

PRESENCIA DE ARSENICO EN AGUAS DE POZOS PROFUNDOS Y SU REMOCIÓN USANDO UN PROTOTIPO PILOTO BASADO EN COLECTORES SOLARES DE BAJO COSTO

ARSENIC OCCURENCE IN DEEP WATER WELLS AND ITS REMOVAL USING A PILOT PLANT BASED ON LOW COST SOLAR COLLECTORS

Ramiro Escalera Vásquez*, Mauricio Ormachea***, Omar Ormachea**y Miguel Heredia*

*Centro de Investigaciones en Procesos Industriales – CIPI

**Centro de Investigaciones Ópticas y Energías - CIOE

Universidad Privada Boliviana

***Instituto de Investigaciones Químicas, Universidad Mayor de San Andrés

rescalera@upb.edu

(Recibido el 27 de octubre 2014, aceptado para publicación el 17 de noviembre 2014)

RESUMEN

Se ha realizado un relevamiento de la calidad físico-química y presencia de arsénico en aguas de pozos con profundidad mayor a 50 m, ubicados en la zona periurbana oeste de la ciudad de Cochabamba, mediante muestreos llevados a cabo durante dos periodos diferentes (húmedo y seco). Por otra parte, se ejecutó un estudio de desempeño de una planta piloto de tratamiento para la remoción de arsénico (As) basado en la aplicación de colectores solares de bajo costo, construidos con materiales reciclables de fácil accesibilidad. Las aguas subterráneas son del tipo calcio-bicarbonato (Ca-HCO_3) por su predominancia sobre otros cationes y aniones, son ligeramente alcalinas (pH 7,4 – 8,3) y sus concentraciones de hierro Fe (II) y manganeso Mn (II) disueltos son relativamente altas, variando entre <0,1 y 2,1 mg/L y <0,1 y 1,2 mg/L, respectivamente. Son moderadamente reductoras, con potencial óxido-reducción (ORP) entre -12,5 y 69 mV. Existe una significativa presencia natural de As. Cerca de la mitad de las muestras presentan valores superiores al valor requerido por la Norma Boliviana de Agua Potable (NB 512) de 10 $\mu\text{g/L}$. En el periodo seco (8 meses) cerca del 40% de las muestras la superan en más de 10 veces. El desempeño del sistema de tratamiento piloto, mediante el proceso de Remoción Asistida por Oxidación Solar (RAOS), fue satisfactorio incluso en días nublados con remociones mayores al 80%, logrando reducir la concentración de As hasta valores muy por debajo de lo requerido en la Norma Boliviana de agua potable. Existe una remoción muy significativa de As (cerca del 75%) en la trayectoria que va desde la boca de pozo hasta la entrada al sistema de tratamiento. La remoción puede explicarse por la presencia de incrustaciones de óxidos de hierro (III) y manganeso (IV) depositadas en la superficie de la línea de distribución, que incluye tuberías y tanques de almacenamiento, que pueden adsorber los arseniatos formados por la aireación en el trayecto. La aireación con aspersores comerciales domésticos puede lograr efectivamente la oxidación de arsenitos a arseniatos.

ABSTRACT

The arsenic concentrations and quality of water from 18 deep water wells (above 50 m) located in the west side peri-urban area of Cochabamba, Bolivia have been assessed, together with a study on the performance of a low cost solar collector based pilot plant applied to arsenic removal. The analyzed water samples indicated a calcium-bicarbonate (Ca-HCO_3) water type. They are slightly alkaline, ranging from 7,4 to 8,3 with an average of 7,7. The redox sensitive ions concentrations, iron and manganese are relatively high, <0,1–2.1 mg/L (average 0,3 mg/L) and < 0,1 – 1,2 mg/L (average 0,4 mg/L), respectively. They are slightly reductive (ORP in the range of -12,5 and – 69 mV). Arsenic was determined in the same sampling sites and in two different periods (wet and dry seasons) Dissolved arsenic concentrations exceed Bolivian regulations and World Health Organization (WHO) guidelines (10 $\mu\text{g/L}$) for drinking water in approximately 50% of the wells. Moreover, nearly 40% of the wells exceeded those regulations more than ten times, in samples taken within the dry season (8 months). The performance of the pilot plant, which uses the Solar Oxidation and Removal of Arsenic (SORAS) technique, was satisfactory even in cloudy days, obtaining arsenic removals higher than 80% and As concentrations far below the Bolivian regulations. There exists a significant removal of arsenic (c.a. 75%) in the course from the water well to the entrance to the pilot plant. Such removal occurs due to the adsorption of arsenate ions on iron (III) and manganese (IV) oxides, attached to the surface of the distribution line, including pipes and storage tanks. Aeration with domestic commercial sprinklers can achieve an effective oxidation of arsenite ions to arsenates.

Palabras Clave: Arsénico, Cochabamba, Remoción de Arsénico Asistida por Oxidación Solar (RAOS).

Keywords: Arsenic, Cochabamba, Solar Oxidation and Removal of Arsenic (SORAS).

1. ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación de arsénico en el agua proveniente de fuentes naturales, representa una amenaza de alcance muy amplio que afecta actualmente a muchos países en varias regiones del mundo. Las zonas más conocidas donde existen aguas subterráneas con elevados contenidos de arsénico son Bangladesh (< 2000 ppb), India (< 3400 ppb), Chile (< 1300 ppb), Argentina (< 758 ppb), México (< 263 ppb), entre otros [1], [2]. Se estima que cerca de un total de 150 millones de personas en el mundo están afectadas con la perspectiva de seguir incrementándose debido que constantemente se descubren nuevas áreas contaminadas.

El consumo permanente de arsénico provoca la intoxicación crónica debido a su acumulación en el organismo humano y la exposición prolongada a elevadas concentraciones de arsénico daña el sistema nervioso central, el hígado y la piel, resultando en la aparición de diversos tipos de cáncer, tales como el cáncer de la piel, de los pulmones y la hiperqueratosis [3], [4].

En Bolivia, Ramos *et al.* [5] han detectado regiones en el altiplano, concretamente en la cuenca del lago Poopó, en las que aguas de pozos poco profundos (hasta 30 m), poseen concentraciones de arsénico que sobre pasan hasta en 25 veces la norma boliviana de agua potable y la recomendación de la OMS (10 µg/l). Ormachea *et al.* [6] estudiaron la zona cercana a la orilla sud del mismo lago en muestras de agua empleadas para el consumo provenientes de pozos poco profundos durante periodos lluvioso y seco. Se encontraron concentraciones de arsénico en el intervalo <5,2 y 207 µg/l, promediando 72 µg/l. Por otra parte, en el Distrito de Oruro, se encontraron concentraciones de As hasta de 964 µg/L en aguas de pozo con más del 50% de las 67 muestras superando los 10 µg/L [1].

Como se observa, en Bolivia existen muy pocos estudios que conciernen con la presencia natural de arsénico en aguas de consumo humano y se han realizado pocos estudios sobre la hidro-química, movilización y transporte de arsénico desde las fuentes geológicas hacia las aguas subterráneas [6]. El presente trabajo se enfoca en la evaluación de las características físicas y químicas y la presencia natural de arsénico y otros elementos traza en aguas subterráneas destinadas al consumo humano en zonas periurbana de la Ciudad de Cochabamba

Para prevenir la aparición de las enfermedades mencionadas, varios grupos de científicos han focalizado su atención en la remoción de arsénico mediante la aplicación de la radiación solar ultravioleta y se han desarrollado sistema caseros simples de tratamiento de aplicación inmediata, utilizando botellas PET. La técnica de Remoción de Arsénico Asistida por Oxidación Solar (RAOS), desarrollada por Hug *et al.* [7], ha sido aplicada con éxito relativo en Bangladesh, donde las concentraciones varían entre 100 y 150 µg/L, logrando remover el As (III) con una eficacia del 50-70%. Esta técnica utiliza el Fe(III) contenida en las aguas y gotas de jugo de limón, en presencia de la luz solar para remover arsénico por adsorción con los óxidos de hierro que se generan en el proceso. Lara *et al.* [8] modificaron el método con la adición de una sal de Fe(II), obteniendo remociones mayores al 95% en aguas de alta concentración de As(V) contenido en las aguas del río Camarones (1250 µg/L). Sin embargo, estos procesos son largos (duran entre 3 y 6 horas), su capacidad es limitada y se los ha utilizado, preferentemente para el consumo humano, sin tomar en cuenta los requerimientos de agua potable para brebaje de animales domésticos, agua para riego y/o la mayor demanda proveniente de postas sanitarias y escuelas rurales.

Con el propósito de satisfacer los requerimientos mencionados, el Centro de Investigaciones en Procesos Industriales y el Centro de Investigaciones Ópticas de la Universidad Privada Boliviana (UPB) desarrollaron un foto-reactor de flujo continuo de buena capacidad (130 Lm⁻²d⁻¹), para el tratamiento de aguas subterráneas con alto contenido de arsénico natural [9]. Los autores utilizaron el método RAOS modificado por Lara *et al.* [8], logrando remociones mayores al 98%. El foto-reactor fue construido con materiales reciclados, fácilmente accesibles (tubos de neón usados, canaletas de desagüe de PVC y papel de aluminio), logrando concentrar la radiación UVA integral hasta 2,8 veces la radiación solar incidente. Posteriormente, Escalera *et al.* [10] obtuvieron relaciones empíricas sobre la cinética del crecimiento de los flóculos de Fe(OH)₃, que adsorben el arsénico total (As (V) y As(III)) en función de las intensidades de radiación UVA efectiva, utilizando concentradores solares de mayor capacidad y reduciendo tiempos de exposición para la obtención de altas remociones de arsénico.

Estos estudios proporcionaron las bases para el diseño e implementación de un prototipo piloto del tratamiento basado en la utilización de colectores solares económicos, construidos con materiales accesibles y de fácil transferencia tecnológica. Este trabajo presenta los resultados del desempeño obtenido para remoción de arsénico en aguas provenientes de un pozo profundo, cuyo sistema de distribución contiene los componentes típicos de un domicilio (bomba de impulsión, tanque de almacenamiento y red de distribución hacia los puntos de uso).

2. MÉTODOS Y EQUIPO EXPERIMENTAL

▪ Caracterización de las Aguas

Se recolectaron 18 muestras de aguas de pozos profundos que suministran agua a 18 Organizaciones Territoriales de Base (OTBs) en los municipios de Cercado y Colcapirhua, dentro del área del valle bajo de Cochabamba. El procedimiento de toma de muestras siguió el protocolo estándar [3]. El pH, la conductividad eléctrica (CE), temperatura y potencial óxido reducción (Eh), se determinaron *in situ* y la alcalinidad se midió también *in situ* utilizando un titulador digital sobre una muestra filtrada.

Los análisis de aniones y cationes se llevaron a cabo en el laboratorio de Instituto de Investigaciones Químicas (IIQ) de la UMSA en La Paz, Bolivia. Los aniones mayoritarios, cloruros (Cl^-), nitratos (NO_3^-) y sulfatos (SO_4^{2-}) se analizaron utilizando electrodos específicos HANNA. Los cationes mayoritarios, metales traza y arsénico, fueron determinados en muestras previamente filtradas ($0,45\mu\text{m}$) y acidificadas ($\text{pH}=2$ con HNO_3 conc.). Las concentraciones de sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y metales traza se analizaron en un espectrómetro de absorción atómica de llama, Perkin Elmer AAnalyst 100. Las concentraciones de arsénico se determinaron mediante un espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer AAnalyst 200 con generador de hidruros y sistema de inyección de flujo continuo.

▪ El Prototipo Piloto

El prototipo piloto del tratamiento tiene las siguientes partes (Figura 1):

- 4 concentradores semicirculares de 24 pulgadas de diámetro y 1,2 m de largo a los que sobre la lámina de aluminio se sobrepuso una lámina transparente protectora de plástico a fin de que el polvo depositado pueda limpiarse sin dañar la lámina de aluminio.
- Un tanque de alimentación y dosificación de reactivos provisto de una boquilla aspersora y bomba de $\frac{1}{2}$ hp para impulsar el agua hacia los foto-reactores.
- Un decantador de placas de $5\text{ m}^3/\text{d}$ de capacidad fabricado de acrílico.
- Un tanque de almacenamiento de agua decantada provista de una bomba de $\frac{1}{2}$ hp.
- Un filtro comercial provisto de cartuchos de $5\mu\text{m}$ de tamaño de poro



Figura 1 – Prototipo piloto del sistema de tratamiento.
Foto-reactores y sedimentador.

Se efectuaron corridas durante 16 días en las condiciones climatológicas variables (nublados y no nublados), donde se obtuvieron muestras de agua no tratada a la entrada al tanque dosificador, proveniente del tanque de almacenamiento

situado en el techo de un establecimiento educativo de Cochabamba, agua a la salida del decantador y agua filtrada a la salida del grifo de la cocina del establecimiento. Adicionalmente se tomaron muestras en dos días diferentes del agua en boca de pozo y en las aguas del tanque de almacenamiento. En estos días la intensidad de la radiación UVA varió entre 5 y 43 W/m² considerando valores promediados entre las 11 de la mañana y las 3 de la tarde. Se utilizó una dosis de 25 mg/L de citrato de sodio en todas las corridas; 80 mg/L de sulfato ferroso hepta-hidratado en los días 3,4,6,8,9,12,13 y 16 y 91 mg/L de cloruro férrico hexa-hidratado en los días 1,2,5,7,10,11,14 y 15.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

▪ *Características de las Aguas*

La Tabla 1 muestra datos del relevamiento de campo y los resultados de los análisis físico-químicos de las muestras colectadas en boca de pozo de los 18 pozos profundos.

TABLA 1- CALIDAD FISICO-QUÍMICA DE AGUAS DE POZOS DE LA ZONA PERIURBANA DE COCHABAMBA

Parámetro	Abril			Septiembre			Límite permisible NB 512
	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	
Parámetros físicos							
pH	8,3	7,4	7,7	8,24	7,12	7,84	6,5 – 9,0
Conductividad específica, µS/cm	2710	294	925	1599	213	616	1500
Potencial Óxido-Reducción, mV	-	-	-	-12,5	-68,8	-48,8	
Aniones mayoritarios							
Bicarbonatos, mg-CaCO ₃ /L	516,9	117,3	250,8	544	119	269	370
Cloruros, mg/L	157,5	1,5	27,4	150	0,8	35	250
Fluoruros, mg/L	0,7	0,1	0,3	7	0,5	1,1	1,5
Sulfatos, mg/L	347,1	0,9	67,3	315,7	0,3	49,3	400
Nitratos, mg/L	15,4	0,7	6,0	17,1	1,6	8,6	45
Cationes mayoritarios							
Calcio, mg/L	322,1	36,6	110,2	53,5	15	41,75	200
Magnesio, mg/L	83	5,8	21,9	56,2	4,3	17,0	150
Sodio, mg/L	285,2	21,5	73,9	180,5	13,4	58,7	200
Potasio, mg/L	11,0	0,8	3,0	2,7	0,3	1,4	-
Metales							
Hierro, mg/L	2,1	< 0,1	0,3	1,2	< 0,1	0,3	0,3
Manganeso, mg/L	-	-	-	1,3	< 0,1	0,4	0,05
Zinc, mg/L	3,7	0,5	1,5	1,7	< 0,1	0,95	5,0
Cobre, mg/L	0,5	< 0,07	0,09	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,0

El arsénico se determinó en muestras obtenidas en los mismos sitios en dos periodos diferentes (húmedo y seco). La Tabla 2 muestra las variaciones en las concentraciones en ambos periodos.

Los valores de pH fueron ligeramente alcalinos. Las conductividades específicas están dentro de los valores típicos encontrados en pozos profundos, menores al límite permisible boliviano, excepto 2 de los 18 pozos. El potencial óxido-reducción (ORP) tuvo un intervalo de valores negativos, indicando características anóxicas y reductoras en boca de pozo. Las muestras analizadas se clasifican como aguas de tipo calcio-bicarbonato (Ca-HCO₃), por la predominancia respectiva del ión calcio sobre otros cationes mayoritarios como el magnesio, sodio y potasio y el anión bicarbonato sobre otros aniones mayoritarios como los cloruros, nitratos y sulfatos. Los dos pozos de alta conductividad específica presentaron valores altos de sodio, calcio, alcalinidad de bicarbonatos y sulfatos que superaron lo establecido en la norma boliviana. Una característica general encontrada es que las concentraciones de nitratos y sulfatos son relativamente bajas. La distribución de elementos traza mostró una amplia variación de concentraciones. Las concentraciones de zinc (Zn) variaron entre 0,5 y 3,7 mg/L (promedio 1,5 mg/L). Entre los elementos sensibles a oxidación-reducción, el hierro (Fe) y el manganeso (Mn) mostraron una amplia variabilidad en el intervalo de < 0,1 -2,1 mg/L

(promedio 0,3 mg/L) y < 0,1 – 1,2 mg/L (promedio 0,4 mg/L), respectivamente, superando en algunos pozos a la norma boliviana de agua potable. La presencia de hierro y manganeso es típica en aguas subterráneas de la ciudad de Cochabamba, provocando el fenómeno de incrustaciones de óxidos de Fe(III) y Mn (IV) en los sistemas de distribución de agua.

La Tabla 2 presenta las concentraciones de arsénico disuelto en las mismas muestras obtenidas en las dos campañas de muestreo anteriormente descritas.

TABLA 2- CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO DISUELTO EN AGUAS DE POZOS DE LA ZONA PERIURBANA DE COCHABAMBA

Nº	Código de muestra	abril (µg/L)	septiembre (µg/L)
1	OTB 0-1	39,7	143,6
2	OTB 0-2	153,0	496,0
3	CLP-1	< LD	< LD
4	OTB1-1	< LD	3,3
5	OTB1-2	46,2	188,8
6	OTB-2	< LD	< LD
7	OTB-3	24,4	193,8
8	OTB-4	< LD	< LD
9	OTB-5	< LD	25,3
10	OTB 5-2	8,1	11,8
11	OTB 7-1	104,2	581,7
12	OTB 7-2	12,3	3,4
13	OTB-9	< LD	< LD
14	OTB-10	8,2	< LD
15	OTB-11a	50,0	150,1
16	OTB-11b	< LD	34,4
17	OTB-12	93,5	186,7
18	CLP-2	< LD	< LD
	Promedio	54,0	168,3
LD = 3 µg/L	% muestras inferiores a la NB 512	55,6%	44,4%
	% muestras 10-50 µg/L	27,8%	16,7%
	% muestras 50 -100 µg/L	5,6%	0,0%
	% muestras 100 -250 µg/L	11,1%	27,8%
	% muestras 250 - 600 µg/L	0,0%	11,1%

Los contenidos de arsénico disuelto variaron entre < 3 µg/L y 153 µg/L (prom = 54 µg/L) al final del periodo de lluvias, mientras que al final del periodo seco estas concentraciones variaron entre < 3 µg/L y 581,7 µg/L (prom = 168,3 µg/L), lo que muestra un incremento de las concentraciones en el periodo seco respecto del periodo húmedo. Sin embargo, lo más importante es que, en ambos periodos, cerca de la mitad de las muestras presentan valores superiores al valor requerido por la Norma Boliviana de Agua Potable (NB 512) de 10 µg/L. Aún más, dentro del periodo seco (8 meses) cerca del 40% de las muestras la superan en más de 10 veces. Actualmente las OTBs no realizan ningún tratamiento de potabilización para la remoción del arsénico ni otras sustancias contaminantes, lo que implica un alto riesgo de exposición de la población a elevados contenidos de arsénico presentes en el agua de consumo. Hasta el presente no se conoce si las fuentes del arsénico son de origen natural o antropogénico, tampoco se sabe acerca de los mecanismos de su liberación hacia el agua subterránea y lo que es aún peor no se saben los efectos causados sobre la población.

▪ **Desempeño del Prototipo Piloto**

La Tabla 3 y Figuras 2 y 3 presentan los resultados de las condiciones de operación y el desempeño del prototipo piloto en cuanto a la remoción de arsénico.

A partir de estos resultados se puede observar que se lograron concentraciones de agua tratada en grifo por debajo del límite de cuantificación (< 2 ppb) del método utilizado (espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros) y muy por debajo del límite permisible de la Norma Boliviana NB 512. Los porcentajes de remoción superaron el 80 % incluso en días nublados cuando la intensidad de radiación fue considerablemente baja (días 3-5).

▪ **Concentraciones y Especiación de Arsénico desde la Boca de Pozo hasta la Entrada al Sistema de Tratamiento**

Los contenidos de As en el agua no tratada en la entrada al tanque de dosificación después del aspersor, variaron entre 10 y 18 µg/L, valores menores a los registrados en estudios anteriores para aguas en boca de pozo [10]. Por esta razón se midieron las concentraciones de arsénico total y As (III) en boca de pozo y el tanque de almacenamiento elevado. Los resultados se muestran en las Tablas 4 y 5.

TABLA 3- CONDICIONES DE OPERACIÓN Y REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN EL PROTOTIPO PILOTO DE FLUJO CONTINUO

Día	Estado del tiempo	Intensidad de radiación UVA, W/m ²	Flujo volumétrico, L/h	Tiempo, h	Volumen acumulado, L	Concentración de arsénico, µg-As total/L		Porcentaje de Remoción global
						Agua sin tratar	Agua tratada	
1	Parcialmente nublado	24,45	20,00	4	80	13,5	2,61	80,65
2	Parcialmente nublado	26,48	22,50	4	90	14,2	< 2	> 86
3	Nublado	4,96	22,50	4	90	14,1	< 2	> 86
4	Nublado	9,77	40,00	4	160	16,5	< 2	> 88
5	Nublado	6,68	37,14	3,5	130	15,0	2,09	86,07
6	Parcialmente nublado	16,42	20,00	4	80	17,9	< 2	> 88
7	Soleado	42,55	40,00	4	160	12,9	< 2	> 84
8	Soleado	40,14	43,33	3	130	9,3	< 2	> 78
9	Soleado	38,73	30,00	3	90	13,7	< 2	> 85
10	Soleado	42,87	30,00	3	90	14,0	< 2	> 86
11	Soleado	42,54	40,00	3	100	14,5	< 2	> 86
12	Parcialmente nublado	32,73	40,00	4	160	16,1	< 2	> 88
13	Parcialmente nublado	30,74	22,50	4	90	10,6	< 2	> 81
14	Nublado	18,09	37,14	3,5	130	17,0	< 2	> 88
15	Nublado	17,97	25,00	4	100	13,2	2,02	84,70
16	Nublado	27,33	37,14	3,5	130	16,5	< 2	> 88

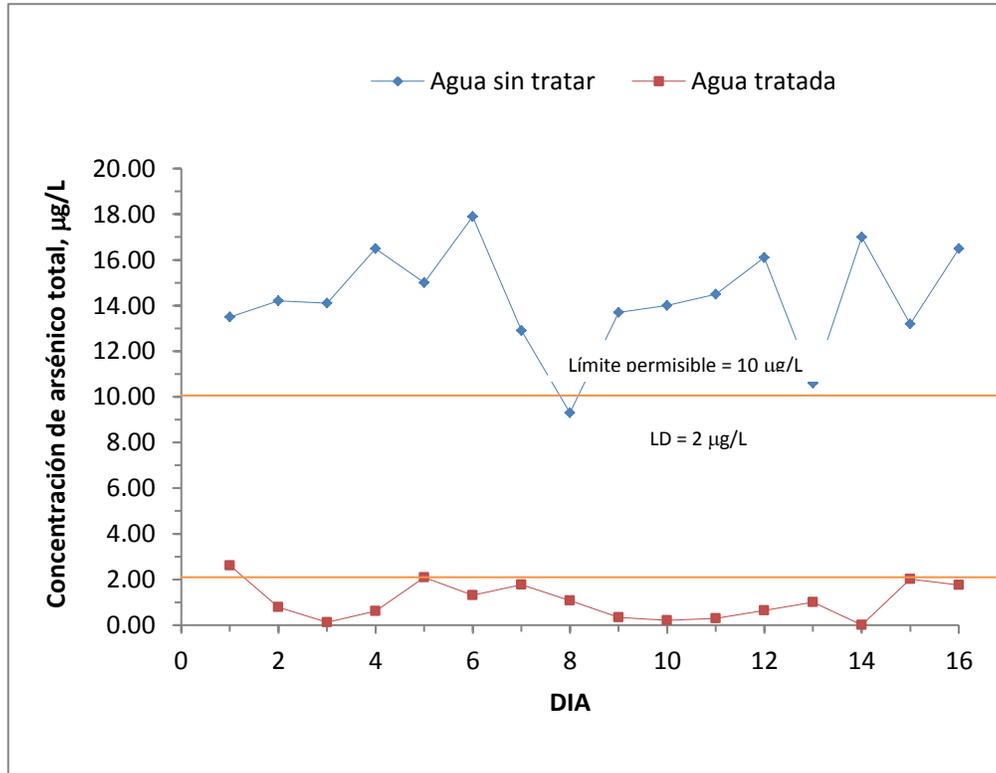


Figura 2 – Concentraciones de arsénico total a la salida del aspersor y agua filtrada en grifo.

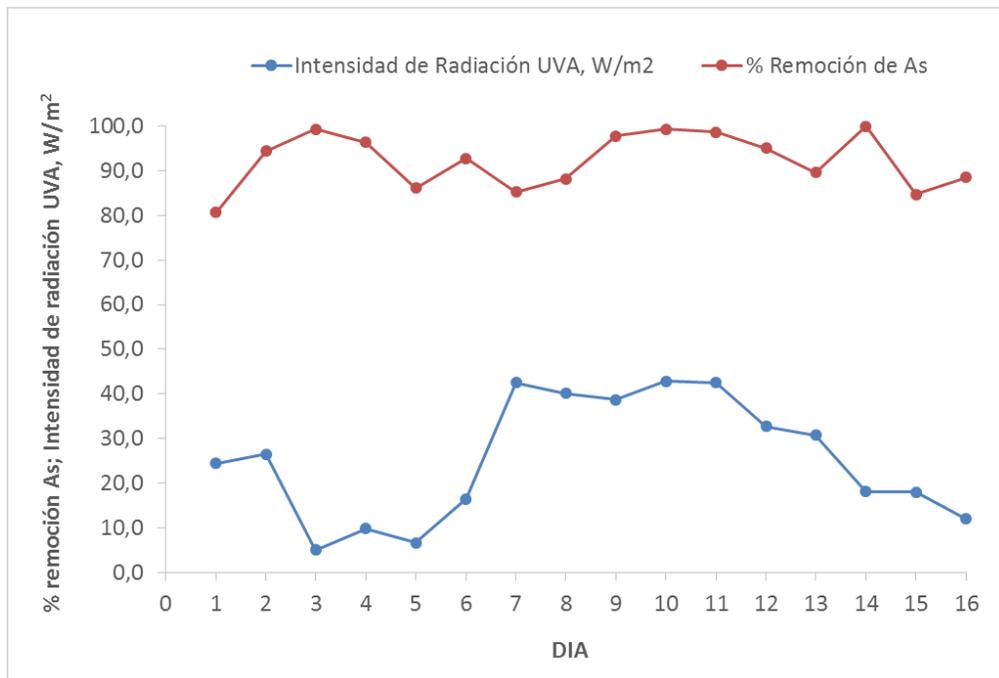


Figura 3 – Porcentajes de remoción de arsénico e intensidades de radiación UVA.

TABLA 4 - EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AS TOTAL DESDE LA BOCA DE POZO HASTA LA ENTRADA AL TANQUE DOSIFICADOR

Concentración en boca de pozo, µg-As total/L	Concentración en tanque elevado. µg-As total/L	Porcentaje de remoción entre boca de pozo y tanque elevado	Concentración en tanque 1, después de aspersion, µg-As total/L	Porcentaje de remoción entre boca de pozo y tanque 1 después de aspersion
98,8	70,45	28,69	23,53	76,19
91,1	71,85	21,13	23,38	74,33

Se observa que existe una remoción global (75% aprox.) en la trayectoria comprendida entre boca de pozo y la entrada al tanque de dosificación, pasando por el tanque elevado. La remoción se podría explicar por la adsorción del arsénico sobre la superficie interna de las tuberías de acero galvanizado sobre las cuales, probablemente se hayan desarrollado incrustaciones de óxidos de hierro a lo largo de su tiempo de uso (15 años), existiendo una remoción mayor en la trayectoria más larga entre el tanque elevado y el tanque de dosificación (51% aprox.), que la trayectoria entre la boca de pozo y el tanque elevado (25 % aprox.).

TABLA 5 - DISTRIBUCIÓN DE AS (III) Y AS (V) EN AGUA DE BOCA DE POZO

As total, µg-As/L	As (III), µg-As/L	As (V), µg-As/L	Porcentaje de As (III)	Porcentaje de As (V)
98,8	92,65	6,15	93,78	6,22
91,1	80,5	10,60	88,36	11,64

Los porcentajes altos de As (III) en agua de boca de pozo (cerca de 90%), indican condiciones reductoras dentro del pozo (ORP entre -15 y -18 mV) y el poco contacto con el oxígeno del aire. Lo contrario sucede en las aguas a la salida del aspersion (70 – 90% de As (V)), debido precisamente a la oxigenación del agua realizada antes de la dosificación de reactivos (Tabla 6).

TABLA-6 DISTRIBUCIÓN DE AS (III) Y AS (V) EN TANQUE DE DOSIFICACIÓN DESPUÉS DEL ASPERSION

Día	As total, µg-As/L	As (III), µg-As/L	As (V), µg-As/L	Porcentaje de As (III)	Porcentaje de As (V)
7	12,9	1,34	11,56	10,36	89,64
8	9,3	2,03	7,27	21,80	78,20
14	17,0	5,29	11,71	31,13	6,88
16	16,5	2,36	14,14	14,30	85,70

4. CONCLUSIONES

Existe una significativa presencia natural de arsénico en aguas subterráneas provenientes de pozos profundos (profundidad mayor a 30 m) de las zonas periurbanas de la ciudad de Cochabamba. Cerca de la mitad de las muestras presentan valores superiores al valor requerido por la Norma Boliviana de Agua Potable (NB 512) de 10 µg/L. Dentro del periodo seco (8 meses) cerca del 40% de las muestras la superan en más de 10 veces.

Las aguas subterráneas de las zonas periurbanas afectadas son del tipo calcio-bicarbonato (Ca-HCO₃) por su predominancia sobre otros cationes (magnesio, sodio, potasio) y aniones (nitratos, sulfatos, cloruros y fosfatos). Son ligeramente alcalinas (pH 7,4 – 8,3) y sus concentraciones de hierro Fe (II) y manganeso Mn (II) disueltos son relativamente altas, variando entre < 0,1 y 2,1 mg/L y <0,1 y 1,2 mg/L respectivamente. Son moderadamente reductoras, variando su potencial óxido-reducción (ORP) entre -12,5 y 69 mV, lo que indica que el arsénico presente puede distribuirse entre sus iones arsenitos As (III) y arseniatos As(V).

El sistema de tratamiento piloto basado en la aplicación de colectores solares en la remoción de arsénico, mediante el proceso RAOS, fue satisfactorio incluso en días nublados con remociones mayores al 80%, logrando reducir la concentración de arsénico hasta valores muy por debajo de lo requerido en la norma boliviana de agua potable.

Existe una remoción muy significativa de arsénico (cerca del 75%) en la trayectoria que va desde la boca de pozo hasta la entrada al sistema de tratamiento. La remoción puede explicarse por la presencia de incrustaciones de óxidos de hierro (III) y manganeso (IV) depositadas en la superficie de la línea de distribución, que incluye tuberías y tanques de almacenamiento, que pueden adsorber los arseniatos formados por la aireación en el trayecto.

La aireación con aspersores comerciales domésticos puede lograr efectivamente la oxidación de arsenitos a arseniatos.

5. REFERENCIAS

- [1] K. Van Den Bergh et al. "Arsenic in drinking water wells on the Bolivian high plain: Field monitoring and effect of salinity on removal efficiency of iron-oxides-containing filters." *Journal of Environmental Science and Health Part A*, vol. 45, pp.1741–1749, 2010.
- [2] L. Cornejo et al. "In field arsenic removal from natural water by zero-valent iron assisted by solar radiation." *Environmental Pollution*, vol. 156, pp. 827-831, 2008.
- [3] A. Hall. "Chronic arsenic poisoning," in *Toxicology Letters*, vol. 128, 2002, pp. 69–72.
- [4] N. Hanjani et al. "Chronic arsenicism from Chinese herbal medicine." *Cutis*, vol. 80, pp. 305–308, 2007.
- [5] O. Ramos et al. "Sources and behavior of arsenic and trace elements in groundwater and surface water in the Poopó Lake Basin, Bolivian Altiplano." *Environ Earth Sci.* vol. 66, pp. 793–807, 2012.
- [6] M. Ormachea et al. "Geogenic arsenic and other trace elements in the shallow hydrogeologic system of Southern Poopó Basin, Bolivian Altiplano." *Journal of Hazardous Materials*, vol. 262, pp. 924– 940, 2013.
- [7] S. Hug et al. "Arsenic contamination of ground water: disastrous consequences in Bangladesh." *EAWG News*, vol. 49, pp. 18–20, , 2001.
- [8] F. Lara et al. "Solar-light assisted removal of arsenic from natural waters: effect of iron and citrate concentrations." *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 81, pp. 1282–1287, 2006.
- [9] C. R. Escalera and O. A. Ormachea. "Solar Oxidation and Removal of Arsenic from Groundwater Utilizing a Semicircular Section Tubular Photoreactor." *Journal of Environmental Science and Engineering*, pp. 1071-1082, 2012.
- [10] R. Escalera et al. "Remoción de Arsénico Asistida por Oxidación UV Solar (RAOS) en Foto-Reactores Tubulares de Sección Semicircular - Cinética del Crecimiento de Flóculos de Fe(OH)₃." *Investigación & Desarrollo*, vol. 11, pp. 37-45, 2011.