

REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA MEDIANTE IRRADIACIÓN SOLAR

Clido J.⁽¹⁾; Nieto J.⁽¹⁾; Ponce S.⁽¹⁾; Rodríguez J.^{(1), (2)} jrodriguez@ipen.gob.pe; Solís J.^{(1), (2)},
Estrada W.^{(1), (2)} westrada@ipen.gob.pe

(1) *Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería / Lima, Perú.*

(2) *Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima, Perú.*

RESUMEN

El Perú es un país con extensas zonas rurales donde los pobladores carecen de agua potable y utilizan para el consumo agua sin ningún control. La presencia de arsénico en aguas es tóxica y acumulativa trayendo consigo consecuencias severas para el ser humano particularmente grave en estas zonas donde el abastecimiento de agua es provisto por fuentes puntuales cuyo análisis sistemático está fuera del alcance de los organismos controladores.

En el presente trabajo, se implementó la técnica de remoción de arsénico por irradiación solar y luz ultravioleta (UV) de una lámpara. Para concentraciones de arsénico de hasta 500 ppb y una concertación Fe^{2+} /citrato de 1.8, este es removido hasta en un 95 % después de 4 horas de irradiación solar o UV de 7.5 mW/cm². Los resultados obtenidos muestran que el método aquí propuesto es factible de aplicarlo en zonas rurales debido a su simplicidad operativa y económica.

1. INTRODUCCION

El deterioro de la calidad del agua es uno de los problemas más graves del Perú, el cual es un impedimento para lograr el uso eficiente del recurso, comprometiendo el abastecimiento en calidad y cantidad. Las causas principales que los originan son la contaminación industrial, la falta de tratamiento de las aguas servidas y el uso indiscriminado de agroquímicos.

Siendo la contaminación industrial más significativa la que proviene de la minería, pesquería y sector hidrocarburos que altera y afecta el medio ambiente, en especial las aguas.

En el Perú la contaminación minera representa un rubro importante a través de los vertimientos de desechos o relaves

mineros, portadores de contaminantes tóxicos (Pb, Cd, Hg, Cu, As y otros), debido a sus características geológicas ya que es un país minero por excelencia y esta industria se caracteriza generalmente por desarrollarse en zonas rurales y desoladas. Alterando el medio ambiente de las comunidades locales en forma negativa y produciendo riesgos a la salud [1]. La Dirección General de Aguas y Suelos del Ministerio de Agricultura reportó en 1992 que las aguas de los ríos Moche, Cañete, Pisco, Acari, Yauca, Caravelí, Oconá, Camaná-Majes, Vitor-Chilli, Tambo, Locumba, Sama y Caplina sobrepasan en exceso los niveles permisibles de Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, As y Cianuro. De estos contaminantes con alto potencial tóxico, el Arsénico es de gran relevancia desde el punto de vista de salubridad y ambiental.

1.1 Impacto del Arsénico sobre la salud

En varios países de América Latina tales como: Argentina, Chile, México, El Salvador y Perú presentan altas concentraciones de arsénico y por lo menos 4 millones de personas beben en forma permanente agua con niveles de arsénico que ponen en riesgo su salud [2].

La toxicidad crónica provocada por la acumulación del As en el organismo (huesos, músculos y piel; y en menor grado en hígado y riñones) y a ciertas concentraciones pueden ocasionar afecciones como alteraciones en la piel con efectos secundarios en el sistema nervioso, irritación de los órganos del aparato respiratorio, gastrointestinal, hematopoyético y en último término la muerte. En las personas que sobreviven se ha observado una anomalía en la médula ósea, hemólisis, hepatomegalia, melanososis, polineuropatía y encefalopatía [3].

Existe evidencia epidemiológica que personas con ingestión prolongada de arsénico en agua provoca la

hiperqueratosis palmo-plantar cuya manifestación principal es la pigmentación de la piel y callosidades en las palmas de las manos y pies, que luego se deriva a la melanodermia y por último cáncer de piel [4,5]. Además, la presencia del arsénico en el agua, su grado de contaminación y la incidencia de enfermedades por la piel, especialmente del HACRE (Hidro Arsenicismo Crónico Regional Endémico) provocó un gran impacto a la salud en Argentina y México que se describen en diferentes estudios.

Asimismo, la agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América (USEPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifican al arsénico como carcinogénico en el grupo A, debido a la evidencia de sus efectos adversos sobre la salud. Por lo que se establece como Límite Máximo Permisible (LMP) de As una concentración de 0.050 mg/L para consumo humano, pero según estudios la exposición a esta concentración de As puede causar 31,33 casos de cáncer a la piel por cada 1000 habitantes, por lo que la OMS ha considerado bajar el LMP a 0.010 mg/L. En el Perú, la Ley General de Aguas establece una concentración de 0.100 mg/L, por lo que hay una gran preocupación y alarma de riesgo a la salud. Asimismo, la eliminación natural del organismo humano del arsénico es por vía urinaria, heces, sudor y descamación epidérmica (epitelio de la piel) [2].

1.2 Técnicas de remoción de arsénico. Limitaciones, ventajas y desventajas

En general, el tratamiento del agua potable está orientado a remover la turbiedad y los microorganismos patógenos de origen fecal. Esta remoción se logra a través de una combinación adecuada de procesos: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Pero cuando se desea remover elementos químicos del agua, como el arsénico, las tecnologías utilizadas son más complejas tales como la coagulación, adsorción sobre alúmina activada, intercambio iónico, electrodiálisis y ósmosis inversa [6]. La Tabla 1 muestra un resumen bibliográfico de varias técnicas utilizadas para la remoción de arsénico del agua potable y de las aguas residuales industriales.

La remoción de arsénico depende de sus formas presentes en el agua y del grado de

oxidación del mismo. La Tabla 2 presenta un resumen de varios resultados informados en la literatura, sobre la remoción de arsenatos, As(V) que puede ser removido en forma efectiva por coagulación con sales de Aluminio (III) o Hierro (III) y por los procesos de ablandamiento con cal y soda. Los coagulantes se hidrolizan formando hidróxidos, sobre los cuales el As (V) se adsorbe y coprecipita con los otros iones metálicos [2]. El proceso de coagulación, al igual que la precipitación con cal son dependientes del pH del agua tratada, del tipo y dosis de coagulante así como de la concentración inicial de este elemento, siendo factible solo para las aguas superficiales. Por otra parte, la dosis de coagulante requerida para reducir arsénico a niveles aceptables es muy alta, lo que originan grandes cantidades de lodos que a su vez deben ser tratados adecuadamente [2].

Los procesos de intercambio iónico, ósmosis inversa y electrodiálisis utilizan resinas aniónicas o membranas específicas poco accesibles por su escasez y alto costo. Además, los dos últimos procesos se caracterizan por un elevado consumo energético, así como el mantenimiento y operación de este tipo de plantas deben estar a cargo de un personal calificado, lo que repercute en el costo del agua tratada [6].

Los procesos para la remoción de arsénico descritos anteriormente resultan muy costosos, además no siempre aseguran la remoción de arsénico a una concentración menor de 0.050 mg/L como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de las técnicas aplicadas en la remoción de arsénico.

Técnica	Forma de As	Conc. de As (mg/l)		Fuente
		Inicial	Final	
Coagulación con sales de hierro	As oxid.	56	0.01	Brewestwer, 1992
	arsenato	0.35	0.006	Logsdon, 1974
	arsenito	0.35	0.140	Logsdon, 1974
	arsenato	0.56	0.01	Shen, 1973
	arsenato	0.30	0.006	Sorg, 1978
	arsenito	0.30	0.138	Sorg, 1978
Coagulación con sales de alúmina	arsenato	0.35	0.074	Logsdon, 1974
	arsenito	0.35	0.263	Logsdon, 1974
	arsenato	0.30	0.030	Sorg, 1978
	arsenito	0.30	0.249	Sorg, 1978
Precipitación con cal	arsenato	500	4	Nishimura, 1985
	arsenito	500	2	Nishimura, 1985
	arsenato	2	0.02	Nishimura, 1985
	arsenito	2	0.160	Nishimura, 1985
Adsorción en alúmina activada	arsenato	0.10	0.004	Frank, 1986
	arsenito	0.10	inefectivo	Frank, 1986
Intercambio iónico	arsenato	0.057	n.d. pH=6	Clifford, 1991
	arsenito	0.031	inefectivo	Clifford, 1991
Ósmosis Inversa	arsenato	100	<0.80	Vance
	arsenato	68	de 0 a 12.2	Calmon, 1973
Electrodiálisis	arsenito	0.037	0.007	Clifford, 1991
	arsenato	0.051	0.0015	Clifford, 1991
	arsenito	0.188	0.136	Clifford, 1991

n.d.: no detectada, Fuente: Petkova V., 1999.

El objetivo principal de este estudio es proporcionar un método de tratamiento a muy bajo costo y de fácil manejo para remover el arsénico presente en las aguas naturales de zonas rurales haciendo esta agua de pozo apta para consumo humano. Este método [7] se basa en la formación del complejo citrato de Fe (III) que permite la oxidación del As (III) a As (V) a través de especies activas formadas por irradiación con luz solar en presencia de oxígeno. El As (V) se adsorbe fuertemente sobre el precipitado de hidróxido de hierro que se forma en esas condiciones, y flocula. Se agrega al agua algunas gotas de jugo de limón y una solución de Fe(II) de la sal de Mohr. Este tratamiento se realiza en botellas de plástico y se expone al sol por algunas horas. Las botellas se colocan luego en posición vertical durante la noche, para que decante las partículas de hidróxido de hierro con As (V) y luego se filtra a través de paños textiles o algodón.

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

Coagulante	As (V)		As (III)	
	Remoción (%)	pH	Remoción (%)	pH
Fe ₂ (SO ₄) ₃	100	<9.0	20	<9.0
Fe ₂ (SO ₄) ₃	90	<7.0	50	<7.0

Como puede deducirse este método no requiere equipos caros, ni elevados costos de energía. Solo necesita la acción permanente del sol, y es, por lo tanto, aplicable a regiones con alta incidencia de radiación diurna, es decir, más de 3000 horas de sol en promedio por año. Esta técnica ha sido aplicada con bastante éxito en países como Colombia, Tailandia, México y Bangladesh.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Lugar de estudio

Las pruebas se realizaron en Lima, ciudad de la costa peruana, con una menor incidencia de la radiación solar con respecto a las zonas rurales (Región andina) en la que se llega por ejemplo hasta las 4000 horas de sol por año. Por

esa razón es de esperarse que la tecnología aquí propuesta se pueda aplicar allá con mejores resultados.

2.2 Metodología

Se trataron muestras de agua con concentraciones de As(III) de 0.200 y 0.500 mg/L. A 500 mL de agua se le adiciona 10 gotas de jugo de limón (equivalente a 0.5 mL aprox.) y 0.5 mL de solución de Fe(II) de 5000 ppm provenientes de la sal de Mohr (relación molar de Fe^{2+} /citrato se vario en el rango de 0 a 10). Seguidamente, la botella de plástico de Polietileno de Tereftalato (PET) con todo este contenido, es irradiada con luz solar o de lámpara UV de 3 a 4 horas. En las partes 3(b) y 3(c) se irradian simultáneamente 4 muestras de idénticas características en botellas PET. Cada 30 minutos se retira una de ellas y se coloca en oscuridad para ser analizada posteriormente, dejándola posteriormente en reposo durante toda la noche para que decante. Al día siguiente la muestra es filtrada y se determina la concentración de arsénico total presente en el agua mediante el método espectrofotométrico con dietilditiocarbamato de plata.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados se presentan de la siguiente manera, inicialmente se muestra un análisis de la influencia de Fe^{2+} /citrato en la descontaminación de agua con arsénico utilizando radiación solar. Seguidamente se muestran resultados obtenidos iluminando con luz UV de lámparas y finalmente se estudian muestras iluminadas con luz solar.

3.1 Optimización de la razón Fe^{2+} /citrato

Un punto a considerar en la remoción de arsénico es el efecto del contenido de Fe y citrato. Para ello se realizaron variaciones sobre la relación molar Fe^{2+} /citrato de 2, 4, 6, 8 y 10 con la concentración de arsénico, donde la muestra inicial presentaba 200 ppb As (III) y que fue tratada con irradiación solar durante 3 horas. Los resultados (Fig. 1) muestran que un incremento en la relación Fe^{2+} /citrato produce una remoción de hasta por debajo de 30 ppb. Del gráfico se puede observar que la relación Fe^{2+} /citrato pasa por un máximo en la remoción de As y esto ocurre cuando esta relación llega a ser 6, donde podemos encontrar valores de hasta 10 ppb As. Hay

que recordar que un incremento en la concentración de Fe produce un aumento también sobre la concentración de Fe residual en el agua tratada, lo cual es también perjudicial, ya que en elevadas dosis puede causar efectos tóxicos para la salud. Por lo tanto, en lo que sigue del trabajo se empleará una relación molar del Fe^{2+} /citrato de 1.8.

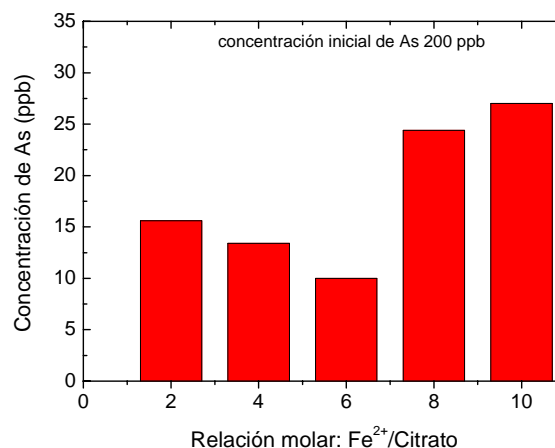


Figura 1. Gráfico de la relación molar del Fe^{2+} /citrato y la concentración de As en un experimento típico de descontaminación con irradiación solar. La concentración inicial de As fue de 200 ppb.

a) Irradiación con lámpara ultravioleta

En este experimento, la muestra se irradió con luz ultravioleta proveniente de dos arreglos. El primero utiliza “fluorescentes de luz negra” General Electric de 20 W y el segundo con una lámpara OSRAM Ultravitalux de 300 W. La potencia por unidad de área en la posición de la botella se midió de con un radiómetro UDT S371R con una cabezal UVA sensible a 365 nm.

En las Figuras 1(a) y 2(a) se muestran la potencia por unidad de área de la radiación ultravioleta, medida a 365 nm, durante el tiempo de la irradiación con las lámparas de General Electric y OSRAM, respectivamente. Se puede observar que la intensidad de la radiación es aproximadamente constante durante la irradiación, cuyo valor es $\sim 3 \text{ mW/cm}^2$ y $\sim 7,4 \text{ mW/cm}^2$ para la lámpara de General Electric y OSRAM, respectivamente. Ambas lámparas tienen una intensidad despreciable en 285 nm.

La remoción de arsénico obtenido al irradiar una muestra de agua con 500 ppb de As con la lámpara de General Electric durante 90 minutos y la lámpara OSRAM

durante 4 horas se muestran en las figuras 2(b) y 3(c), respectivamente.

Los resultados indican que al irradiar la muestra con $\sim 3 \text{ mW/cm}^2$ de luz UV solo remueve el arsénico en un 42% en 90 minutos de tratamiento. Sin embargo en 30 minutos ya se alcanzó la máxima remoción de As, para mayores tiempos de irradiación no aumenta la remoción de As (Fig. 1 (b)). Para el caso de la lámpara de $\sim 7,5 \text{ mW/cm}^2$, el arsénico es removido casi en su totalidad (95% aprox.) en 4 horas de tratamiento (Fig. 2 (c)). Para una muestra con menor concentración de As (200 ppb) irradiada con la lámpara de $\sim 7,5 \text{ mW/cm}^2$, el 95 % de As es removido después de 4 horas de irradiación (Fig. 2 (b)).

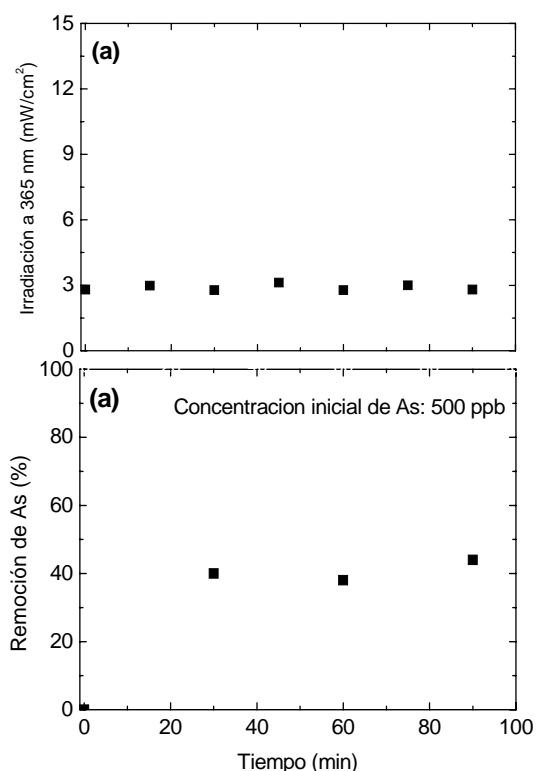


Figura 2. (a) Irradiación UV de una lámpara medida a 365 nm durante un experimento típico de descontaminación de As (b) Eficiencia de remoción de arsénico con lámpara de luz UV. La concentración inicial del arsénico fue 500 ppb.

Tabla 3. Variación de la concentración de arsénico durante 90 minutos de tratamiento. La irradiación fue realizada con una lámpara UV de $\sim 3 \text{ mW/cm}^2$ medida a 365 nm.

Tiempo (minutos)	Concentración de As (mg/L)
0	0.500
30	0.300
60	0.310
90	0.280

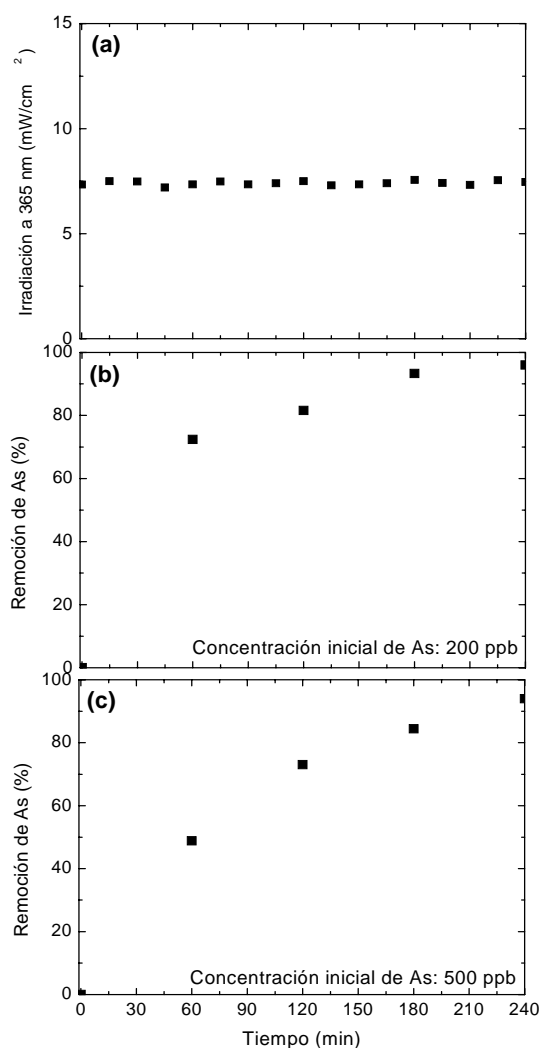


Figura 3. (a) Irradiación UV de una lámpara, medida a 365 nm, durante un experimento típico de descontaminación de As (b) Eficiencia de remoción de arsénico con lámpara de luz UV. La concentración inicial del arsénico fue 200 ppb. (c) Eficiencia de remoción de arsénico con lámpara de luz UV. La concentración inicial del arsénico fue 500 ppb.

En las Tablas 3 y 4 se muestran las concentraciones de As obtenidos después de la irradiación con la lámpara UV de ~ 3 mW/cm² y $\sim 7,5$ mW/cm², respectivamente.

Al irradiar la muestra con la lámpara UV de ~ 3 mW/cm² la concentración del arsénico de 500 ppb disminuye a 280 ppb en 90 minutos, este resultado no cumple con los requerimientos de la Normativa Peruana, según la Ley General de Aguas, ni las normativas internacionales, OMS. Con la lámpara de $\sim 7,5$ mW/cm² se reduce la concentración de arsénico de 200 ppb a <10 ppb y de 500 ppb a 30 ppb en 4 horas de tratamiento, ajustándose a la Normativa Peruana. Para la muestra con una concentración inicial de arsénico de 200 ppb cumple lo establecido por la OMS en cuanto al nivel arsénico en el agua.

Tabla 4. Variación de la concentración de arsénico durante las 4 horas de tratamiento. La irradiación fue realizada con una lámpara UV de $\sim 7,5$ mW/cm² medida a 365 nm. Las concentraciones iniciales de arsénico fueron: (a) 200 ppb y (b) 500 ppb

(a)		(b)	
Tiempo (minutos)	Concentración de As(mg/l)	Tiempo (minutos)	Concentración de As (mg/l)
0	0.200	0	0.50
60	0.055	60	0.25
120	0.037	120	0.135
180	0.015	180	0.078
240	< 0.010	240	0.030

b) Irradiación con luz solar

En las figuras 4(a) y 5(a) se presenta la radiación solar en W/m², mientras que en las Figuras 3(b) y 4(b) se puede observar la componente ultravioleta de esta radiación medida a 365 nm durante el tratamiento. Las figuras 3(c) y 4(c) muestran la remoción de As obtenida irradiando la muestra durante 3 horas. Las medidas fueron realizadas en intervalos de 1 hora y las concentraciones iniciales de As en el agua fueron de 200 (Fig. 3) y 500 ppb (Fig. 4).

La remoción de As después de 3 horas de irradiación solar son de 95% y 90 % a partir de 500 y 200 ppb de As, respectivamente.

Para tiempos mayores se puede lograr una remoción total.

Las tablas 5(a) y 5(b) muestran la variación de la concentración de arsénico, partiendo de una concentración inicial de 200 y 500 ppb respectivamente.

Los resultados obtenidos muestran que en 3 horas de tratamiento, la concentración final de arsénico decrece a 40 y 60 ppb partiendo de una concentración inicial de 200 y 500 ppb respectivamente. Para el caso que se utilizó una concentración inicial de 200 ppb en 4 h de irradiación solar, se llegó a una concentración menor a 10 ppb.

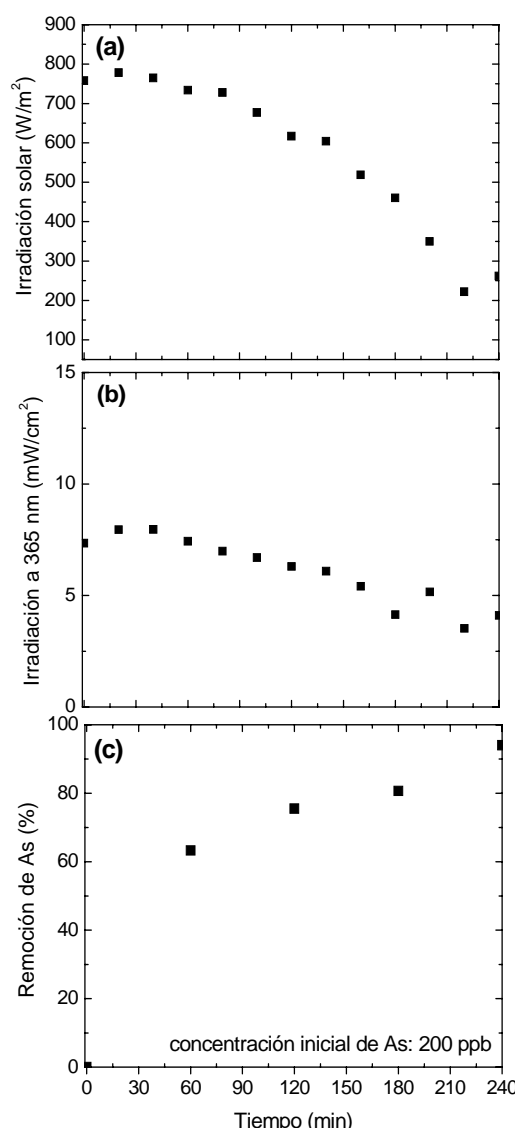


Figura 4 (a) Irradiación solar durante un experimento típico de descontaminación de As. (b) Componente UVA medida a 365 nm de un experimento típico de descontaminación de As. (c) Eficiencia de remoción de arsénico con luz solar para una concentración inicial de As de 200 ppb.

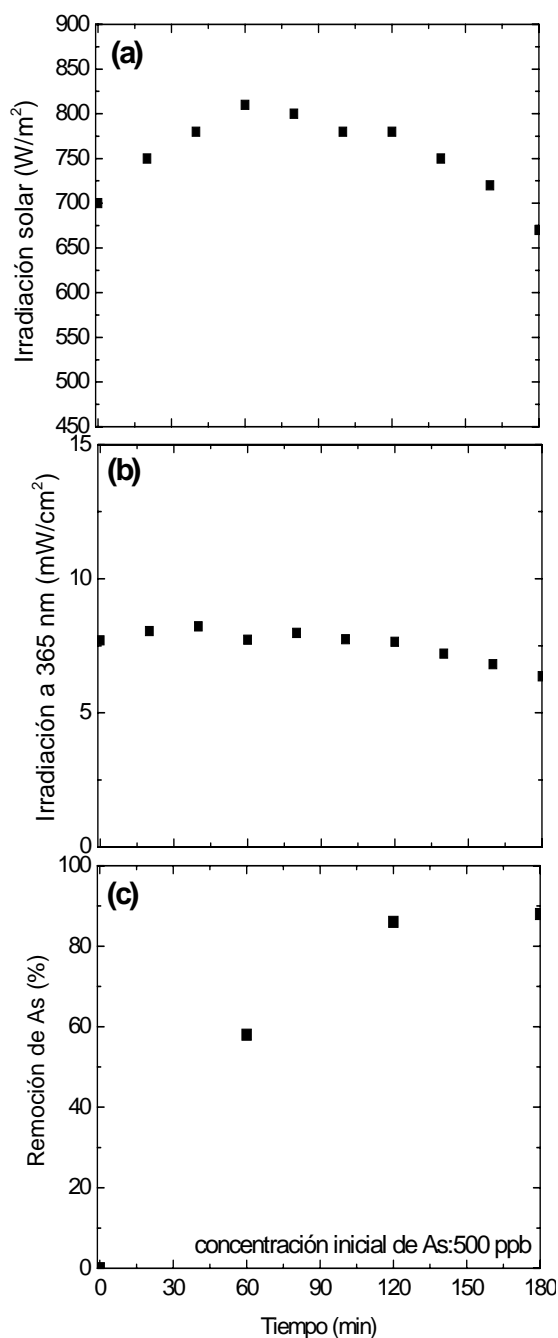


Figura 5. (a) Irradiación solar durante un experimento típico de descontaminación de As. (b) Componente UVA measured at 365 nm para un experimento típico de descontaminación de As. (c) Eficiencia de remoción de arsénico con luz solar para una concentración inicial de As de 500 ppb.

Tabla 5. Variación de la concentración de arsénico durante las 3 a 4 horas de tratamiento con irradiación solar. Las concentraciones iniciales de arsénico fueron: (a) 200 ppb y (b) 500 ppb

(a)		(b)	
Tiempo (minutos)	Concentración de As(mg/l)	Tiempo (minutos)	Concentración de As(mg/l)
0	0.200	0	0.500
60	0.063	60	0.210
120	0.049	120	0.070
180	0.039	180	0.060
240	< 0.010		

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que irradiando con 7.5 mW/cm² de luz UVA, durante al menos 4 h, a muestras de 200 y 500 ppb de arsénico en agua y con una relación molar Fe²⁺/citrato de 1.8, se logró una remoción de arsénico que cumple para norma técnica peruana. La rapidez de descontaminación del arsénico depende de la relación molar Fe²⁺/citrato y es proporcional a la intensidad de la luz UV.

De lo expuesto se concluye que esta Tecnología de descontaminación es efectiva para aplicarla a nivel domiciliario en zonas rurales del país donde hay fuerte contaminación e incidencia por la industria minera, haciendo apta esta agua contaminada por arsénico para consumo humano.

Agradecimientos

Los autores agradecen al International Science Programme de la Universidad de Uppsala, a la Facultad de Ciencias de la UNI, al IPEN y al proyecto OEA, ASO Project AE 141/2001 por el financiamiento parcial de este trabajo.

REFERENCIAS

- 1) Boletín del Área de Recursos Naturales y del Medio Ambiente Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico. *Economía y Ambiente*, 1999.
- 2) Esparza M.L. y Wong M. *Abatimiento de Arsénico en aguas subterráneas para zonas rurales*. XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1998.
- 3) Environmental Health Criteria, N° 224: Arsenic.
- 4) Callegaro R., Cusimano N., Deambrosi N. Y Albina L., *Métodos Prácticos para la Corrección de aguas arsenicales*. Laboratorio de Ingeniería Sanitaria, Dpto. de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires. 1992.
- 5) Ríos E., Lorenz A. y Ríos R.,. *Estado actual del arsenicismo crónico en la provincia de Tucumán*. Revista Médica de Tucumán 3 (1997) 67.
- 6) Petkova V.,. *Estudio piloto para remoción del arsénico, Estado de Hidalgo, México*. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XIV, N° 3 (1999) 65.
- 7) <http://www.sandec.ch/water/SORAS.pdf>