

<http://revistas.unlp.edu.ar/index.php/domus/issue/current/showtoc>

AUGMDOMUS,  
1:105-117, 2010  
Asociación de  
Universidades  
Grupo Montevideo  
ISSN:1852-2181

## Remoción de arsénico, hierro y manganeso en agua subterránea en planta piloto ubicada en una escuela rural

*Arsenic, iron and manganese removal from ground water in a pilot plant located at a rural school*

Romina Vidoni<sup>a,\*</sup>, Virginia Pacini<sup>a</sup>, Ana María Ingallinella<sup>a</sup>, Graciela Sanguinetti<sup>a</sup>

### Palabras clave:

remoción; procesos biológicos.

Keywords: arsenic; removal; biological processes

### ABSTRACT

*The Process BioCIS-UNR® developed by the Centro de Ingeniería Sanitaria (CIS) for iron (Fe) and manganese (Mn) removal was further developed in this work to remove arsenic (As) in presence of Fe and Mn. We operated a pilot plant located in a school at Zuripozo (Province of Santiago del Estero, Argentina). The plant was connected to a well with water containing total Fe 0.35 mg.L<sup>-1</sup>, Fe<sup>2+</sup> 0.04 mg.L<sup>-1</sup>, total Mn 0.16 mg.L<sup>-1</sup>, total As 42 g.L<sup>-1</sup> and Fe bacteria. This element concentration was compared with element concentration in natural water. The efficiency of element removal was 35% of total Fe, 90% of total Mn and 10% of As (maximum 40%).*

*Ferrous sulfate was added to raw water to improve process efficiency. The efficiencies obtained were 92% for total Fe, 95% for Fe<sup>2+</sup>, 93% for total Mn and 66% for total As. Initial low efficiency of As removal may be due to a low formation of Fe biological precipitates, causing a shortage of available sites for As adsorption. This easily operated process with low installation and operation costs is an affordable technical solution for drinking water supply for rural areas with scarce resource located far from urban centers.*

### RESUMEN

En el Centro de Ingeniería Sanitaria (CIS) se desarrolló el Proceso BioCIS-UNR® para remoción de hierro (Fe) y manganeso (Mn) y mediante este trabajo, se pretende ampliar su campo de aplicación para remoción de arsénico (As) en presencia de Fe y Mn. Se operó una planta piloto en una escuela en Zuripozo (Provincia de Santiago del Estero, Argentina), en una perforación cuya agua tiene: Fe total 0.35 mg.L<sup>-1</sup>, Fe<sup>2+</sup> 0.04 mg.L<sup>-1</sup>, Mn total 0.16 mg.L<sup>-1</sup>, As total 42 g.L<sup>-1</sup> y bacterias del Fe. Con las concentraciones naturales las eficiencias de remoción fueron 35% Fe total, 90% Mn total y 10% As (con valores máximos de remoción observados de 40%). Para mejorar el proceso, se agregó sulfato ferroso al agua cruda; las eficiencias fueron 92% Fe Total, 95% Fe<sup>2+</sup>, 93% Mn Total y 66% As Total. La baja eficiencia de remoción de As inicial podría deberse a la baja cantidad de precipitados biológicos de Fe formados, que da lugar a escasos sitios de adsorción disponibles para el As. Este proceso, de fácil operación, bajos costos de instalación y operación, es una tecnología aplicable a abastecimientos de agua potable con escasos recursos y alejados de centros urbanos.

<sup>a</sup> Centro de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba 245 bis, 2000 Rosario, Provincia de Santa Fe

Argentina. E-mail: [cis@fceia.unr.edu.ar](mailto:cis@fceia.unr.edu.ar)

\* Autor para correspondencia: +54 341 4808546. E-mail: [vidoni@fceia.unr.edu.ar](mailto:vidoni@fceia.unr.edu.ar)

## INTRODUCCIÓN

### Presencia de As en aguas subterráneas

Mientras que la presencia de elevadas concentraciones de sulfato, cloruro, calcio y magnesio en el agua, altera su aceptabilidad por los consumidores, el arsénico, fluoruro o nitrato afectan la salud, en especial el As que puede ocasionar enfermedades de la piel y derivar en cáncer. Más del 50 % de la población de Argentina se abastece con servicios cuya fuente es agua subterránea, que debe tratarse ya que no tiene la calidad para ser potable. Por lo menos 4000000 de personas en América Latina (Argentina, Chile, México, El Salvador Nicaragua, Perú y Bolivia) están expuestas a concentraciones de As entre 0.002-2.9 mg.L<sup>-1</sup> (Castro de Esparza, 2004). En Argentina, las provincias más afectadas son: Santa Fe, Salta, Tucumán, Santiago del Estero, Buenos Aires y La Pampa. En particular Santa Fe presenta en la franja oeste un área con concentraciones >50 g.L<sup>-1</sup>

de As. La Organización Mundial de la Salud estableció como límite máximo 10 g.L<sup>-1</sup> de As (WHO, 2004) al igual que el Código Alimentario Argentino (CAA, 2007), con lo que se incrementó la población afectada. Contar con nuevas metodologías y optimizar las existentes es importante para alcanzar los nuevos valores.

### Presencia simultánea de Fe, Mn y As

En Santa Fe existen al menos diez localidades con concentraciones simultáneas de Fe, Mn y As. En el centro oeste de Chaco, hay niveles altos de Fe y As con amplia variación. En el Departamento Robles (Santiago del Estero), se relevaron pozos con altas concentraciones de As y presencia de Fe y Mn (Herrera et al., 2000; Bundschuh et al., 2004) (Tabla 1). En base a estos datos, se seleccionó una escuela en Zuripozo, para construir una planta piloto y estudiar la eficiencia de remoción simultánea de As, Fe y Mn.

Provincia	Localidad	As µg.L <sup>-1</sup>	Fe mg.L <sup>-1</sup>	Mn mg.L <sup>-1</sup>
Santa Fe <sup>(1)</sup>	Km 38 – Vera	16	0.24	0.17
	Sarmiento	42	0.24	<0.02
	San Antonio de Obligado	19	1.38	0.29
	Tostado	21	0.11	0.15
	Soledad	77	0.40	<0.02
	La Gallareta	50	0.10	0.50
	Arroyo seco	80	0.40	ND
	Las Rosas	45	0.20	<0.02
	Villa Constitución (B° Fernández)	38	0.10	0.05
	San Lorenzo	30	0.40	<0.02
Santiago del Estero <sup>(2)</sup>	Cañada Escobar 1	116	1.03	0.37
	Cañada Escobar 2	219	0.14	0.02
	El Barrial	185	0.27	0.01
	Zuripozo	42	0.35	0.16
	Lázaro	154	0.11	1.17
	El Soler	355	0.18	0.04
	Palo Borracho	120	0.14	0.19
	El Puestito	231	0.09	1.44
	Nuevo Líbano	86	0.23	0.57
Cañada Escobar 3	44	0.19	0.22	
Chaco <sup>(3)</sup>	Almirante Brown	70	0.44	ND
	Cdte. Fernández	50	0.23	ND
	General Güemes	30	0.39	ND
	Independencia	50	0.51	ND
	Quitilipi	40	0.33	ND
	Maipú	30	0.10	ND

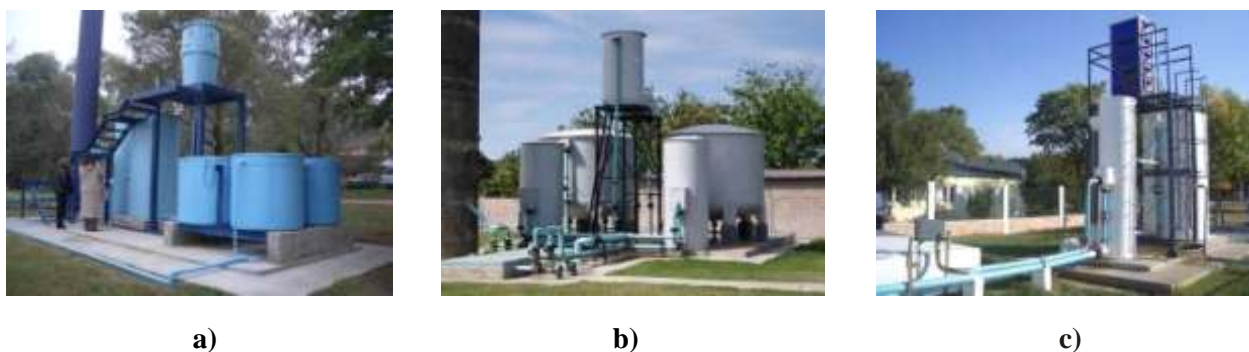
Fuente: <sup>(1)</sup> Datos recopilados por el CIS; <sup>(2)</sup> Claesson & Fagerberg (2003); <sup>(3)</sup> Blanes & Jiménez (2006). ND= dato no determinado.

**Tabla 1.** Presencia simultánea de As, Fe y Mn en aguas subterráneas de localidades de tres provincias

**Table 1.** Simultaneous presence of As, Fe and Mn in groundwater in different localities in three provinces

El Proceso BioCIS-UNR se aplicó en cuatro plantas a escala real con muy buenos resultados, siendo las primeras de este tipo instaladas en el país: Facultad de Bioingeniería de la Universidad Nacional de

Entre Ríos en Oro Verde (Entre Ríos), Florencia (Santa Fe), Libertador (Corrientes) (Figura 2), y Villa Constitución (Santa Fe) (Pacini *et al.*, 2006; Vidoni *et al.*, 2009 a).



**Figura 2.** Plantas BioCIS-UNR: a) Oro Verde, b) Florencia, c) Libertador

**Figure 2.** Pilot Plant BioCIS-UNR: a) Oro Verde, b) Florencia, c) Libertador

Remoción de As en presencia de procesos biológicos

La remoción de As a través de procesos biológicos es una tecnología con mucho potencial, que aprovecha las ventajas de la remoción biológica de Fe y Mn, y es aplicable a lugares donde el Fe, Mn y As están presentes en forma simultánea. El As sería adsorbido en los flocs biológicos formados por ferrobacterias.

*Experiencias en plantas a escala piloto:* se realizaron estudios en aguas naturales con medianas y altas concentraciones de Fe y ferrobacterias, con muy buenas eficiencias de remoción de As y Fe (Lehimas *et al.*, 1999, 2001). También se realizaron experiencias con agua cruda natural ( $2.8 \text{ mg.L}^{-1}$  de Fe y  $0.60 \text{ mg.L}^{-1}$  de Mn y bacterias del Fe) agregando As(III) como  $\text{As}_2\text{O}_3$ , con eficiencias de remoción de 80% para  $60 \text{ g.L}^{-1}$  de As y 70% para  $160 \text{ g.L}^{-1}$  de As en agua cruda (Katsoyiannis *et al.*, 2002). Durante la biooxidación se liberarían enzimas que

catalizan la formación de peróxido de hidrógeno, que contribuiría a la oxidación de As(III); luego procede la adsorción del As(V) en los precipitados biológicos (Katsoyianis *et al.*, 2004; Zouboulis *et al.*, 2005). Por otra parte, concentraciones de fosfatos de  $400 \text{ mg.L}^{-1}$  redujeron la remoción de As total de 80% a <30%. Los fosfatos compiten con el As (igual que en coagulación/adsorción) por los sitios de adsorción sobre la superficie de los óxidos.

*Experiencias en plantas a escala real:* existen datos de los que se puede presumir que procesos de bio-remoción de Fe y Mn ayudan a remover sales de As. Fernández (2002) cita una planta en Camboya ( $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) cuya agua cruda tiene Fe  $10 \text{ mg.L}^{-1}$ , Mn  $1 \text{ mg.L}^{-1}$ , As  $0.30 \text{ mg.L}^{-1}$  y pH 6.5. Luego de la aeración y filtración rápida, el agua filtrada tiene Fe  $0.1 \text{ mg.L}^{-1}$ , Mn  $0.3 \text{ mg.L}^{-1}$  y As  $5 \text{ g.L}^{-1}$ . En Bangladesh se estudiaron 60 plantas diseñadas para remover  $\text{Fe}^{2+}$  que también remueven As, con una remoción mayor al

### Remoción de As mediante procesos fisicoquímicos

Las tecnologías consideradas las mejores disponibles para remoción de As son ósmosis inversa, electro diálisis inversa, coagulación-adsorción-filtración, intercambio iónico, alúmina activada y ablandamiento con cal (USEPA, 2000). En relación a la coagulación-adsorción sobre flocs de hidróxidos de Fe y Al, es aplicable para tratar aguas con As que poseen baja dureza y sales totales, y compite favorablemente con la ósmosis inversa en relación a menores costos operativos, consumo energético, rechazos de agua e insumos.

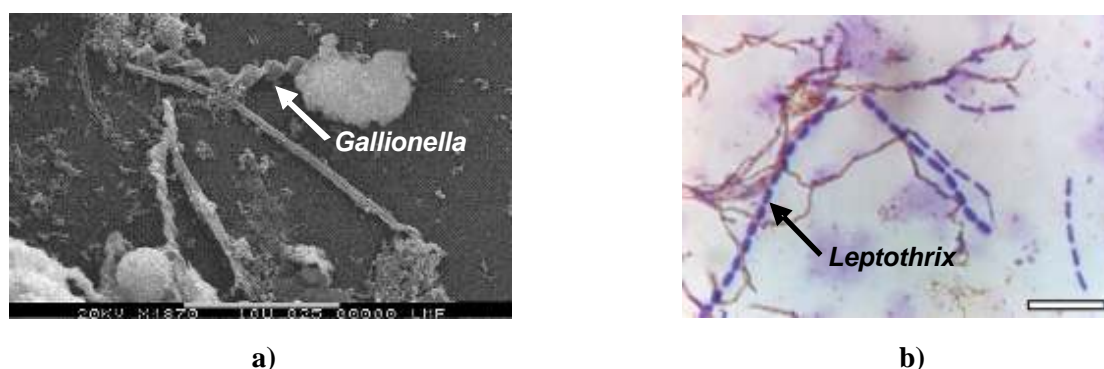
En el CIS se trabaja en el desarrollo de procesos para la remoción de As y F (Proceso ArCIS-UNR®, patente y registro de marca). Hasta la fecha hay en operación cuatro plantas en la provincia de Santa Fe, una en provincia de Buenos Aires, y dos en construcción.

### Remoción biológica de hierro y manganeso

La remoción biológica de Fe y Mn es un proceso muy difundido a nivel mundial, en

general consiste en dos etapas de filtración biológica en arena, aeración intermedia y ajuste de pH (Czekalla *et al.*, 1985; Mouchet, 1992; Gislette, 1997), o filtración lenta en arena con pre-tratamiento como aeración y/o filtro de contacto (Hatva, 1988; Hedbreg *et al.*, 1997). Este proceso tiene muchas ventajas frente a los fisico-químicos convencionales: no se requieren productos químicos, se pueden utilizar velocidades de filtración grandes, las carreras de filtración son largas, se usa agua cruda para el lavado, por lo tanto sus costos de instalación, operación y mantenimiento son bajos.

En el CIS se desarrolló un proceso biológico para remoción de Fe y Mn en agua subterránea (Proceso BioCIS-UNR®, patente y registro de marca). Este sistema probado a escala piloto, se está aplicando a escala real basado en: aeración, prefiltración ascendente y filtración rápida, aprovechando las propiedades de las bacterias del Fe (Figura 1) que se adhieren al manto filtrante acelerando la oxidación y precipitación del Fe y Mn como parte de su proceso metabólico. Se obtienen eficiencias de remoción de Fe y Mn mayores al 90% trabajando con condiciones naturales del agua y sin agregar productos químicos (Ingallinella *et al.*, 2001, 2002; Pacini *et al.*, 2004; Pacini, 2006).



**Figura 1.** Fotografía de ferrobacterias: a) Microscopio Electrónico de Barrido (Planta BioCIS-UNR®, Florencia, Santa Fe); b) Microscopio óptico 1000x, barra de 15  $\mu$ m (Planta Las Garzas, Santa Fe).

**Figure 1.** Images of ferrobacteria: a) Scanning Electron Microscope (plant name and location: BioCIS-UNR®, Florencia, Santa Fe); b) Optical Microscope 1000x, 15  $\mu$ m reference bar (plant name and location: Las Garzas, Santa Fe)

70% para el 45% de las plantas (Al-Muyeed *et al.*, 2006). Katsoyianis *et al.* (2008) realizaron el seguimiento de una planta ( $135 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), cuya agua cruda tiene  $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  As total,  $14 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  As(III),  $550 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  fosfato,  $235 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  Mn,  $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  amonio y  $165 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  Fe total; con las siguientes etapas: aeración, filtros ascendentes mas coagulación con cloruro ferrico y filtración directa ascendente. Las concentraciones de As total en el agua tratada fueron  $<5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo fue ampliar el campo de aplicación del Proceso BioCIS-UNR®, para la remoción en forma conjunta de As, Fe y Mn.

### MÉTODOS

Se realizaron experiencias en campo operando una planta piloto en una escuela rural en Zuripozo (Santiago del Estero), la cual se abastece de un acuífero freático con una bomba manual por carecer de electricidad.

### Experiencias a escala piloto

*Descripción de la planta piloto:* comenzó a funcionar en septiembre de 2005 en forma continua por un año tratando un caudal de  $200 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ . El agua cruda se bombea desde el pozo al tanque elevado, pasa al aireador, luego al prefiltro grueso ascendente, y por último al filtro rápido (Figura 3). Durante el lavado, el agua del prefiltro se drena por la parte inferior y el filtro rápido se lava a contracorriente con agua cruda.

*Muestreo y métodos analíticos:* se tomaron muestras semanales del agua cruda y a la salida de cada unidad, donde se analizó: Fe total,  $\text{Fe}^{2+}$ , Mn total, As total, turbiedad y en forma diaria el caudal de filtración. Además se midió *in situ*: oxígeno disuelto (OD); pH y potencial redox (Eh). Se tomaron muestras en agua cruda y barro de lavado, con la técnica de Celda de Flujo (Gariboglio, 1993) para determinar presencia/ausencia de bacterias del Fe mediante observaciones microscópicas (microscopio trinocular Olympus Bx40).



**Figura 3.** Foto de la planta piloto de Zuripozo (Santiago del Estero)

**Figure 3.** Photo of the pilot plant at Zuripozo (Santiago del Estero)

Las técnicas analíticas empleadas en los análisis fisicoquímicos se incluyen en el Standard Methods (APHA, AWWA, WEF, 1995). pH y Eh: HACH sensION1. Oxígeno Disuelto: Handylab OX1/Set. Turbiedad: Turbídmetro HACH 2100. Fe total: Método de fenantrolina, más sodio metabisulfito. Fe<sup>2+</sup>: Método de fenantrolina. Mn total: PAN Hach Method 8149. Mn disuelto: filtrado por membrana de 0.45m. Amoníaco: Método de Nessler. As total: Método del dietil-ditiocarbamato y Absorción Atómica.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad fisicoquímica y microbiológica del agua cruda

El agua a tratar contenía en promedio: 0.30 mg.L<sup>-1</sup> Fe total, 0.04 mg.L<sup>-1</sup> Fe<sup>2+</sup>, 0.16 mg.L<sup>-1</sup> Mn total, 52 g.L<sup>-1</sup> As total, 4.18 mg.L<sup>-1</sup> OD y pH 7.30. Se observó abundante cantidad de bacterias filamentosas y muy escasa cantidad de *Gallionella* (Figura 4).



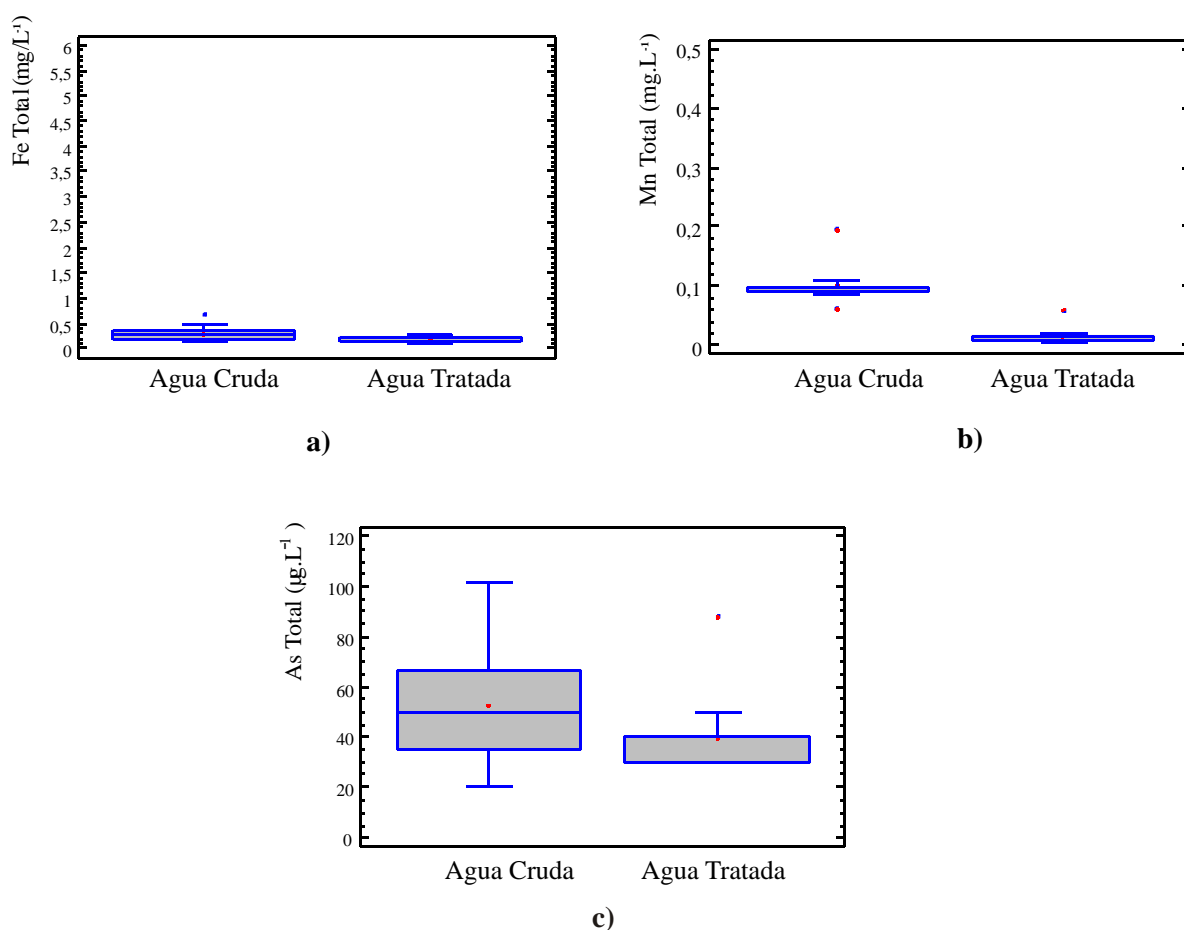
**Figura 4.** Microscopio óptico 400x: Bacterias filamentosas presentes en el agua cruda, barra 20 µm

**Figure 4.** Optical microscope 400x: filament-like bacteria in crude water, reference bar 20 µm

### Resultados operación planta piloto

En la 1<sup>o</sup> etapa se operó la planta piloto con las concentraciones naturales de Fe y Mn. El Fe total en el agua cruda fue 0.29 mg.L<sup>-1</sup>, con mayor dispersión que en la tratada, 0.19 mg.L<sup>-1</sup> (Figura 5 a). Las concentraciones de ingreso y salida de Mn total fueron 0.101 y 0.014 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, notándose una marcada remoción en el sistema y menores variaciones tanto en agua cruda como tratada (Figura 5 b). El As total en el agua cruda fue en promedio 52 µg.L<sup>-1</sup> y en la tratada 40 µg.L<sup>-1</sup> (Figura 5 c). Los valores de Fe<sup>2+</sup> en el agua cruda fueron muy bajos, aproximadamente 0.04 mg L<sup>-1</sup>, y cercanos a cero a la salida.

Las eficiencias de remoción fueron en promedio: 35% Fe total, 90% Mn total y 10% As total (máximo 40%) (Figura 6). Las altas eficiencias de remoción de Mn corresponderían principalmente a mecanismos biológicos debido a los valores de pH y Eh y a la abundante cantidad de bacterias filamentosas oxidantes del Mn (Vidoni et al., 2009 b). Comportamientos similares fueron observados en la operación de otras plantas de remoción de Fe y Mn basadas en el Proceso BioCIS-UNR®: Plantas Piloto de Avellaneda y Las Garzas (Pacini, 2006) y las Plantas a escala real de Oro Verde y Florencia (Vidoni et al., 2009 a).

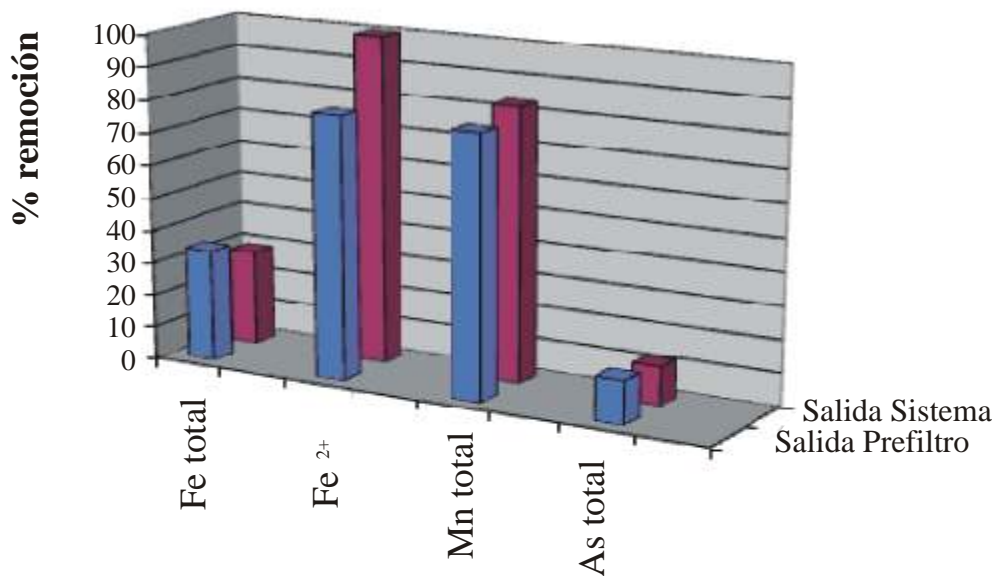


**Figura 5.** Concentración en agua cruda y tratada durante la 1ª Etapa. a) Fe total, b) Mn total, c) As total. Diagramas de caja y bigote. Las líneas horizontales: primer cuartil, mediana y tercer cuartil. Cruz: media aritmética. Barras: 1,5 rango intercuartil. Cuadrados: valor atípico

**Figure 5.** Concentration in crude and treated water during the 1st Stage: a) Total Fe, b) Total Mn, c) Total As. Box and whisker diagrams. Horizontal lines: first quartile, median value and third quartile. Cross: arithmetic mean. Bars: 1.5 interquartile range. Squares: atypical value

La remoción de Fe total, que correspondería a una combinación de mecanismos fisico-químicos y biológicos, fue inferior a la observada en las experiencias anteriormente citadas, debido posiblemente a la escasa concentración de *Gallionella* (bacterias específicas del Fe) frente a la abundante cantidad de bacterias filamentosas que oxidan Mn (Figura 4). Esta escasa presencia de *Gallionella* podría explicarse por la baja concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  en el agua cruda (en

promedio  $0.04 \text{ mg.L}^{-1}$ ), ya que se trata de un acuífero freático con concentraciones de OD en promedio  $4.2 \text{ mg.L}^{-1}$  y pH 7.3, lo que propicia la oxidación fisicoquímica de este metal antes del ingreso al sistema. En experiencias anteriores donde se usaron acuíferos más profundos (Pacini, 2006; Vidoni *et al.*, 2009 a) se observó abundante cantidad de *Gallionella*, relacionadas con altas remociones de Fe total.



**Figura 6.** Eficiencias de remoción de Fe total, Fe<sup>2+</sup>, Mn total y As total a la salida del Prefiltro (PF) y del sistema en la 1<sup>o</sup> etapa

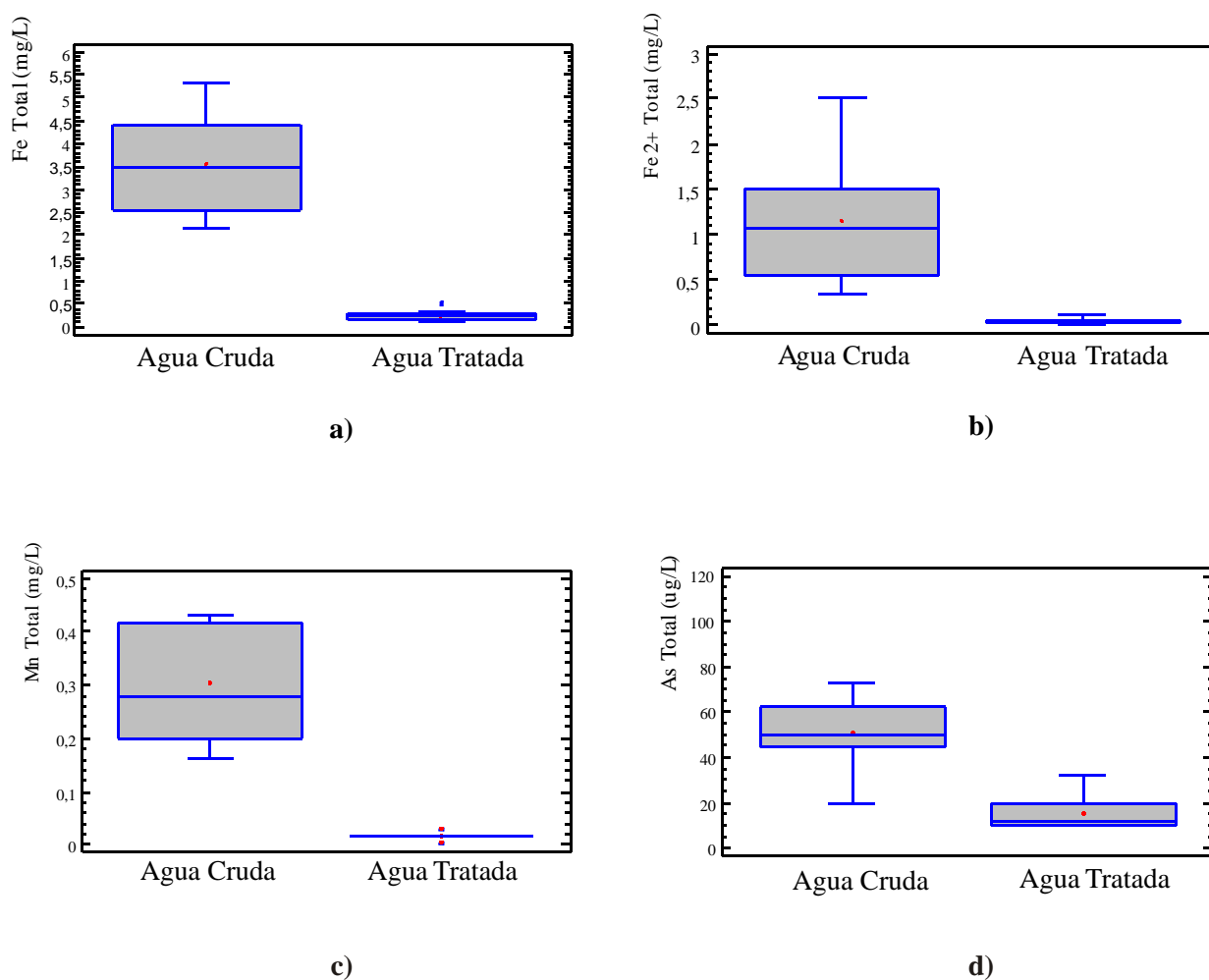
**Figure 6.** Efficiency of total Fe, Fe<sup>2+</sup>, total Mn and total As removal at the Pre-filter (PF) and system output for the 1st stage

La baja eficiencia de remoción de As podría deberse a la escasa cantidad de precipitados biológicos de Fe formados, que genera baja cantidad de sitios de adsorción disponibles para el As. Por otra parte, las mediciones de fosfato realizadas en el agua cruda (1.70 mg.L<sup>-1</sup>) y tratada (0.50 mg.L<sup>-1</sup>) podrían indicar una competencia en los sitios de adsorción con el As como se señala en la bibliografía (Katsoyiannis, 2004).

Con el objetivo de mejorar la remoción de As, en una 2<sup>o</sup> etapa se agregó sulfato ferroso en el agua cruda. En todos los parámetros se observa una mayor eficiencia de remoción, en comparación con la etapa 1. El Fe total en el agua cruda fue en promedio de 3.55 mg.L<sup>-1</sup> y a la salida 0.25 mg.L<sup>-1</sup> (Figura 7 a). Los valores de Fe<sup>2+</sup> obtenidos en el agua cruda (promedio 1.15 mg.L<sup>-1</sup>) presentan una cierta dispersión relacionada con el método de

incorporación de sulfato ferroso, mientras que en el agua tratada (promedio 0.05 mg.L<sup>-1</sup>) la dispersión fue mucho menor (Figura 7 b). Las concentraciones de ingreso de Mn total fueron 0.304 mg.L<sup>-1</sup> y 0.017 mg.L<sup>-1</sup> en el agua tratada, notándose nuevamente una marcada remoción (Figura 7 c). Se destaca que en esa etapa de investigación las concentraciones naturales de Mn total fueron superiores a las de la etapa anterior, probablemente debido a variaciones estacionales en las características del acuífero. En relación al As total, el promedio en el agua cruda fue 51 µg.L<sup>-1</sup>, y en el agua tratada 15 µg.L<sup>-1</sup>, correspondiendo el 50% de las mediciones a concentraciones menores a 10 µg.L<sup>-1</sup>, observándose mayor remoción que en la etapa anterior (Figura 7 d).



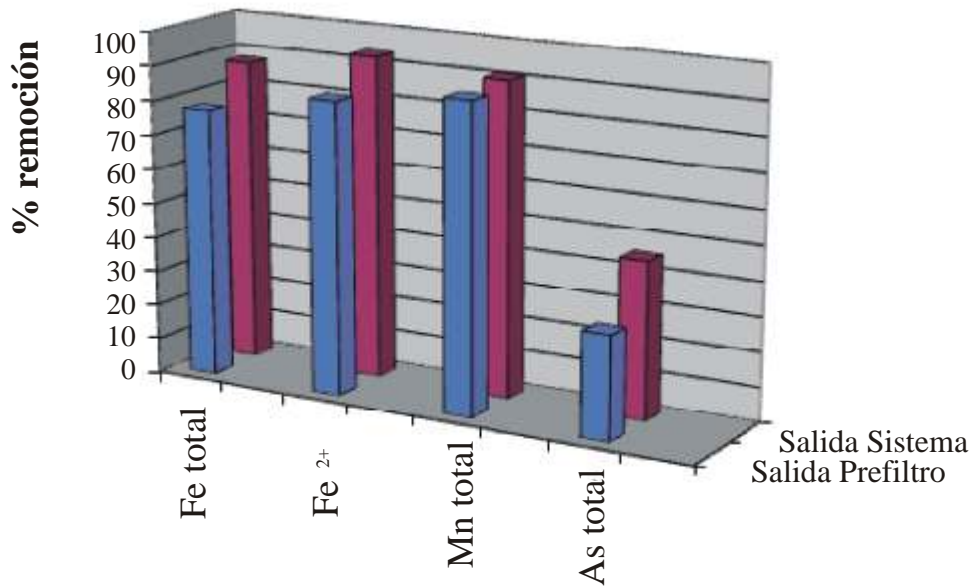


**Figura 7.** Concentración en agua cruda y tratada durante la 2ª Etapa: a) Fe total, b) Fe<sup>2+</sup>, c) Mn total y d) As total. Diagramas de caja y bigote. Las líneas horizontales: primer cuartil, mediana y tercer cuartil. Cruz: media aritmética. Barras: 1,5 rango intercuartil. Cuadrados: valor atípico

**Figure 7.** Concentration in crude and treated water during the 2nd Stage: a) Total Fe, b) Fe<sup>2+</sup>, c) Mn Total, d) Total As. Box and whisker diagrams. Horizontal lines: first quartile, median value and third quartile. Cross: arithmetic mean. Bars: 1.5 interquartile range. Squares: atypical value

Las eficiencias obtenidas a la salida del sistema fueron en promedio: 92% Fe total, 95% Fe<sup>2+</sup>, 93% Mn total y 66% As total (Figura 8). La mejora de la eficiencia de remoción de As en la 2ª etapa podría deberse a la mayor cantidad de precipitados

biológicos de Fe formados, lo que genera mayor cantidad de sitios de adsorción disponibles para el As, coincidiendo con lo encontrado por otros investigadores (Katsoyiannis et al., 2008).



**Figura 8.** Eficiencias de remoción de Fe total, Fe<sup>2+</sup>, Mn total y As total a la salida del Prefiltro (PF) y del sistema en la 2<sup>o</sup> etapa

**Figure 8.** Efficiency of total Fe, Fe<sup>2+</sup>, total Mn and total As removal at the Pre-filter (PF) and system output for the 2<sup>nd</sup> stage

Las altas eficiencias de remoción de Mn corresponderían principalmente a mecanismos biológicos, según valores de pH, Eh y presencia de bacterias filamentosas. Adicionando sulfato ferroso mejoraron las eficiencias de remoción, comparadas con la experiencia anterior, tanto de Fe total como de As total, llegando esta última al 60%, donde en el 50% de las muestras se obtuvieron concentraciones menores a 10 g.L<sup>-1</sup>.

## CONCLUSIONES

La aplicación de métodos de tratamiento biológico para la remoción de Fe y Mn en aguas subterráneas puede ser un método eficiente para la remoción en forma simultánea de As total. Durante el proceso, los óxidos de Fe y Mn se depositan en el medio filtrante junto con las bacterias, que ofrecen un ambiente favorable para la adsorción y remoción de los contaminantes.

El tratamiento propuesto constituye una tecnología aplicable a poblaciones alejadas de centros urbanos, no requiere mano de obra calificada y los costos (instalación-operación) son bajos. Se deberán profundizar las investigaciones en tecnologías apropiadas para el abatimiento de As ya que su límite máximo en el agua potable es cada vez más exigente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA, AWWA, WEF. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19<sup>th</sup> Edition, USA
- Al-Muyeed A & Afrin R, 2006. Investigation of the efficiency of existing iron and arsenic removal plants in Bangladesh. *Journal of Water Supply: Research and Technology AQUA*: 293-299
- Blanes PS & Giménez MC, 2006. *Evaluación de los Niveles de Fe y As en Aguas Naturales Subterráneas de la Región Centro Oeste de la Provincia del Chaco Argentina*. Informe Tecnológico. [online], 17(3): 3-8 [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642006000300002&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000300002&lng=es&nrm=iso). ISSN 0718-0764
- Bundschuh J, Farias B, Martin R, Storniolo A, Bhattacharya P, Cortes J, Bonorino G. & Albouy R. 2004. Groundwater arsenic in the Chaco Pampean Plain, Argentina: case study from Robles county, Santiago del Estero Province. *Applied Geochemistry* 19: 231-243
- CAA. 2007. Resolución Conjunta de la Secretaría de Políticas, Regulación y Relaciones Sanitarias, y de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la Nación, SPRyRS y SAGPyA N°68/2007 y N°196/2007
- Castro de Esparza ML. 2004. Presencia de As en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. *International Conference Evaluation and Management of Drinking Water Sources Contaminated with Arsenic*, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, pág. 1-13.
- Claesson M & Fagerberg J. 2003. *Arsenic in groundwater of Santiago del Estero, Argentina. Sources, mobilization controls and remediation with natural materials*. Minor Field Studies Scholarship Programme of KTH Royal Institute of Technology Stockholm
- Czekalla C, Mevius W & Hanert H. 1985. Quantitative removal of Fe and Mn by microorganisms in rapid sand filters (in situ investigations). *Water Supply* 3: 143
- Fernández RG. 2002. *Arsenic Removal from Groundwater using Ferric Chloride*. Master of Science Thesis, SEE07, IHE, Delft, The Netherlands
- Gislette P & Mouchet P. 1997. Iron, Manganese and Ammonia removal in drinking water: the biological treatments. *International Workshop on Iron and AIDIS*, Buenos Aires, Argentina
- Hatva T. 1988. Treatment of groundwater with slow sand filtration. *Water Science Technology* 20 (3): 141-147
- Hedbreg T. and Wahlberg T., 1998. Upgrading of waterworks with a new biooxidation process for removal of manganese and iron. Upgrading Of Water And Waste Systems, Kalmar, Suecia, *Water Science and Technology* 37 (9): 121-126
- Herrera H, Farias B, Martín R, Cortés J, Ferreira G. Tir J, & Storniolo A. 2000. El As en la zona rural del dpto Los Robles, Santiago del Estero, Argentina. *XVIII Congreso Nacional del Agua*. Termas de Río Hondo, Santiago del Estero, 217-218
- Ingallinella AM, Sanguinetti G, Pacini V. 2001. Remoción de Fe y Mn en aguas subterráneas mediante biooxidación. *WEFTEC Latin America 2001*, Water Environmental Federation, USA, Noviembre, San Juan, Puerto Rico, 1-9

- Ingallinella AM, Fernández RG, & Stecca LM. 2002. Proceso ArCIS-UNR® para la remoción de As y flúor en aguas subterráneas: una experiencia de aplicación. *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS (Argentina)* 66: 61-65
- Ingallinella AM, Sanguinetti G, & Pacini V. 2002a. Remoción biológica de Fe y Mn, una tecnología apropiada. *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS (Argentina)* 64: 39-45
- Ingallinella AM. 2004. Optimum conditions for arsenic and fluorine removal by coagulation with polyaluminum chloride and double filtration. *International Conference Evaluation and Management of Drinking Water Sources Contaminated with Arsenic*. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile
- Katsoyiannis IA, Zouboulis A, Althoff H & Bartel H. 2002. As(III) removal from groundwaters using fixed-bed upflow bioreactors. *Chemosphere* 47: 325-332
- Katsoyiannis IA & Zouboulis A. 2004. Application of biological processes for the removal of arsenic from groundwaters. *Water Research* 38: 17-26
- Katsoyiannis IA, Zouboulis A & Jekel M. 2004. Kinetics of Bacterial As (III) oxidation and subsequent As (V) removal by sorption onto Biogenic Manganese Oxides during groundwater treatment. *Industrial Engineering Chemical Research* 43 (2): 486-493
- Katsoyiannis I, Zikoudi A & Hug S. 2008. Arsenic removal from groundwater containing iron, ammonium, manganese and phosphate: A case study from a treatment unit in northern Greece. *Desalination* 224: 330-339
- Lehimas GF, Chapman JI & Bourguine FP. 1999. Use of biological processes for arsenic removal, a cost effective alternative to chemical treatment for As III in groundwater. *The World Water Congress Buenos Aires, Septiembre, 1-14*
- Lehimas GF. 2001. Arsenic removal from groundwater in conjunction with biological-iron removal. *J. CIWEM* 15: 190-192
- Mouchet P. 1992. From conventional to biological removal of Fe and Mn in France. *J. AWWA* 84 (4): 158-166
- Pacini V, Ingallinella AM & Sanguinetti G. 2004. Nuevos avances en la remoción biológica de Fe y Mn. *29º Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria, San Juan de Puerto Rico, 1-9
- Pacini V. 2006. *Prefiltración en Mantos de grava ascendente aplicados a la remoción biológica de Fe y Mn en aguas para consumo humano*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 1-220
- Pacini V, Ingallinella AM, Sanguinetti G, & Vidoni R. 2006. Remoción de Fe y Mn usando procesos biológicos: experiencias a escala real. *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS (Argentina)* 87: 33-41
- USEPA (US Environmental Protection Agency). 2000. Federal Register, 40 CFR Parts 141 and 142, National Primary Drinking Water Regulations; Arsenic and Clarifications to Compliance and New Source Contaminants Monitoring; Proposed Rule

- Vidoni R, Pacini VA, Ingallinella AM & Sanguinetti G. 2009a. Remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas mediante biooxidación: Experiencias a escala real. *Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, San Rafael, Mendoza, 1-7
- Vidoni R, Storniolo A, Pacini VA, Ingallinella AM & Sanguinetti G. 2009b. Remoción de arsénico en presencia de hierro y manganeso mediante procesos biológicos en aguas subterráneas. *Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, San Rafael, Mendoza, 1
- WHO. 2004. *Guidelines for Drinking Water Quality*. Third Edition. Volume 1. 515 p
- Zouboulis A & Katsoyiannis IA. 2005. Recent advances in the bioremediation of arsenic-contaminated groundwaters. *Environment International* 31: 213-219