureza 65- 70%)

Se evaluó el efecto del oxidante en la remoción de arsénico, realizando pruebas de jarras con y sin adición de reactivo. Para ello se emplearon sulfato de aluminio y arcilla verde natural. En la Tabla 4 se presentan las eficiencias de remoción de arsénico obtenidas.

Tabla 4. Efecto del oxidante en la eficiencia de remoción de arsénico.

Dosis de Arcilla mg/l	Dosis de $Al_2(SO_4)_3$ mg/l	Arsénico residual (mg/l)	% Rem. sin Oxidante	Arsénico Residual (mg/l)	% Rem. con oxidante
500	60	0.355	58.5	0.119	86.0
500	70	0.335	60.8	0.078	90.9
500	80	0.328	61.6	0.062	92.7

Tiempo de contacto del oxidante

Por lo que respecta al tiempo de contacto del oxidante con el agua sintética, y empleando la dosis de reactivos seleccionada, se pudo apreciar que para diferentes tiempos de contacto, no existe variación apreciable en las concentraciones de arsénico residual. En la Tabla 5 se muestran las concentraciones residuales de arsénico y los porcentajes de remoción para cada tiempo de contacto.

Tabla 5. Influencia del tiempo de contacto del oxidante en la concentración de arsénico.

Tiempo de Contacto (min)	Dosis de Arcilla verde natural mg/l	Dosis de $Al_2(SO_4)_3$ mg/l	Dosis oxidante mg/l	Cloro residual (mg/l)	Arsénico Residual (mg/l)	% Rem.
5	500	80	0.8	0.25	0.049	92.6
10	500	80	0.8	0.25	0.050	92.7
15	500	80	0.8	0.27	0.059	91.3
20	500	80	0.8	0.24	0.058	91.4

Cantidad de ayudante de coagulación en agua natural de Huautla, Mor., y Zimapán, Hgo.

Tomando en consideración que las características fisicoquímicas del agua natural pueden modificar los parámetros operacionales, se realizaron pruebas de jarras con la dosis de sulfato de aluminio seleccionada (80 mgL^{-1}), y variando la cantidad de arcilla.

Con el agua de Huautla, Mor., (0.125 mgL^{-1}), al adicionar diferentes dosis de arcilla verde, se aprecia que no hay influencia en los porcentajes de remoción del contaminante, lo cual se debe a que la muestra no contiene elementos que favorezcan la coagulación (turbiedad, hierro); no obstante, la concentración de arsénico residual se encuentra por debajo de la norma, aún cuando los porcentajes promedio de remoción son del 81% (Tabla 6).

En lo que respecta a la calidad del agua de Zimapán, Hgo., (0.44 mgL^{-1}), se observa una mejora en la eficiencia de remoción del contaminante al agregar diferentes cantidades de arcilla (Tabla 6).

Tabla 6. Pruebas para evaluar diferentes dosis de arcilla.

Conc.arsénico en agua natural (mg/l)	Mezcla coag/arcilla/oxid (mg/l)	Turbiedad (NTU)	Color (Upt-Co)	pH	Arsénico residual (mg/l)	% Remoción
0.125 (Morelos)	80/0/0.8	1.5	7	7.34	0.0254	79.68
0.125	80/100/0.8	1.6	6	7.35	0.0230	81.6
0.125	80/300/0.8	1.6	6	7.31	0.0245	80.4
0.125	80/500/0.8	2.0	10	7.30	0.0217	82.6
0.44 (Hidalgo)	80/0/0.8	1.8	5	7.87	0.051	88.4
0.44	80/100/0.8	1.4	2	7.87	0.034	92.27
0.44	80/300/0.8	1.0	0	7.85	0.027	93.86
0.44	80/500/0.8	0.9	0	7.85	0.025	94.31

Estos resultados corroboran que la mejor combinación coagulante/arcilla/oxidante para el caso del agua procedente de Huautla, Mor., es de 80 mgL⁻¹ de sulfato de aluminio, 100 mgL⁻¹ de arcilla verde y 0.8 mgL⁻¹ de hipoclorito de calcio, obteniéndose eficiencias de remoción hasta del 82%.

Para Zimapán, Hgo., la mejor combinación es 80 mgL⁻¹ de sulfato de aluminio, 500 mgL⁻¹ de arcilla verde natural y 0.8 mgL⁻¹ de hipoclorito de calcio, lográndose porcentajes de remoción del 94%.

Pruebas con agua natural y la mezcla en forma sólida en el dispositivo intradomiciliario

Con el fin de que este tratamiento sea aplicable a comunidades rurales, se escaló la combinación de la mejor mezcla utilizando agua natural y se realizaron pruebas de remoción de arsénico con los componentes de la mezcla (coagulante/arcilla/oxidante) en forma sólida, empleando un dispositivo de veinte litros de capacidad.

Las características de las pruebas con agua natural procedente Huautla, Mor., se resumen en la Tabla 7. Con la combinación coagulante/arcilla/oxidante determinada anteriormente, se realizaron pruebas en el dispositivo variando el gradiente de velocidad y el tiempo de floculación, ya que éstos son parámetros muy importantes que varían de acuerdo a la calidad del agua a tratar. Se emplearon dos gradientes diferentes 14 y 17 vueltas por minuto y tiempos de floculación de 20 y 25 minutos, respectivamente.

Con el fin de disminuir la concentración de aluminio residual, se realizaron otras pruebas incrementando el gradiente y el tiempo de floculación (17 vueltas por minuto y 25 minutos), encontrándose que se rebasa la norma con respecto al aluminio.

Tabla 7. Características del agua natural y tratada de Huautla, Morelos.

Mezcla: Al ₂ (SO ₄) ₃ Arcilla/Cl ₂ (mg/l)		80/100/0.5	80/0/0.5	80/100/0.53	80/0/0.5	55/100/0.5	40/100/0.52	
Gradiente		14 vueltas/min	14 vueltas/min	17 vueltas/min	17 vueltas/min	14 vueltas/min	14 vueltas/min	
Tiempo floculación		20 min	20 min	25 min	25 min	20 min	20 min	
PARÁMETRO	AGUA NATURAL	CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DESPUÉS DEL TRATAMIENTO						NOM 127SSA1
pH	7.9	7.61	7.91	7.65	7.49	7.99	7.99	6.5-8.5
Arsénico (mgL ⁻¹)	0.13	0.0352	0.0380	0.043	0.042	0.0507	0.0501	0.05
Turbiedad(NTU)	0.4	0.8	1.1	1.8	0.8	0.9	0.5	5
Color (Upt.Co.)	3	0	5	2	12	1	0	20
Fe (mgL ⁻¹)	0.001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.010	0.3
SO ₄ (mgL ⁻¹)	1	54	56	56	54	46	41	400
Cloruros (mgL ⁻¹)	18	17	15.4	14.9	16	17.4	14.5	250
SiO ₂ (mgL ⁻¹)	49	41.09	45.3	43.4	43.7	39.9	45.1	-
Alcalinidad (mgL ⁻¹)	223	255	182	198	195	259	236	-
Dureza total (mgL ⁻¹)	220	189	189	193	210	199	229	500
Flúor (mgL ⁻¹)	0.40	0.37	0.38	0.24	0.31	0.24	0.36	1.5
Manganeso (mgL ⁻¹)	0.006	0.005	0.009	0.013	0.009	0.014	0.007	0.15
Cloro libre (mgL ⁻¹)	0	0.35	0.34	0.21	0.33	0.37	0.38	0.2-1.5
Aluminio (mgL ⁻¹)	0	0.21	0.26	0.32	0.23	0.29	0.23	0.2
Conductividad (µscm ⁻¹)	470	491	479	474	479	479	474	-
SDT (mgL ⁻¹)	254	265	259	256	259	289	286	-

Para saber si el aluminio residual del agua tratada se encontraba en forma particulada o soluble, se filtraron las muestras con papel Whatman #1 y se observó que el 60% de la concentración total de aluminio se encuentra en forma particulada y el 40% en forma soluble, por lo que se recomienda filtrar el agua sobre un lienzo de manta antes de ser consumida para eliminar el aluminio en forma particulada.

Para el agua de esta localidad se recomienda emplear 80 mgL⁻¹ de sulfato de aluminio, 100 mgL⁻¹ de arcilla verde natural y 0.5 mgL⁻¹ de hipoclorito de calcio, aplicando un gradiente de velocidad de 14 vueltas/min y un tiempo de floculación de 20 min.

Pruebas con agua natural de Zimapán, Hgo.

En la Tabla 8 se presentan las características del agua natural de Zimapán. En esta tabla puede observarse que ésta presenta alto contenido de hierro y turbiedad, elementos que favorecen el proceso de coagulación-floculación.

Los resultados muestran que la concentración de arsénico residual en promedio es de 0.046 mgL⁻¹, al variar los parámetros operacionales (gradiente y tiempo de floculación), el porcentaje de remoción fue de aproximadamente 90% (Tabla 8). Todos los demás parámetros se encuentran dentro de los valores establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127 SSA1.

Si se emplea el dispositivo a nivel domiciliario para tratar agua de esta calidad, se recomienda aplicar dosis de 80 mgL⁻¹ de sulfato de aluminio, 500 mgL⁻¹ de arcilla verde natural y 0.8 mgL⁻¹ de hipoclorito de calcio, así como un gradiente de velocidad de 14 vueltas por minuto y un tiempo de floculación de 20 minutos con el fin de asegurar la obtención de la menor concentración de arsénico residual.

Tabla 8. Características del agua de Zimapán, Hgo.

Mezcla: Al ₂ (SO ₄) ₃ /Arcilla/Cl ₂ (mg/l)		80/500/0.89	80/500 /0.53	
Gradiente		14 vueltas/min	17 vueltas/min	
Tiempo floculación		20 min	25 min	
PARÁMETRO	AGUA NATURAL	Características del agua después del tratamiento		NOM-127SSA1
pH	7.87	7.31	7.94	6.5-8-5
Arsénico (mgL ⁻¹)	0.48	0.041	0.0515	0.05
Turbiedad(NTU)	14.5	1.3	1.0	5
Color (Upt.Co.)	28	8	6	20
Fe (mgL ⁻¹)	0.63	0.013	0.02	0.3
SO ₄ (mgL ⁻¹)	74	116	120	400
Cloruros (mgL ⁻¹)	15	14.6	24.8	250
SiO ₂ (mgL ⁻¹)	13.9	11.4	11.9	-
Alcalinidad(mgL ⁻¹)	255	214	238	-
Dureza total (mgL ⁻¹)	262	260	265	500
Flúor (mgL ⁻¹)	0.72	0.61	0.58	1.5
Manganeso (mgL ⁻¹)	0.05	0.043	0.044	0.15
Cloro libre (mgL ⁻¹)	0	0.52	0.09	0.2-1.5
Aluminio (mgL ⁻¹)	0	0.04	0.05	0.20
Conductividad (µscm ⁻¹)	447	526	466	-
SDT (mgL ⁻¹)	264	284	281	-

Influencia del tiempo de sedimentación sobre la remoción de arsénico

La Figura 4 presenta el comportamiento de la concentración residual de arsénico en función del tiempo de sedimentación correspondiente a las dos muestras de agua natural una vez tratada. Para el agua de Huautla, Morelos se observa que a los 30 minutos se obtiene un valor remanente de 0.057 mgAs L⁻¹ y a partir de los 60 minutos la concentración residual de arsénico disminuye a 0.047 mg As L⁻¹. Por lo que respecta al agua de Zimapán, Hgo., después del tratamiento se aprecia que a los 30 y 60 minutos la concentración de este contaminante disminuye a 0.11 mgL⁻¹. Por lo tanto, se recomienda que el agua se deje sedimentar al menos 2 horas y de preferencia toda la noche, a fin de asegurar la menor concentración de arsénico en el agua tratada.

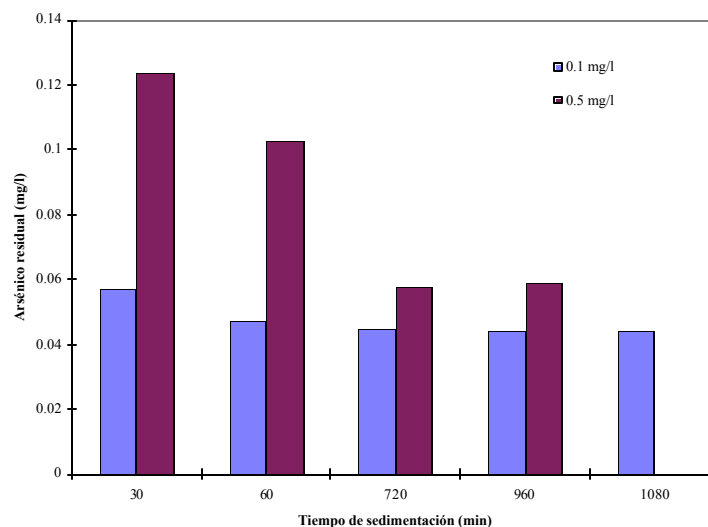


Figura 4. Comportamiento del tiempo de sedimentación.

Pruebas para determinar la cantidad de ayudante de coagulación

Los resultados presentados en la Tabla 12 y presentados graficamente en la Figura 5, corroboran que la mejor combinación coagulante/arcilla/oxidante para el agua natural de Huautla, Mor., es la de 80 mgL⁻¹ de sulfato de aluminio, 100 mgL⁻¹ de arcilla verde y 0.8 mgL⁻¹ de hipoclorito de calcio, alcanzándose eficiencias de remoción hasta del 82%.

Por lo que respecta a la calidad del agua de Zimapán, Hgo., se observa un mejoramiento en la eficiencia de remoción del contaminante al agregar una mayor cantidad de arcilla (Tabla 9, Figura 5). Por lo tanto, para Zimapán, Hgo., la mejor combinación de reactivos es 80 mgL⁻¹ de sulfato de aluminio, 500 mgL⁻¹ de arcilla verde natural y 0.8 mgL⁻¹ de hipoclorito de calcio, lográndose porcentajes de remoción del 94%.

Tabla 9. Pruebas para evaluar diferentes dosis de arcilla.

Conc.arsénico en agua natural (mg/l)	Mezcla coag/arcilla/oxid (mg/l)	Turbiedad (NTU)	Color (Upt-Co)	pH	Arsénico residual (mg/l)	% Remoción
0.125 (Morelos)	80/0/0.8	1.5	7	7.34	0.0254	79.68
0.125	80/100/0.8	1.6	6	7.35	0.0230	81.6
0.125	80/300/0.8	1.6	6	7.31	0.0245	80.4
0.125	80/500/0.8	2.0	10	7.30	0.0217	82.6
0.44 (Hidalgo)	80/0/0.8	1.8	5	7.87	0.051	88.4
0.44	80/100/0.8	1.4	2	7.87	0.034	92.27
0.44	80/300/0.8	1.0	0	7.85	0.027	93.86
0.44	80/500/0.8	0.9	0	7.85	0.025	94.31

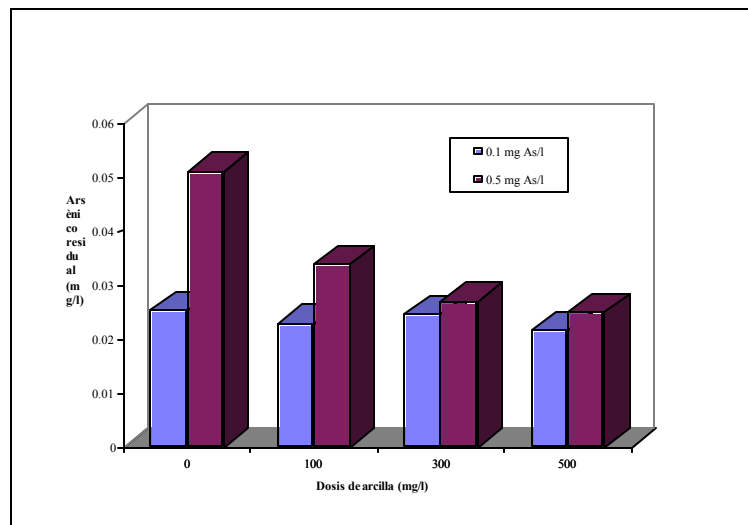


Figura 5. Influencia de la arcilla en el proceso de coagulación-floculación.

Adaptación del dispositivo y evaluación económica

El dispositivo intradomiciliario fue adaptado para ser utilizado en zonas rurales y consiste en un recipiente de plástico de 20 litros de capacidad, el cual en la parte superior tiene un soporte y una manivela giratoria; el soporte puede ser fabricado de madera, o de polietileno. En la parte exterior del recipiente se adaptó una llave de plástico a una altura de 10 cm del fondo del mismo para recuperar el agua tratada. La Figura 6 muestra las dimensiones del prototipo.

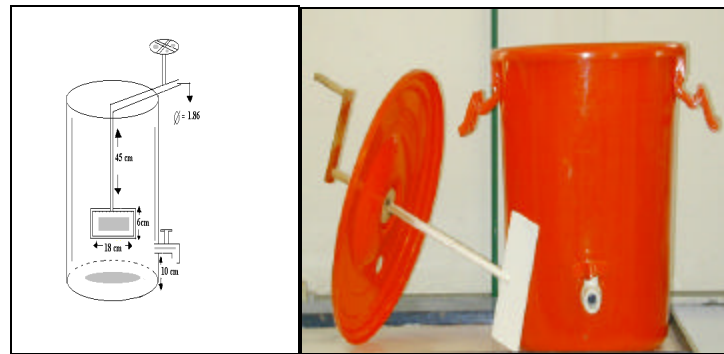


Figura 6. Esquema del prototipo

Evaluación económica

En las Tablas 10 y 11 se presentan los desgloses de materiales que se requieren para el dispositivo, así como los reactivos necesarios para el tratamiento de agua con baja y mediana concentración de arsénico. Es importante señalar que el material de empaque para los reactivos es plástico negro sencillo, se sugiere conseguir un material más resistente a fin de preservar los reactivos contra la degradación natural que pueden sufrir por cambios de temperatura y humedad.

Tabla 10. Estimación de costos para tratar agua de Huautla, Morelos.

Reactivos comerciales	Costo Por kg.	Costo de la mezcla de reactivos Coag. (80)/Arcilla(100)/oxidante(0.5) (mg/l)
Sulfato de aluminio	\$2.20	3.5×10^{-3}
Arcilla verde natural	\$10.00	2.0×10^{-2}
Hipoclorito de calcio	\$33.78	3.3×10^{-4}
Costo de reactivos		2.3×10^{-2}
Material para dispositivo:		Madera
Recipiente de plástico de 20 litros	\$40.00 (pza)	\$40.00
Agitador con manivela de madera	\$30.00 (pza)	\$30.00
Llave con rondana y conexión		
Plástico	\$8.00	\$8.00
Polietileno	\$48.00	
Material por empaque de 0.01 m ² para envasar reactivos	0.03	0.03
Costo total por dispositivo y material de empaque		\$78.05

Tabla 11. Estimación de costos para tratar agua de Zimapán, Hgo.

Reactivos comerciales	Costo Por kg.	Costo de la mezcla de reactivos Coag. (80)/Arcilla(500)/oxidante(0.8) (mg/l)
Sulfato de aluminio	\$2.20	3.5×10^{-3}
Arcilla verde natural	\$10.00	1.0×10^{-1}
Hipoclorito de calcio	\$33.78	5.4×10^{-4}
Costo de reactivos		1.0×10^{-1}
Material para dispositivo:		Madera
Recipiente de plástico de 20 litros	\$40.00 (pza)	\$40.00
Agitador con manivela de madera	\$30.00 (pza)	\$30.00
Llave con rondana y conexión		
Plástico	\$8.00	\$8.00
Polietileno	\$48.00	
Material por empaque de 0.01 m ² para envasar reactivos	0.03	0.03
Costo total por dispositivo y material de empaque		\$78.13

Es importante señalar que las mezclas de reactivos necesarios para este tratamiento presentan una diferencia mínima en costo (\$0.08); sin embargo, debe considerarse que la combinación que incluye 100 mg/l de arcilla no sería efectiva para tratar agua con concentración de arsénico de 0.50 mg/l, por lo que se recomienda el empleo de una mezcla de reactivos en función de la calidad del agua.

Conclusiones

- Las alternativas de tratamiento propuestas en condiciones controladas de laboratorio con agua sintética logran remover niveles de arsénico hasta en un 93% utilizando agua de 1 mgAsL⁻¹.
- La efectividad de la mezcla de reactivos en estado sólido, se validó en el dispositivo intradomiciliario para tratar 20 litros, empleando agua natural procedente de dos comunidades. Las muestras de agua presentaban concentraciones de, aproximadamente, de 0.1 y 0.5 mgAsL⁻¹, y después del tratamiento se obtuvieron eficiencias de remoción del 70% y 90%, respectivamente.
- La mejor combinación en forma sólida para tratar agua con baja concentración de arsénico (0.1 mgAsL⁻¹) en el dispositivo fue: 80 mg/l de sulfato de aluminio, 100 mg/l de arcilla verde natural y 0.8 mg/l de hipoclorito de calcio, empleando un gradiente de velocidad de 14 vueltas por minuto y un tiempo de floculación de 20 minutos.
- La mezcla óptima para tratar agua con mediana concentración de arsénico (0.5 mgAsL⁻¹) empleando el dispositivo fue de 80 mg/l de sulfato de aluminio, 500 mg/l de arcilla verde natural y 0.8 mg/l de hipoclorito de calcio, aplicando un gradiente de velocidad 14 vueltas por minuto y un tiempo de floculación de 20 minutos.
- El método no es extrapolable, es decir, que las eficiencias de remoción dependen primordialmente de las características fisicoquímicas del agua a tratar, por lo que es necesario realizar pruebas a nivel laboratorio antes de definir las dosis adecuadas de reactivos para cada tipo de agua. De los dos tipos de agua natural que se emplearon en estas pruebas, una de ellas presentaba una alta concentración de hierro y turbiedad, lo cual favoreció el proceso de remoción de arsénico.
- Se recomienda investigar la mejor manera de disponer los residuos de arsénico del tratamiento intradomiciliario.
- Se debe continuar con la aplicación de los resultados, al menos en las comunidades estudiadas.

Bibliografía

- ADAMS M. A. BOLGER P. M., AND GUNDERSON E. L. (1994). Dietary intake and hazards of arsenic. In: Arsenic: Exposure and Health, W. R. Capell, C. O. Abernathy, and C. R. Cothorn, eds. Northwood, U. K.: Science and Technology Letters.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. (1990). Water Treatment Plant Design 3^a ed. Mc Graw-Hill, pg. 310.
- BATES N., M. GOEDEN H., HERTZ-PICCIOTTO L., M. DUGGAN H., WOOD R., J. KOSNETT M., AND T. SMITH M. (1992). Cancer risk from arsenic in drinking water Environmental Health Perspectives, 97: 259-267.
- CHENG, R., LIANG, S., WANG, H., BEUHLER, M. (1994) Enhanced coagulation for arsenic removal. Journal AWWA, August pp 61-65.
- CORTÉS M. J., RIVERA H. M., PIÑA S. M., MARTÍN D. A., BEDOLLA V. L., (1999) Evaluación de filtros intradomiciliarios, puesta en marcha de dos plantas potabilizadoras en Zimapán, Hgo. Y evaluación de riegos a la salud asociados con la exposición a arsénico., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- PETKOVA, V., RIVERA, M. L., PIÑA, M., AVILES, M., PEREZ, S. (1998). Evaluación de diversos minerales sorbentes para la remoción de arsénico. Ingeniería y Ciencias Ambientales, Año 10, No. 34.
- PING TSENG, W. (1977). Effects and dose-response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic. 1977. Environmental Health Perspectives, 19: 109-119.