

Remoción de especies acuosas de arsénico usando hierro elemental y su especiación/detección por HPLC-ICPMS

Removal aqueous arsenic species using elemental iron and its speciation/detection by HPLC-ICPMS

María Maldonado-Santoyo^{1*}, <https://orcid.org/0000-0001-7205-0240>

¹Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, México

* Autor para la correspondencia: msantoyo@ciatec.mx

Recibido: 24 de julio de 2024

Aprobado: 1 de septiembre de 2024

RESUMEN

Se evaluó el uso de hierro elemental (nano y micropartículas) para la remoción de especies acuosas de arsénico y su especiación por HPLC-ICPMS. Las nanopartículas se obtuvieron por reacción de cloruro férrico con borohidruro de sodio, y las micropartículas fueron hierro en polvo comercial. Los experimentos se realizaron para As(III), DMAs(V) y As(V), individualmente y en mezcla a diferentes tiempos, y se analizaron por HPLC-ICPMS. Los resultados muestran, que ambas formas de hierro elemental, favorecen la disminución en la concentración inicial de As(III) y As(V) al aumentar el tiempo de contacto, obteniéndose mayores cambios en presencia de las nanopartículas (99,9 %, 240 min) con capacidad de adsorción > 499,5 µg/g. Para el DMAs(V) no hubo cambios significativos en su concentración inicial. Esto demuestra la factibilidad del hierro elemental para remover algunas especies de arsénico en disolución, y que los valores dependen de la composición química del arsénico, pudiendo ser viable para las especies inorgánicas.

Palabras claves: especiación de arsénico; nanopartículas y micropartículas de hierro; contaminación.

ABSTRACT

The use of elemental iron (nano and microparticles) for the removal of aqueous arsenic species and its speciation by HPLC-ICPMS, was evaluated. The nanoparticles were obtained by reacting of ferric chloride with sodium borohydride and, the microparticles were commercial iron powder. The experiments were carried out for As(III), DMAs(V) and As(V), individually and in mixture, at different times and were analyzed by HPLC-ICPMS. The results show, that both forms of elemental iron, contribute the decrease in the initial concentration of As(III) and As(V) by increasing the contact time, obtaining greater changes in the presence of nanoparticles (99,9 %, 240 min) with adsorption capacity (> 499,5 µg/g). For DMAs(V) there were not significant changes in its initial concentration. This demonstrates the feasibility of elemental iron to remove some aqueous arsenic species and, that the values depend on the chemical composition of arsenic, it may be viable for inorganic species.

Keywords: arsenic speciation; iron nanoparticles; iron microparticles; pollution.

INTRODUCCIÓN

El arsénico es considerado uno de los elementos más tóxicos. Se puede encontrar en el medio ambiente, tanto en forma natural y como resultado de actividades antropogénicas. La mayor preocupación se relaciona con la toxicidad de sus especies presentes en medios acuosos, cuando estas se encuentran en concentraciones elevadas y pueden estar afectando la salud de la población expuesta.^(1,2,3,4,5) La toxicidad del arsénico depende de la composición química del elemento, en un sistema dado.

De manera general, los compuestos orgánicos de arsénico en estado de oxidación +5, son menos tóxicos que sus compuestos inorgánicos: As(III) y As(V).^(1,6,7,8,9,10,11) En mamíferos, los efectos dañinos se manifiestan en los sistemas respiratorio, gastrointestinal, cardiovascular, nervioso y hepático. Derivado de ello, la Organización Mundial de la Salud (WHO)⁽²⁾ estableció 10 µg/L, como el límite máximo permisible de contenido de arsénico en agua de consumo humano.

Así mismo, debido a que los efectos tóxicos de este elemento sobre los organismos vivos dependen de la distribución de sus diferentes especies químicas acuosas, se han desarrollado diferentes metodologías analíticas para su especiación/cuantificación, tanto en muestras medio ambientales como biológicas. La gran mayoría de los procedimientos reportados se basa en la separación por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC), acoplada con alguna de las técnicas de espectrometría atómica,^(1,4) y con la finalidad de asegurar buena selectividad y sensibilidad en su cuantificación, los detectores más comúnmente utilizados, han sido la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), la espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros (HG-AAS), la espectrometría de fluorescencia atómica (HG-AFS), espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), entre otros.^(1,4,10,12,13,14,15,16)

Sin embargo, a pesar de que una gran variedad de especies de arsénico, ha sido identificada en la naturaleza, en aplicaciones enfocadas en el análisis de muestras provenientes de sistemas acuáticos, se han reportado procedimientos capaces de separar/cuantificar un número limitado de las mismas. En específico, en muestras de aguas naturales, se han encontrado las especies de arsenito, arsenato, monometilarsenito, monometilarsenato, dimetilarsenito y dimetilarseniato.⁽⁴⁾ Esto refuerza la importancia del procedimiento de especiación, pues

permite evaluar la contaminación ambiental con una mayor relevancia, para determinar los posibles riesgos a la salud y al medio ambiente, relacionados con la presencia, biodisponibilidad y composición química del arsénico en el medio.^(4,10,14)

Por otro lado, para coadyuvar a contrarrestar la contaminación con arsénico en agua de consumo y uso humano, diversos procedimientos y mecanismos para la remoción de este contaminante, han sido reportados en la literatura tales como: coagulación/precipitación, la ósmosis inversa, nanofiltración o biorremediación, en los cuales emplean materiales adsorbentes como la alúmina activada, carbón activado o hidróxido férrico, entre otros.^(3,5,17,18)

Aunado a ello, en años recientes, también se ha reportado que el hierro elemental, principalmente las nanopartículas, se han empleado satisfactoriamente en la remoción de diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos de soluciones acuosas, como son: los compuestos organoclorados, pesticidas, metales pesados y aniones inorgánicos (dicromato, arsenato, perclorato y nitratos). Sin embargo, es importante recordar que la efectividad del proceso de remoción de cualquier contaminante medioambiental, puede verse afectada por algunos factores, como son la sustancia empleada para la remoción, el tipo de agua (agua residual, de lluvia, ríos o presas) y de las concentraciones iniciales del o los contaminantes presentes en el agua, entre otros.^(3,8,11,17,19)

Sobre la base de lo anterior, el enfoque de este trabajo fue evaluar la remoción de tres especies acuosas de arsénico: As(III), As(V) y DMAs(V) en forma aislada y en mezcla, al estar en contacto con hierro elemental en forma de nanopartículas o en micropartículas, y evaluar los cambios en su concentración mediante el análisis de especiación, acoplando la separación de las especies referidas, por HPLC con ICP-MS como detector específico de elementos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Reactivos

Todos los reactivos fueron grado analítico de pureza. Agua desionizada (18,2 MΩ·cm, Arium), óxido de arsénico(III) (As₂O₃, pureza: ≥ 99 %, cas: 1327-53-3, Merck), arseniato de sodio dibásico heptahidratado (Na₂HAsO₄·7H₂O, pureza: ≥ 98,0 %, cas:10048-95-0, Sigma-Aldrich), ácido dimetil arsínico de sodio trihidratado (C₂H₆AsO₂Na·3H₂O, pureza: 98 %, cas:6131-99-3, Sigma), hidróxido de sodio (NaOH, cas: 1310-73-2, pureza: ≥ 97 %, Fluka), ácido fosfórico (H₃PO₄, cas:7664-38-2, pureza: 85 %, Fluka), fosfato

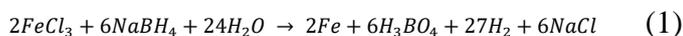
monobásico de sodio monohidratado ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; cas: 10049-21-5; pureza: $\geq 98,0\%$; Sigma-Aldrich), sal disódica EDTA dihidratada ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, pureza: $\leq 100\%$, cas: 6381-92-6 Sigma), borohidruro de sodio (NaBH_4 , pureza: 97 %, cas: 16940-66-2, Sigma), cloruro férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, pureza: 98 %, cas: 10025-77-1, Sigma-Aldrich), etanol (CH_3OH , cas: 6417-5, Fishes Scientific) e hierro en polvo (Fe, cas: 7439-89-6, pureza: 99 %, *american elements*).

Instrumentación

Se utilizó un cromatógrafo de líquidos de alta resolución Hewlett-Packard (Waldrom, Germany) modelo 1050, con la columna para especiación de especies de arsénico en agua por intercambio aniónico (serie: BA02004, Agilent 63154-65001). Para obtener los perfiles de elución del arsénico en la separación cromatográfica, se utilizó el espectrómetro de masas con ionización en plasma acoplado inductivamente, modelo Agilent 7500ce, equipado con el nebulizador convencional tipo Meinhard, la cámara de niebla con enfriamiento (tipo Peltier, $-2\text{ }^\circ\text{C}$) y la celda de colisión/reacción con helio (pureza 99,999 %).

Síntesis de nanopartículas

Las nanopartículas de hierro fueron obtenidas de acuerdo con lo reportado por Zhang ⁽¹⁹⁾ con modificaciones. En breve, a 500 mL de una solución de cloruro férrico 0,05 mol/L con agitación a 500 rpm, se le agregó gota a gota, con ayuda de una bureta, una solución de borohidruro de sodio (0,2 mol/L), hasta lograr una relación de volúmenes aproximada de 1:1. El borohidruro se agregó en exceso (1:4 mol/mol) para acelerar la reacción de síntesis, y asegurar un crecimiento uniforme de las partículas de hierro, de acuerdo con la reacción siguiente (1):



Una vez efectuada la reacción, se dejaron sedimentar para la separación de fases y se retiró el sobrenadante. El precipitado se lavó dos veces con etanol y se secó en atmósfera inerte de nitrógeno. Después se caracterizaron por microscopía electrónica de barrido (SEM), utilizando un microscopio electrónico JSM-5900LV. El hierro comercial en polvo, se tamizó en malla no.100, para obtener las micropartículas ($< 150\text{ }\mu\text{m}$), y fue utilizado sin tratamiento previo.

Especiación analítica de arsénico en medio acuoso

La solución estándar para cada especie de arsénico se preparó a una concentración de 1 000 mgAs/L. El óxido de arsénico (III) se disolvió en hidróxido de sodio 30 mmol/L; mientras que el arseniato de sodio dibásico y el ácido dimetilarsénico de sodio se disolvieron en agua desionizada, cada uno. El pH fue ajustado a 7,0 con ácido fosfórico 3 mmol/L. Después, se establecieron las condiciones instrumentales para la especiación del arsénico mediante el sistema HPLC-ICPMS, las cuales se presentan en la [tabla 1](#). La cuantificación de las especies acuosas de arsénico se realizó mediante calibración externa con base a una serie de soluciones estándar, conteniendo las tres especies de arsénico As(III), As(V) y DMAs(V) en concentraciones de 0,1; 5; 10; 25; 50 y 100 $\mu\text{g/L}$.

Tabla 1- Condiciones instrumentales del sistema HPLC-ICPMS para la especiación de arsénico

<i>Separación Cromatográfica</i>	
Columna	Intercambio aniónico, Agilent G3154-65001, Serial: BA02004
Fase móvil	0.2 mmol/L EDTA, 2.0 mmol/L Na_2HPO_4 , pH 6.0
Flujo	1.0 mL/min
Volumen inyectado	20 μL
Temperatura	25 $^\circ\text{C}$
Muestras estándar	As(III), DMAs(V), As(V) y mezcla a 100 $\mu\text{g/L}$ cada uno
<i>Detección de ICP-MS</i>	
Potencia	1500W
Flujo de nebulizador	gas 0.65 mL/min
Introducción de muestra	MiraMist Teflón® nebulizer
Isótopos monitoreados	^{75}As
Modo de adquisición	de Time-resolved analysis
Tiempo de integración	de 100 ms
Flujo de colisión	gas 2.0 mL de He/min

Proceso de remoción

El proceso de remoción en medio acuoso, para cada especie de arsénico aislada o mezclada, fue realizado en condiciones controladas de temperatura y agitación, utilizando frascos de vidrio previamente lavados con una solución de ácido nítrico al 5 % y agua desionizada,

para eliminar cualquier contaminación. Las pruebas fueron realizadas para el hierro elemental (Fe^0) en forma de nanopartículas (nFe^0) y micropartículas (mFe^0). Para ello, un volumen de 100 mL de solución acuosa a una concentración de 100 $\mu\text{gAs/L}$ para especies aisladas y de 300 $\mu\text{gAs}_{\text{tot}}/\text{L}$ en mezcla, fue colocado en cada frasco. A cada uno se le agregó 20 mg de nFe^0 o mFe^0 , según correspondía. A la par, se corrió un blanco para cada presentación estudiada del hierro elemental. Los frascos se dejaron en agitación (200 rpm) a 25 °C durante 22 h, y a cada determinado tiempo (0; 5; 15; 20; 30; 120; 240 y 1 320 min) se tomaron alícuotas de 300 μL , a las cuales se les agregó 50 μL de EDTA 0,05 mmol/L para inhibir la oxidación por iones de hierro. Después, fueron centrifugadas (10 min, 13 000 rpm), y el sobrenadante fue introducido al sistema HPLC-ICP-MS para el análisis de especiación. Todos los experimentos fueron realizados por triplicado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos por SEM ([figura 1](#)) confirmaron lo reportado por Zhang ⁽¹⁹⁾ y Vilas ⁽²⁰⁾, obteniendo un tamaño de partícula predominante < 100 nm, en las nanopartículas sintetizadas en este trabajo.

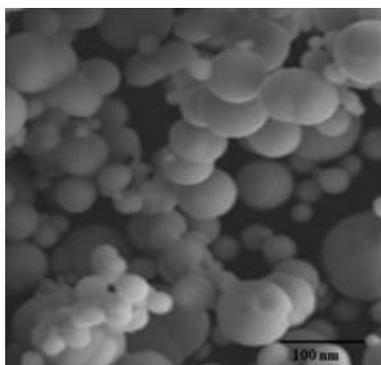


Fig. 1- Imagen SEM de las nanopartículas sintetizadas

Una vez obtenidas las nanopartículas, se establecieron las condiciones de separación/cuantificación de las especies acuosas de arsénico, mediante el sistema HPLC-ICP-MS. La identificación de los picos para cada especie acuosa de arsénico, fue realizada mediante la inyección de cada estándar en forma individual.

En la [figura 2](#) se presenta un cromatograma con los estándares en mezcla para las especies acuosas de arsénico As(III) , DMAs(V) y As(V) a una concentración de 100 $\mu\text{gAs/L}$ cada una. En este cromatograma se puede observar la separación de las tres especies hasta la línea base de la abundancia del

isotopo ^{75}As , en el eje de las ordenadas, con tiempos de elución de 2,0; 3,0 y 9,95 min para el As(III) , DMAs(V) y As(V) , respectivamente. También se observa cierto ensanchamiento del pico cromatográfico de As(V) , pero tomando en cuenta el área de los picos, se obtuvo una respuesta prácticamente idéntica para las tres especies acuosas de arsénico evaluadas.⁽⁴⁾

La cuantificación se realizó mediante calibración externa tomándose como señal analítica el área del pico cromatográfico para el isotopo ^{75}As , cuyo límite de detección/cuantificación se consideró el primer nivel de la curva de calibración (0,1 $\mu\text{g/L}$), y logrando valores de $R^2 > 0,9998$. Las ecuaciones obtenidas en la calibración fueron (2) (3) y (4):

$$y = 13\,464x + 3\,116,7 \text{ para } \text{As(III)} \quad (2)$$

$$y = 12\,105x - 6\,088,5 \text{ para } \text{As(V)} \quad (3)$$

$$y = 7\,277x + 7\,511,5 \text{ para } \text{DMAs(V)} \quad (4)$$

Estos valores fueron ligeramente mayores a los obtenidos por Jeong *et al.*,⁽²¹⁾ quienes reportan límites de cuantificación de 0,19; 0,65 y 0,12 $\mu\text{g/L}$ para As(III) , As(V) y DMAs(V) , respectivamente, en medio acuoso, mediante HPLC-ICPMS.

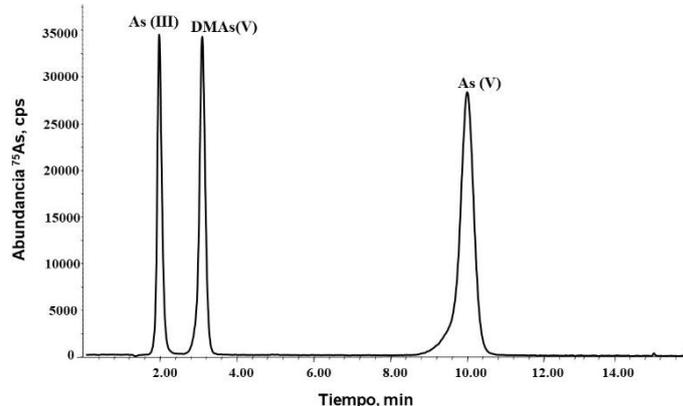


Fig. 2- Cromatograma de la mezcla de estándares [As(III) + DMAs(V) + As(V)]; a una concentración de 100 $\mu\text{gAs/L}$ para cada especie, obtenido por HPLC-ICPMS

Una vez establecidas las condiciones analíticas del sistema HPLC-ICPMS para la especiación del arsénico en medio acuoso, se evaluaron los cambios en la concentración para cada especie acuosa del arsénico: As(III) , As(V) y DMAs(V) , de forma aislada y en mezcla, al estar en contacto con el hierro elemental (nFe^0 o mFe^0), midiendo la concentración en determinados intervalos de tiempo. Esto con la finalidad de evaluar los posibles cambios en la concentración y/o en la especiación del arsénico.

Los resultados obtenidos ([Tabla 2](#)) en el análisis de las especies acuosas de arsénico de forma aislada, después

de tiempo de contacto con nFe^0 o mFe^0 , muestran un comportamiento de remoción muy similar. Sin embargo, con las nFe^0 se puede observar que la concentración inicial de las especies inorgánicas, As(III) y As(V), decreció por arriba de un 95 % después de 120 min de contacto, y a las 22 h prácticamente habían desaparecido.

Para el DMAs(V) también ocurrió la disminución de su concentración inicial, sin embargo, fue menos notoria, y el porcentaje de remoción alcanzado a las 22 h fue de sólo 44,9 %. Por otra parte, con las mFe^0 , se observó un comportamiento menos favorable, necesitando mayor tiempo de contacto; observándose una remoción mayor al 90 % para As(III) y As(V) hasta las 22 h de contacto.

Finalmente, para el DMAs(V) + mFe^0 , a diferencia de las otras dos especies, no se apreció cambio significativo, transcurridas las 22 h (1 320 min) de contacto, y alcanzando una remoción de sólo 6,9 %; lo que sugiere un proceso de remoción más lento para esta especie. En el caso de la especie As(III), con nFe^0 (con tiempo de contacto de 5 min) y con mFe^0 (con tiempos de contacto entre 0 y 120 min), se observó la conversión del As(III) a As(V), seguida por una disminución paulatina de la concentración de ambas especies. Estos resultados indican la utilidad del hierro elemental, ya sea en forma de nanopartículas o micropartículas, para eliminación de las formas

mayoritarias del arsénico en soluciones acuosas. Sin embargo, el comportamiento y eficacia del proceso, aparentemente depende de la especie actual en la que se encuentre el arsénico.

De forma similar, se llevaron a cabo experimentos en mezcla (300 $\mu gAs_{tot}/L$), conteniendo las tres especies acuosas de arsénico, a una concentración inicial de 100 $\mu gAs/L$ cada una de ellas, en contacto con nFe^0 o mFe^0 (figura 3). Se observa claramente, que las dos formas de hierro elemental, provocan una disminución en la concentración inicial de As(III) y de As(V), conforme aumenta el tiempo de contacto, obteniéndose mayores cambios en presencia de nFe^0 respecto a mFe^0 . En el caso de DMAs(V), no hubo cambios significativos, sólo se alcanzó un decremento del 26 y 7 % con nFe^0 y mFe^0 , respectivamente, a las 22 h de contacto.

También se observó, en las primeras dos horas de contacto con mFe^0 , un decremento del As(III) y un ligero incremento de As(V). A mayores tiempos de contacto, ocurrió la disminución paulatina de ambas especies. Este comportamiento fue similar al observado en el análisis de la solución para la especie As(III). De acuerdo con algunos autores, esto podría deberse a un mecanismo de remoción basado en la oxidación de As(III) a As(V) y su posterior precipitación en forma de arseniato férrico ($FeAsO_4$).^(12,19,22)

Tabla 2- Cambios en la concentración de las especies acuosas de arsénico en forma aislada ($\mu g/L$), al estar en contacto con nFe^0 o mFe^0

Tiempo de contacto, min	As(III) + nFe^0		As(V) + nFe^0	DMAs(V) + nFe^0
	As(III)	As(V)		
0	100.0±2.1	-	100.0±3.1	100.0±2.7
5	52.7±2.2	20.0±1.4	98.7±4.2	96.5±3.4
15	8.02±0.5	18.0±0.9	49.1±2.6	85.2±3.0
20	6.31±0.4	12.5±0.7	33.3±1.9	81.8±2.9
30	2.00±0.1	6.01±0.3	8.02±0.7	76.0±3.4
120	< 0.1	2.03±0.1	3.10±0.2	67.1±3.2
240	< 0.1	< 0.1	< 0.1	61.2±3.2
1320	< 0.1	< 0.1	< 0.1	55.1±1.3
Tiempo de contacto, min	As(III) + mFe^0		As(V) + mFe^0	DMAs(V) + mFe^0
	As(III)	As(V)		
0	100.0±1.9	-	100.0±3.2	100.0±2.9
5	66.4±2.2	22.1±1.4	99.1±3.1	100.0±3.1
15	30.9±1.7	36.7±2.1	96.4±2.8	100.0±4.1
20	16.1±0.5	40.9±1.9	95.3±2.6	100.0±2.4
30	14.6±0.9	41.6±2.1	93.9±2.4	99.9±3.3
120	2.01±0.1	48.0±2.3	81.1±3.7	99.2±2.1
240	< 0.1	43.1±1.8	69.2±3.1	97.1±2.1
1320	< 0.1	7.10±0.3	9.01±0.2	93.1±2.2

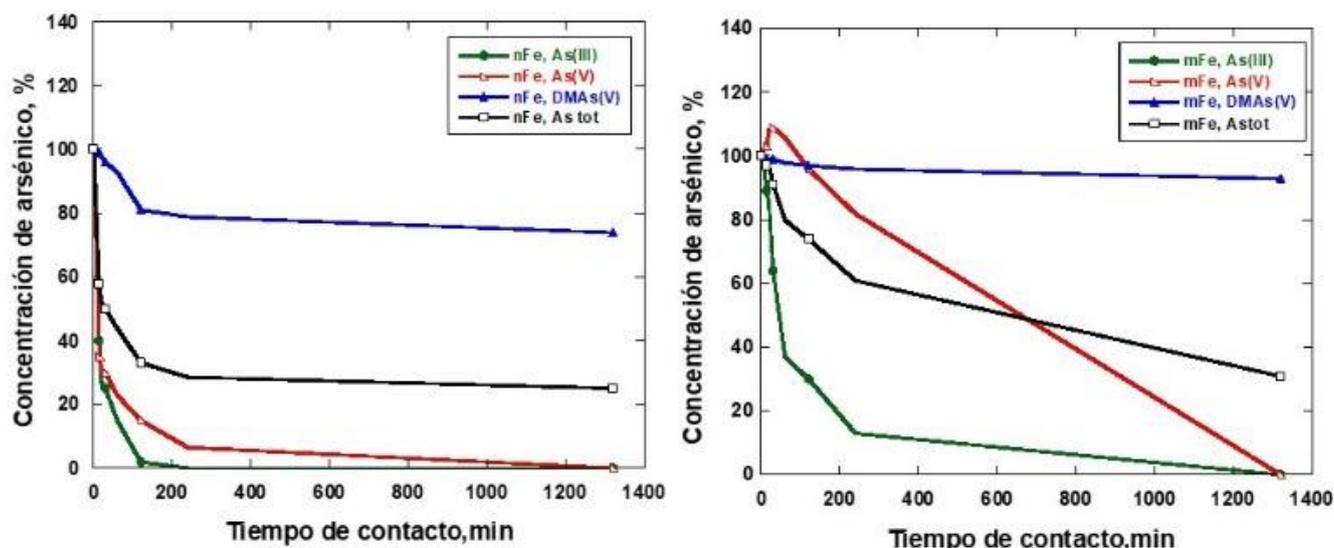


Fig. 3- Cambios relativos en la concentración de arsénico para cada especie y en mezcla (As_{tot}), en contacto con nFe⁰ o mFe⁰ en las soluciones en mezcla

En la [tabla 3](#) se presentan valores representativos de cambio en la concentración de las especies de arsénico en la solución en mezcla. Los valores de remoción alcanzados a las 22 h (1 320 min) de contacto para las especies inorgánicas, fueron mayores al 99 %, con una capacidad de adsorción de 499,9 µg/g para cada una, para ambas formas de hierro elemental. Aunque es importante destacar que para el As(III) con nFe⁰, a los 240 min, prácticamente ya había desaparecido, mientras que, con mFe⁰ aún presentaba 13 µg/L. Los valores de adsorción alcanzados para estas especies, son ligeramente mayores con respecto a los obtenidos en la solución aislada de cada especie con valores de 498,5 y 498,5 µg/g con nFe⁰, y 464,5 y 455 µg/g con mFe⁰ para el As(III) y As(V), respectivamente. Resultados similares han sido obtenidos por otros autores, con valores de remoción de arsénico total,

As(III) y/o As(V), que oscilan entre el 82-99,8%, tiempos de contacto variables que van desde los 5 min a 24 h, empleando tamaños de partículas de entre 7 y 250 nm con diferentes condiciones de operación, utilizando hierro elemental⁽²³⁾, o bien materiales adsorbentes a base de Mg⁺²/Fe⁺³ con capacidad de adsorción entre 508,1 y 550,2 µg/g.⁽³⁾ Con respecto al DMAs(V), solo se logró un valor de remoción del 26,0 y 6,9 %, y en consecuencia, afectó el valor obtenido para el As_{tot} (75,3 y 68,9 %) con nFe⁰ y mFe⁰, respectivamente. La capacidad de adsorción más baja fue observada con mFe⁰, al estar en contacto con el DMAs(V) con un valor de solo 34,5 µg/g, tanto en la solución en mezcla como en la solución individual.

Tabla 3- Valores representativos de remoción de las especies acuosas de arsénico en mezcla a las 22 h de contacto

Especies de arsénico	Concentración inicial, C ₀ µg/L	Concentración final, C _f µg/L		*Capacidad de adsorción, q µg/gn		% de remoción, (1-(C _f /C ₀))*100	
		nFe ⁰	mFe ⁰	nFe ⁰	mFe ⁰	nFe ⁰	mFe ⁰
As(III)	100	0.1	0.1	499.9	499.9	99.9	99.9
As(V)	100	0.1	0.1	499.9	499.9	99.9	99.9
DMAs(V)	100	74.0	93.1	130.0	34.5	26.0	6.9
As _{tot}	300	74.2	93.3	1129.7	1044.5	75.3	68.9

*La capacidad de adsorción fue calculada con la siguiente fórmula: $q = V(C_0 - C_f)/m$, donde: V es el volumen (L), C₀ y C_f: concentración inicial y final de arsénico (µg/L); m es la masa de hierro (g)⁽³⁾

CONCLUSIONES

Se evaluó el proceso de remoción de algunas especies acuosas de arsénico, en forma aislada y mezclada, utilizando hierro elemental en presentación de nanopartículas (< 100 nm) o micropartículas (< 150 µm). Para ello, se adaptó un procedimiento analítico de especiación para As(III), As(V) y DMAs(V) por HPLC-ICP-MS, logrando límites de detección/cuantificación de 0,1 µg/L para cada especie. Los resultados indican que las dos formas de hierro provocan una disminución en la concentración inicial de las tres especies de arsénico, conforme aumenta el tiempo de contacto; sin embargo, se observaron mayores cambios en presencia de nFe⁰. Las soluciones de una sola especie demuestran, que el proceso de remoción depende de la composición química del elemento. La disminución de los niveles de As(III) y As(V) fue relativamente más rápida que para el DMAs(V). La capacidad de adsorción fue mayor en As(III) y As(V) que en el DMAs(V). Debido a la mayor toxicidad de las especies inorgánicas de arsénico respecto a sus especies orgánicas, los resultados logrados sugieren que el uso de nFe⁰ podría ser una interesante alternativa para la remoción de arsénico inorgánico en agua.

AGRADECIMIENTOS

A Katarzyna Wróbel, Kazimierz Wróbel y Francisco Javier Acevedo, de la Universidad de Guanajuato, por el apoyo brindado para la realización y revisión de este manuscrito; a los revisores anónimos de la Revista Cubana de Química por sus valiosos comentarios para mejorar el presente documento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BHAT, A.; O'HARA, T.; TIAN, F.; SINGH, B. "Review of analytical techniques for arsenic detection and determination in drinking water". *Environmental Science: Advances*, 2023, **2**: 171-195. Doi: <http://doi.org/10.1039/d2va00218c>
2. WHO. (2018). *Arsénico*. Consultado el 01/11/2022. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>.
3. CESEÑA QUIÑONEZ, J. I.; RAMOS RAMÍREZ, E.; SERAFÍN MUÑOZ, A. H.; MORENO PALMERIN, J.; ZANOR, G. A.; GUTIÉRREZ ORTEGA, N. L. "Remoción de arsénico del agua para consumo humano empleando un hidróxido doble

- laminar Mg/Fe". *Acta Universitaria*, 2019, **29**, 1-12. Doi: <http://dx.doi.org/10.15174/au.2019.2499>
4. REID, M. S. *et al.* "Arsenic speciation analysis: A review with an emphasis on chromatographic separations". *Trends in Analytical Chemistry*, 2020, **123**, 115770, 1-14. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115770>
5. NICOMEL, N. R.; LEUS, K.; FOLENS, K.; VAN DER VOORT, P.; DU LAING, G. "Technologies for arsenic removal from water: current status and future perspectives". *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2016, **13**(1), 62. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph13010062>
6. BALARAM, V.; COPIA, L.; SARAVANA KUMAR, U.; MILLER, J.; CHIDAMBARAM, S. "Pollution of water resources and application of ICP-MS techniques for monitoring and management-A comprehensive review". *Geosystems and Geoenvironment*, 2023, **2**(4), 100210. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100210>
7. EL GUIATY, M. A.; EL KADI, A. O. S. "The duality of arsenic metabolism: impact on human health". *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 2023, **63**, 341-358. Doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-051921-020936>
8. HABUDA STANIC, M.; NUJIC, M. "Arsenic removal by nanoparticles: a review". *Environ Sci Pollut Res*, 2015, **22**, 8094-8123. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4307-z>
9. KATSOYIANNIS, I. A.; ZOUBOULIS, A. I.; MARTIN, J. "Kinetics of Bacterial As(III) Oxidation and Subsequent As(V) Removal by Sorption onto Biogenic Manganese Oxides during Groundwater Treatment". *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, **43**(2), 486-493. Doi: <https://doi.org/10.1021/ie030525a>
10. BEDNAR, A. J.; GARBARINO, J. R.; BURKHARDT, M. R.; RANVILLE J. F.; WILDEMAN, T. R. "Field and laboratory arsenic speciation methods and their application to natural-water analysis". *Water Research*, 2004, **38**(2):355-364. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.09.034>
11. VILTRES, H.; ODIO, O. F.; BORJA, R.; AGUILERA, Y.; REGUERA, E. "Magentite nanoparticle for arsenic remotion" *Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, **792**, 012078. Doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/792/1/012078>
12. LIU, P.; LIANG, Q.; LUO, H.; FANG, W.; GENG, J. "Synthesis of nano-scale zero-valent iron-reduced graphene oxide-silica nano-composites for the efficient

removal of arsenic from aqueous solutions". *Environ Sci Pollut Res Int*, 2019, **26**(32), 33507-33516. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06320-6>

13. TERLECKA, E. "Arsenic speciation analysis in water samples: a review of the hyphenated techniques". *Environ Monit Assess*, 2005, **107**, 259-84. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-005-3109-z>

14. CASTILLEJOS, A.; GATTI, L.M.; KERL, C. F., CHENNU, A.; KLATT, J. M. "Arsenic speciation analysis in porewater by a novel colorimetric assay", *Science of The Total Environment*, 2022, **827**, 154155. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154155>

15. KELLER, N. S.; STEFÁNSSON, A.; SIGFÚSSON, B. "Determination of arsenic speciation in sulfidic waters by Ion Chromatography Hydride-Generation Atomic Fluorescence Spectrometry (IC-HG-AFS)". *Talanta*, 2014, **128**, 466-472. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.04.035>

16. JEONG, S.; LEE, H.; KIM, Y.; YOON, H. "Development of a simultaneous analytical method to determine arsenic speciation using HPLC-ICP-MS: Arsenate, arsenite, monomethylarsonic acid, dimethylarsinic acid, dimethyldithioarsinic acid, and dimethylmonothioarsinic acid". *Microchemical Journal*, 2017, **134**, 295-300, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.06.011>

17. MONGA, Y. *et al.* "Sustainable synthesis of nanoscale zerovalent iron particles for environmental remediation". *Chem Sus Chem*, 2020, **13**(13), 3288-3305. Doi: <https://doi.org/10.1002/cssc.202000290>

18. MONDAL, P.; MAJUMDER, C. B.; MOHANTY, B. "Laboratory based approaches for arsenic remediation from contaminated water: Recent

developments". *Journal of Hazardous Materials B*, 2006, **137**(1), 464-479. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.023>

19. ZHANG, W. "Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview". *Journal of Nanoparticle Research*, 2003, **5**, 323-332. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1025520116015>

20. VILAS, J. L. "Nanotecnología como herramienta para la recuperación de suelos". Consultado el 31 oct 2022. Disponible. <https://docplayer.es/30742148-Jose-luis-vilas-vilela-departamento-de-quimica-fisica-laboratorio-de-quimica-macromolecular-upv-ehu.html>

21. SIMEONOVA V.; RIVERA, M.; PIÑA, M.; AVÍLES, M.; CASTREJÓN, S. "Evaluación de diversos minerales para la remoción de arsénico de agua para consumo humano". 1997. Consultado el 07/11/2022. Disponible en:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluaci%C3%B3n-de-diversos-minerales-para-la-remoci%C3%B3n-Simeonova-Huerta/c1a37c7677c9252a5c3f3661819d6d75e8717c72>

22. BARRIENTOS, J. E.; MATUTES A. J. "Uso de nanomateriales para la remoción de arsénico del agua para consumo humano". *Mundo Nano*, 2013, **6**(11). Doi:

<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2013.11>

23. BANG S.; KORFIATIS, G. P.; MENG, X. "Removal of arsenic from water by zero-valent iron". *J Hazard Mater*, 2005, **121**(1-3), 61-67. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.01.030>

DECLARACIÓN CONFLICTO DE INTERESES

La autora declara que no existen conflictos de interés en el manuscrito presentado.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

La autora realizó la experimentación, el análisis y discusión de los resultados. Redactó el manuscrito y respondió a las observaciones realizadas durante el arbitraje.