

**XXVI CONGRESO INTERAMERICANO  
DE INGENIERIA SANITARIA Y  
AMBIENTAL**

**TEMA :** *Abatimiento de Arsénico en Aguas  
Subterráneas para zonas Rurales*

**AUTOR :** *María Luisa de Esparza  
María Wong de Medina*

*Noviembre de 1998*

# INTRODUCCIÓN

En varios países de América Latina como: Argentina, Chile, México, El Salvador; por lo menos cuatro millones de personas beben en forma permanente agua con niveles de arsénico que ponen en riesgo su salud. Las concentraciones de arsénico en el agua, sobre todo en el agua subterránea, presentan niveles que llegan en algunos casos hasta 1 mg/L. En otras regiones del mundo como India, China y Taiwan el problema es aún mayor. De acuerdo a la información obtenida, en India existen alrededor de 6 millones de personas expuestas, de las cuales más de 2 millones son niños. En Estados Unidos más de 350 000 personas beben agua cuyo contenido es mayor que 0,5 mg/L de arsénico, y más de 2,5 millones de personas están siendo abastecidas con agua con tenores de arsénico mayores a 0,025 mg/L.

El problema del arsénico en el agua de bebida se viene tratando en Argentina desde hace varios años cuando epidemiólogos de Córdoba y otras provincias de ese país evidenciaron y asociaron la enfermedad del HACRE (daños a la piel) con la presencia del arsénico en el agua de bebida. Los esfuerzos y estudios ejecutados para minimizarlo o eliminarlo, han logrado un gran avance a nivel del tratamiento de agua a escala urbana en Argentina, Chile y Perú pero, a nivel rural, la solución en estos países sigue pendiente. De ahí que las autoridades de salud argentinas promuevan con decisión estudios que conlleven a una propuesta para la solución o minimización del problema señalado.

## Efectos del arsénico en el hombre

Se conoce que las principales rutas de exposición de las personas al arsénico son la ingesta e inhalación, que es acumulable en el organismo por exposición crónica y a ciertas concentraciones ocasiona afecciones como: alteraciones de la piel (relajamiento de los capilares cutáneos y la dilatación de los mismos) con efectos secundarios en los sistemas nervioso, irritación de los órganos del aparato respiratorio, gastrointestinal, y hematopoyético y acumulación en los huesos, músculos y piel, y en menor grado en hígado y riñones. Existe evidencia epidemiológica que personas con ingestión prolongada de arsénico inorgánico, vía agua de bebida, es la hiperqueratosis palmo-plantar cuya manifestación principal es la pigmentación de la piel y callosidades localizadas en las palmas de las manos y pies. La presencia de arsénico en agua, su grado de contaminación y la incidencia de enfermedades de piel en Argentina y México se describen en diferentes estudios.

Resultados con animales de laboratorio indican que el arsénico inorgánico trivalente es más tóxico que el pentavalente debido a que los compuestos pentavalentes tienen menor efecto en actividades enzimáticas, pero in vivo éstos pueden ser reducidos a compuestos trivalentes. La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, estructura química y solubilidad en el medio biológico. La escala de toxicidad del arsénico decrece en el siguiente orden: arsina >  $As^{+3}$  inorgánico >  $As^{+3}$  orgánico >  $As^{+5}$  inorgánico >  $As^{+5}$  orgánico > compuestos arsenicales y arsénico elemental. La toxicidad del  $As^{+3}$  es 10 veces mayor que la del  $As^{+5}$  y la dosis letal para adultos es de 1-4 mg As/Kg.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América, USEPA, clasifica al arsénico como cancerígeno en el grupo A debido a la evidencia de sus efectos adversos sobre la salud. La exposición a 0,05 mg/L puede causar 31,33 casos de cáncer de la piel por cada 1 000 habitantes y ha considerado bajar el límite máximo de aceptación de 0,050 mg/L, al de 0,010 - 0,020 mg/L. El Centro Internacional de Investigaciones sobre cáncer lo ha clasificado en el grupo I porque tienen pruebas suficientes de la carcinogenicidad para seres humanos. La eliminación natural del organismo humano es por vía urinaria, heces, sudor y epitelio de la piel (descamación).

Algunos estudios de toxicidad del arsénico indican que muchas de las normas actuales basadas en las guías de la OMS son muy altas, y plantean la necesidad de reevaluar los valores límites basándose en estudios epidemiológicos; por ejemplo, en Taiwan estiman que el límite se debe reducir de 0,02 hasta 0,0005 mg/L, en otros casos al parecer deberían aumentarse dichos valores, de acuerdo a las condiciones regionales. En América Latina ha podido apreciarse que a niveles similares de arsénico en diferentes condiciones (climatológicas, de nutrición y otros) el nivel de afectación es diferente.

Tabla 1. Valores guía para arsénico establecido por varias agencias reguladoras

País / Organización	Nivel de contaminación máximo (NCM), µg/L
Canadá	0,025
USA	0,050 *
Francia	0,050
República Federal de Alemania	0,040 **
Organización Mundial de la Salud (OMS)	0,050
Comunidad Económica Europea (CEE)	0,050
India	0,050
China	0,050
Taiwán	0,050

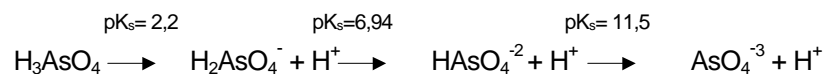
Nota: \* USEPA está considerando disminuir los valores a 0,002 - 0,020 mg/L  
 \*\* Este valor sería disminuido a 0,010 mg/L en 1996

### El arsénico en el agua natural

El arsénico es un elemento no metálico presente en la naturaleza formando un 0,00005% de la corteza terrestre, el cual se presenta en sus formas orgánica o inorgánica. Su principal vía de dispersión en el ambiente es el agua. Aun si se considera la sedimentación, la solubilidad de los arsenatos y arsenitos es suficiente para que este elemento se transporte en los sistemas acuáticos. La concentración del arsénico en aguas naturales frescas es muy variable y probablemente depende de las formas de arsénico en el suelo local.

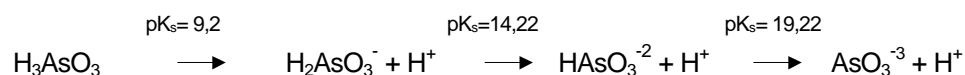
En los sistemas acuáticos el arsénico se puede presentar en cuatro estados de oxidación bajo condiciones normales siendo las más comunes sus estados trivalentes (arsenitos) y pentavalentes (arsenatos). En aguas naturales de pH 5 a 9 predominan las especies:  $H_2AsO_4^-$ ,  $HAsO_4^{2-}$ ,  $H_3AsO_3$ ,  $H_2AsO_3^-$ . Las condiciones que favorecen la oxidación química y biológica inducen el cambio a especies pentavalentes y, a la inversa, aquellas que favorecen la reducción cambiarán el equilibrio al estado trivalente. La estructura molecular de arsenatos  $As^{+5}$  y arsenitos  $As^{+3}$ .

Los arsenatos tienen mayor capacidad de ionización debido a la presencia del doble enlace, la molécula que al perder el ion hidrógeno por la disociación, queda con carga negativa formando varios aniones según las ecuaciones:



En aguas con altos niveles de oxígeno, el  $As^{+5}$  (como  $H_3AsO_4$ ) es estable, existiendo las especies antes mencionadas, en un rango de pH de entre 2 a 13, la distribución de estas especies se muestra en la Tabla 2.

Como resultado de la disociación del ácido arsenioso característico en aguas subterráneas con pH mayor de 7, se presentan las siguientes formas:



Bajo condiciones anóxicas, aún a pH mayor que 7 el arsénico es estable en especies dominantes no iónicas. Como se puede apreciar, los arsenatos y arsenitos se disocian a un pH muy diferente. En la figura anterior se aprecia que en un rango de pH entre 6,5 y 8,5 característico del agua natural, las formas predominantes de arsenato y arsenitos efectivamente son las siguientes especies:  $H_2AsO_4^-$ ,

HAsO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, y H<sub>2</sub>AsO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Tabla 2. Estabilidad y predominio de las especies de arsénico variando los rangos de pH en el medio acuático

PH	0 – 9	10 – 12	13	14
As <sup>+3</sup>	H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	AsO <sub>3</sub> <sup>-3</sup>
PH	0 - 2	3 – 6	7 - 11	12 – 14
As <sup>+5</sup>	H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	AsO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>

Además de la información de la disociación de los iones arsenito y arsenato a pH diferentes también es importante la información termodinámica del arsénico, que ayuda a entender su distribución (formas presentes) y movilidad en el agua subterránea, y su posterior tratamiento.

### Remoción de arsénico del agua

En general, el tratamiento de agua potable está orientado a remover color, turbiedad y microorganismos 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, es necesario recurrir a métodos más complejos, como los señalados en el cuadro:

Cuadro 1. Técnicas empleadas para la remoción de arsénico

1. Adsorción-coprecipitación usando sales de hierro y aluminio
2. Adsorción en alúmina activada / carbón activado / bauxita activada
3. Osmosis inversa
4. Intercambio iónico
5. Oxidación seguida de filtración

En las plantas de tratamiento de agua el As<sup>+5</sup> puede ser removido en forma efectiva por coagulación con sulfato de aluminio o hierro y por los procesos de ablandamiento con cal y soda. Los coagulantes señalados se hidrolizan formando hidróxidos, sobre los cuales el As<sup>+5</sup> se adsorbe y coprecipita con otros iones metálicos. De acuerdo con la literatura, aguas naturales con gran cantidad de coloides requieren de altas concentraciones de coagulantes para lograr eficiencias de remoción semejantes a las señaladas en la siguiente tabla:

Tabla 3. Eficiencia de coagulantes en la remoción de arsénico

COAGULANTE	ARSENATO, As <sup>+5</sup>		ARSENITO As <sup>+3</sup>	
	REMOCIÓN (%)	PH	REMOCIÓN (%)	PH
SULFATO FÉRRICO Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	100	< 9.0	20	< 9.0
SULFATO DE ALUMINA Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	90	< 7.0	50	< 7.0

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

Tabla 4. Remoción de arsénico por coagulación

Especies Arsenicales	Método de tratamiento	Dosaje del coagulante (mg/L)	Concentración inicial (mg/L)	Remoción (%)	pH
As <sup>+5</sup>	FeCl <sub>3</sub>	5	0,050	100	7,0
As <sup>+3</sup>	FeCl <sub>3</sub>	6	0,005	72	8,0
As <sup>+3</sup>	FeCl <sub>3</sub>	18	0,005	84	8,0
*	Aereación, coagulación con alúmina, sedimentar 6 días y filtración	7	0,8	70	7,4
*	Aereación, coagulación con FeCl <sub>3</sub> , sedimentar 10 días y filtración	18.5	0,69	60	7,4
*	Aereación, coagulación con alúmina, sedimentar 12 días y filtración	21	0,70	46	7,4
*	Cloro (20 mg/L), oxidación, aereación, coagulación con FeCl <sub>3</sub> , sedimentar 20 días y filtración	51	0,83	100	7
*	FeCl <sub>3</sub>	30	1	92	6,8
As <sup>+5</sup>	Cloruro férrico	20	0,045	96	7,5
As <sup>+5</sup>		40	0,045	95	7,5
As <sup>+5</sup>	Cloruro férrico	40	0,043	97	8
As <sup>+5</sup>	Sulfato de Aluminio	60	0,043	97	8
As <sup>+5</sup>	Coagulación con sulfato de aluminio	30	< 1 – 2	≥ 90	6,4 – 7,5
As <sup>+5</sup>	Coagulación con sulfato férrico	30	< 1 / 2	> 90	6,4 – 7,5
As <sup>+3</sup> , As <sup>+5</sup> y arseniato de metano	Cloruro férrico	*	30 – 40	90 - 95	5,5
As <sup>+5</sup>	Alúmina	> 5	0,2	97,5	7,0
As <sup>+5</sup>	Sulfato férrico	5	0,2	97,5	7,0
As <sup>+5</sup>	Óxido de manganeso hidratado	20	0,2	76	7,0
As <sup>+3</sup>	Cloruro férrico	200	31	86	10,0
As <sup>+3</sup>	Cloruro férrico	500	31	92	10,0
As <sup>+3</sup>	Cloruro férrico	1000	31	93	10,0
As <sup>+5</sup>	Adición de hierro electroquímico, oxidación con peróxido de hidrógeno, sedimentación y filtración	*	56	99,8	6,5

As <sup>+3</sup>	Coagulación con sulfato férrico	10	0,2	62	7,5
As <sup>+3</sup>	Coagulación con sulfato férrico	10	0,2	75	7,5
As <sup>+3</sup>	FeCl <sub>3</sub>	10	0,2	76	7,5
As <sup>+3</sup>	Coagulación con sulfato cúprico	10	0,2	88	7,5
As <sup>+3</sup>	Coagulación con cloruro cuproso	10	0,2	85	7,5
As <sup>+3</sup>	Coagulación con cloruro de zinc	10	0,2	84	7,5
As <sup>+3</sup>	FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	300	100	78	8,0
As <sup>+3</sup>	Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	625	100	82	8,0
As <sup>+3</sup>	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	300	100	85	8,0
As <sup>+3</sup>	Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .18H <sub>2</sub> O	300	100	73	8,0
*	KmnO <sub>4</sub> (13.8 mg/L), oxidación, coagulación con sulfato férrico y filtración	28	0,7	86	7,4

Nota: \* Información o dato no proporcionado por los autores. Ref. Viraraghavan, 1996)

Cuando la concentración de arsénico en el agua cruda es superior a 1,0 mg/L, la remoción de arsénico disminuye a medida que aumenta la concentración inicial, particularmente, si se usa sulfato de aluminio. La coagulación con sulfato de aluminio o cloruro férrico no remueve en forma tan eficiente el As<sup>+3</sup> como en el caso del As<sup>+5</sup>, El primero requiere de oxidación preliminar para ser removido por coagulación convencional y/o ablandamiento con cal y/o soda.

Con la precloración se obtiene una remoción del As<sup>+3</sup> similar a aquella alcanzada para el As<sup>+5</sup> con el mismo tratamiento, esto se debe a que las constantes de disociación del As<sup>+5</sup> son menores que las del As<sup>+3</sup> y por lo tanto su disociación es mayor. A esto se debe la mayor eficiencia de remoción de As<sup>+5</sup> comparada con la de As<sup>+3</sup> y justifica la oxidación del agua subterránea antes del tratamiento. La oxidación del As<sup>+3</sup> a As<sup>+5</sup> se produce según las siguientes reacciones



Después de la oxidación, el As<sup>+5</sup> se debe adsorber en los flocs formados por la coagulación de los coloides presentes en la masa de agua por acción del hidróxido de aluminio o del hierro. Probablemente la adsorción se produzca mas por un efecto físico que químico, debido a las fuerzas de atracción superficiales que posibilitan el fenómeno.

Probablemente los mecanismos que rigen la remoción del arsénico (solute) por las arcillas y/o hidróxidos metálicos (sorbentes) dependan de interacciones moleculares del sistema arsénico/agua/hidróxido-arcilla, donde se establecen enlaces que permiten que las superficies activas complejen al arsénico presente en el agua, por reacciones químicas intermoleculares entre el arsénico y la superficie activa, y entre el arsénico y el agua. Para favorecer la adsorción se debe asegurar el mayor contacto posible entre las dos fases, por ello resulta de fundamental importancia las reacciones entre el arsénico y la superficie, mediante enlaces coordinados formados por hidrólisis, complejación superficial, intercambio de ligantes y enlace de hidrógeno. Este último débil comparado con otras interacciones químicas, pero de importancia en la adsorción de moléculas en los hidróxidos polarizados.

También son de importancia las interacciones eléctricas en la superficie (electrostática y de polarización) y las interacciones del arsénico con el agua (dependientes del pH y pE del medio).

En las superficies, la energía libre de adsorción puede estar representada por:

$$\Delta G_{\text{ads}} = \Delta G_{\text{quím}} + \Delta G_{\text{elect}} + \Delta G_{\text{solv}} \quad \text{donde:}$$

$\Delta G_{\text{quím}}$  = Energía asociada a las reacciones químicas hidróxido/arcilla-arsénico-agua, función de las interacciones químicas entre el agua y el arsénico; el agua y la arcilla y/o hidróxido; y la arcilla y/o hidróxido y el arsénico.

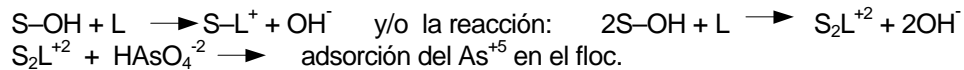
$\Delta G_{\text{elect}}$  = Energía requerida para el transporte del arsénico a la superficie activa, función de las interacciones electrostáticas.

$\Delta G_{\text{solv}}$  = Energía de solvatación o de hidratación, función exponencial de la carga iónica. Los arsenatos se hidratan mucho menos que los cationes, por lo que el cambio de pH del agua afecta en forma significativa a la adsorción de los arsenatos, porque las formas que adquieren los aniones en el agua, tienen energías de solvatación diferentes  $\Delta G_{\text{solv}}$ .

Probable mecanismo de remoción por adsorción a través de la superficie del complejo arcilla-hidróxido

a) En un sistema acuoso, la superficie del floc arcillas-hidróxidos puede presentar grupos hidroxílicos, S-OH, producto de la coordinación de los iones metálicos con el agua. Estos grupos pueden ganar protones del agua, confiriendo a la superficie carga positiva, o perder protones, dando como resultado superficies con carga negativa. Los iones que determinan el potencial de la superficie de los óxidos hidratados no polarizables son el ion hidrónio,  $\text{H}_3\text{O}^+$  y el ion hidróxido  $\text{OH}^-$ .

En la superficie de floc se puede presentar cambios en su grupo estructural  $\text{OH}^-$ , por la reacción con los arsenatos o ligantes disueltos, exhibiendo propiedades de ácido fuerte (ácido de Lewis). El intercambio de ligantes puede involucrar cambios en la superficie de los flocs de arcilla-hidróxidos de hierro o aluminio,  $\text{OH}^-$ , como en las reacciones:



La adsorción de los arsenatos en el sistema arcilla-hidróxido, va a depender de la densidad de grupos  $\text{OH}^-$  y su selectividad con respecto a otros aniones del agua. Otra forma posible de remoción del arsénico del agua es la adsorción de los arsenatos del mismo conjunto o a través de iones de otros elementos disueltos que producen complejos superficiales ternarios como:



donde el catión metálico adsorbido no coordina completamente los ligantes superficiales y se completa con otros ligantes (IL) disueltos en el agua. En este caso el catión funciona como "puente" entre la superficie y el ligante S-OM-L, el cual produciría la adsorción del arsenato al ligante



donde el ligante L, es directamente adsorbido al centro de coordinación S, y el catión completa la coordinación superficial. Este tipo de complejos se forma con ligantes L polidentados que forman un "puente" entre la superficie y el catión S-L-M y sobre este se adsorbería el arsenato por acción electrostática

La carga superficial resultante y el pH son factores determinantes en la adsorción posterior y en las interacciones arcilla-hidróxido/arsenatos respectivamente. Debido a las transformaciones químicas superficiales en los sorbentes, ésta puede cambiar sus propiedades y su capacidad de remoción del arsénico en los medios seleccionados.

b) Lo que habría que evaluar es la reacción quimisorción entre la arcilla con carga negativa y la superficie arcilla-hidróxido con grupos funcionales OH, porque podría competir con la reacción de adsorción de los arsenatos. En estas evaluaciones debe considerarse que las arcillas activadas son buenos intercambiadores de iones, se comportan como un ácido sólido y presentan un volumen de poro medio de 600 °A.

También habría que evaluar las reacciones de quimisorción producidas entre las arcillas y los grupos OH de los hidróxidos.

Los precipitados de hierro  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y aluminio  $\text{Al}(\text{OH})_3$  son los productos finales de la hidrólisis de los coagulantes  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , y  $\text{FeCl}_3$  disueltos en el agua y se forman en mayor cantidad relativa a un pH de 6,5 a 7,00 para el aluminio y un pH de 7,5 a 8,0 para el hierro.

El precipitado de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  es casi insoluble a pH de 3,0 a 13,0 y, en condiciones alcalinas precipita según la siguiente reacción  $\text{Fe}^{+3} + 3\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_3$ . El floc de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  a pH < 6.5 tiene una carga superficial positiva y a pH > 8.0 una carga superficial negativa. En el rango de pH entre 6,5 y 8,0 la carga superficial es mixta. La menor solubilidad del  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  es a pH = 8,0. Las especies solubles de hierro a pH < 6,0 son  $\text{Fe}^{+3}$  con mayor concentración a pH < 3,0 y predominio de  $\text{FeOH}^{+2}$  a pH < 4,0 y  $\text{Fe}(\text{OH})_2^-$ , con una mayor concentración un pH entre 5 y 7. A un pH > 10.0 las especies solubles predominantes son el  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ .

A un pH < 6,0 las especies predominantes son el  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{FeOH}^{+2}$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$  los cuales favorecen la adsorción de los iones arsenato, pero en este mismo rango la capacidad de adsorción de los arsenatos por el hidróxido férrico está limitada por la carga superficial negativa del mismo. Esto puede explicar por qué se obtienen mejores remociones de arsénico con el cloruro férrico en un rango de pH entre 7 y 7,5 en donde la remoción de arsénico se efectuará por adsorción y coprecipitación tanto de las especies catiónicas como de los precipitados del hidróxido  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  con los que en forma conjunta el arsénico coprecipita y sedimenta rápidamente.

El precipitado de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  que en realidad es  $\text{AlO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  tiene carga superficial positiva a pH < 7,6 y negativa a pH > 8,2. En el rango de pH entre 7,6 y 8,2 la carga superficial es mixta. A pH = 4,0 predominan las especies de  $\text{Al}^{+3}$ , mientras que a un pH = 9,0 predominan las especies aniónicas  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ .

En todos los casos de remoción de arsénico por coagulación y adsorción se debe producir con mayor eficiencia a un pH < 7,0, donde se presentan las especies catiónicas de hierro y aluminio más efectivas, y la competencia del grupo hidroxilo es reducida.

## OBJETIVO

El presente estudio tuvo como objetivo el desarrollo de una metodología simple y de bajo costo que permita remover, a nivel domiciliario, el arsénico natural presente en las aguas subterráneas que son usadas para bebida en poblaciones rurales y desprotegidas. La aplicación del método afronta en forma simultánea el problema del arsénico y la calidad bacteriológica del agua de bebida.

## METODOLOGÍA

El estudio estuvo orientado a desarrollar una metodología de remoción de arsénico en agua de bebida a nivel casero, evaluar su eficiencia y aplicabilidad en el campo y costos del mismo. Para ello, luego de una búsqueda bibliográfica sobre los posibles métodos de remoción de arsénico en aguas subterráneas, se propuso un esquema de tratamiento acorde a las características del agua a tratar, consistente en el uso de: un oxidante, arcillas y coagulantes. Con cada uno de estos productos se efectuaron pruebas en forma independiente para comparar la efectividad de cada uno de ellos con el método propuesto (combinación óptima de los productos seleccionados), uso de los productos



resultantes (ALUFLOC y FERRIFLOC), su estabilidad con el tiempo, su aplicación práctica y el costo de su producción.

Durante las pruebas se trató de crear condiciones apropiadas para que se produzca una buena coagulación de los coloides y una buena adsorción del arsénico en éstos y en los flocs formados. Como el agua subterránea y por ende el agua preparada a tratar no tiene turbiedad, se le adicionó coloides (bentonita natural y arcillas activadas). Con el fin de identificar los mecanismos generales de la remoción del  $As^{+3}$  y  $As^{+5}$  se hicieron pruebas donde las sales de hierro y aluminio se hidrolizan en presencia de arsenato y producen la coprecipitación con los compuestos formados en la hidrólisis y/o sorción sobre los precipitados.

El conocimiento de la complejación de los aniones y los mecanismos que rigen los procesos permiten identificar los factores que favorecen la remoción del arsénico. Esto, más la propuesta de trabajo, permitió la selección de los materiales para las combinaciones de coagulantes y sorbentes a probar, cuya evaluación y control permitió encontrar una mezcla y condiciones óptimas para la remoción del arsénico. El estudio se realizó de acuerdo a la siguiente secuencia:

#### A. Consideraciones generales en la ejecución del estudio

##### 1. Evaluación bibliográfica de las características del agua a tratar.

Se hizo una búsqueda bibliográfica de las características fisico-químicas del agua a tratar en las regiones de Salta, Tucumán y Córdoba y se determinó que eran aguas con poca o escasa turbiedad, alcalinidad entre 120-180 mg/L  $CaCO_3$  y pH de 7,0 a 8,5, dureza total de 200-400 mg/L  $CaCO_3$ , con niveles variables de arsénico, siendo los valores más comunes en el agua de bebida 0,3-0,4 pero que con frecuencia alcanzan valores alrededor de 1mg/L. Ref. (Nicolli s/f).

##### 2. Simulación artificial de la calidad del agua a tratar

En el laboratorio se preparó agua con características fisicoquímicas similares al promedio de las aguas que se querían tratar. Con respecto a los valores de arsénico se le adicionó óxido de arsénico de calidad analítica en concentraciones de 0,3; 0,8; 2,2 mg/L, en algunos casos se usaron aguas con valores intermedios como con 1,4 mg/L de arsénico. Las características fisicoquímicas fueron acondicionadas para que tuviesen similitud con las del agua a tratar y antes de la ejecución del estudio se estableció sus características.

##### 3. Selección de los productos

#### Oxidante

En la introducción se indicó la conveniencia de la oxidación del  $As^{+3}$ , que predomina en las aguas subterráneas antes del tratamiento con coagulación. Debido a que los arsenitos se oxidan fácilmente a arsenatos con cloro, se seleccionó el hipoclorito de calcio al 70% de cloro activo como material oxidante. La oxidación debe producirse en forma inmediata en el rango de pH entre 6,0 y 10,0, cuando se aplica cloro en exceso (1mg/L de cloro residual libre), porque en estas condiciones el potencial eléctrico de la oxidación de arsenitos a arsenatos está en el rango de -0,01 a +0,01 volts, mientras que el potencial de las reacciones de óxido reducción del  $OCl^-$  y  $Cl_2$  es más alto (de 0,9 a 1,36).

### Arcillas naturales y activadas

Las arcillas usadas fueron arcillas naturales (bentonitas) y arcillas activadas. La ventaja de estas últimas son la homogeneidad de sus características fisicoquímicas, porosidad y de superficie, por el tratamiento de activación al cual han sido sometidas. Si se considera que el factor más importante que gobierna la remoción del Arsénico es la adsorción, el área superficial específica o área de contacto soluto-sorbente es de suma importancia, por ello la selección de las arcillas activadas se constituyen en un producto de calidad controlada por los fabricantes en base a la montmorillonita que tendrá una superficie con gran capacidad de adsorción S-H, con alta capacidad de intercambio iónico ( $350\text{m}^2/\text{g}$ ).

Las propiedades y la granulometría de las arcillas fueron determinadas según procedimientos de la American Society for Testing and Materials: ASTM C 188 para densidad y C 136 para granulometría, ambos aprobados por la AWWA Standards for Filtering Material.

La arcilla se convierte en un ácido mineral sólido, con gran cantidad de centros ácidos, grupos silanos y sílice amorfos unidos a la montmorillonita. El área es de entre  $120$  y  $300\text{m}^2/\text{g}$  que es mucho mayor a las de las arcillas naturales que tienen  $80\text{m}^2/\text{g}$ .

### Coagulantes

Los coagulantes seleccionados para las pruebas fueron el sulfato de aluminio y el cloruro férrico (de mayor disponibilidad en el medio) debido a que es conocido que los arsenatos se precipitan o se adsorben sobre los hidróxidos de hierro y aluminio mediante reacciones superficiales específicas. Según la literatura, la mejor adsorción del  $\text{As}^{+5}$  sobre los precipitados de hierro,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y alúmina  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , tienen lugar entre un pH de 4 a 7, cuando la superficie del hidróxido tiene carga positiva y el arsénico está en forma aniónica, promoviendo las interacciones electrostáticas entre el  $\text{As}^{+5}$  y el precipitado. Se consideró que el método de mayor eficiencia para la remoción de arsénico en aguas subterráneas ( $\text{As}^{+3}$ ) es el de coagulación controlada en la zona en la cual se produce la oxidación y condiciones de pH-pE apropiadas para el proceso. Los coagulantes usados fueron de grado técnico que cumplen con las especificaciones para ser usados en las plantas de tratamiento de agua potable.

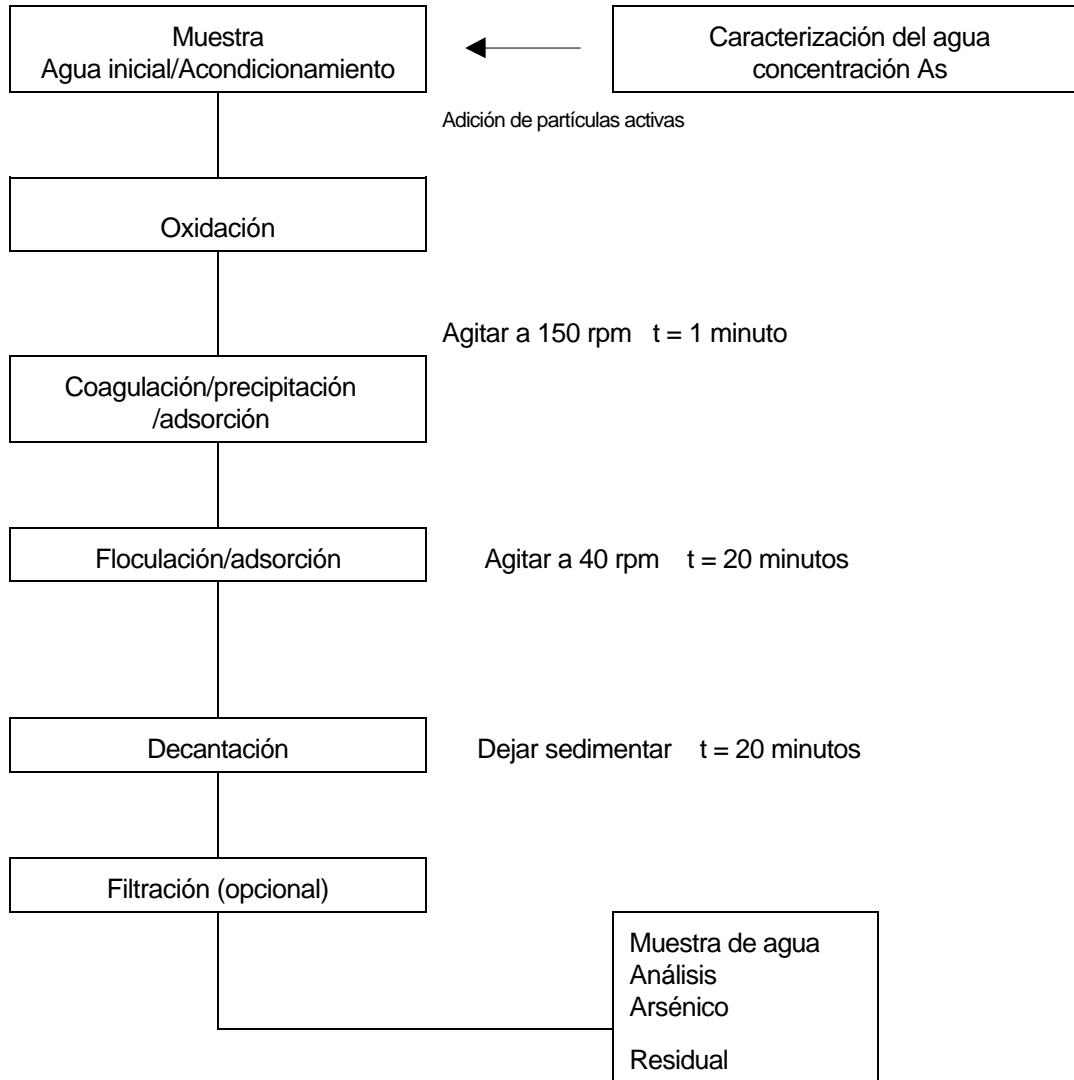
#### 4. Ensayos estándar y parámetros evaluados

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

Se controló el pH de la solución como un indicador de las interacciones entre el soluto y el sorbente. Por otra parte, el balance de masa se realizó con respecto a algunos de los parámetros medidos, su cambio a través de pruebas efectuadas y el tiempo.

La secuencia seguida en los ensayos fue la siguiente:

### PRUEBAS DE LABORATORIO



- Los ensayos de coagulación-floculación en el laboratorio se hicieron según procedimiento estándar ASTM, en las pruebas de jarras en las condiciones señaladas en el diagrama anterior.
- Reactores de cuatro litros y reactores de 20 litros.

Para estas pruebas se acondicionó reactores simples, eje horizontal, eje vertical y botellones que permitieron reproducir las condiciones de mezcla hidráulica.

#### 5. Métodos y control de la calidad analítica empleados en el laboratorio

Los análisis se realizaron de acuerdo a los métodos estándar de la AWWA 19 Edic. El análisis de arsénico se hizo por el método espectrofotométrico del di-etil-di-tio-carbamato de plata, que consiste en la reducción de arsénico inorgánico a arsina,  $AsH_3$ , utilizando cinc en solución ácida como reductor. La arsina es absorbida por una solución de dietil-di-tio-carbamato de plata en piridina. La sal de plata reacciona con la arsina, y produce un complejo rojo con absorción máxima a 540 nm. La concentración detectable mínima de As con este método es de 0.001 mg de As.

Se midió el aluminio por espectrofotometría de absorción atómica con llama de óxido nitroso.

El cloro residual se midió con el método titulométrico del DPD, con sulfato ferroso amoniacal como titulante.

Todos los análisis del laboratorio estuvieron sometidos al programa de control de la calidad analítica con muestras internas y referenciales de la EPA, los resultados mostraron valores que permitieron conocer que la calidad de la información analítica estuvo bajo control.

## **B. Pruebas de remoción del Arsénico en el agua**

### **Pruebas de remisión de arsénico en el laboratorio**

1. Evaluación individual de la capacidad de remoción de cada componente del tratamiento propuesto.
  - a. Dosificación de cada uno de los componentes en forma independiente y proceso de acuerdo a ensayo estándar, para evaluar su comportamiento y servir de comparación en la evaluación de la eficiencia de remoción de las combinaciones usadas en el tratamiento del agua con varias concentraciones de arsénico a remover.
  - b. Dosificación de arcillas y coagulantes sin oxidación del agua a tratar.
2. Evaluación de las combinaciones y selección de la combinación óptima
  - a. Dosificación en condiciones controladas empleando el equipo de prueba de jarras a diferentes concentraciones de coloides (arcillas), oxidante (cloro) y coagulantes (sulfato de aluminio y cloruro férrico), con la finalidad de encontrar la combinación óptima de estos compuestos para lograr la mejor remoción de arsénico.
  - b. Pruebas de la mezcla (sólido) de las combinaciones óptimas.

Se emplearon tres vasos de un litro de agua con la mezcla 1 y tres vasos con la mezcla 2 que representa las condiciones óptimas de remoción de arsénico con los coagulantes  $Al_2(SO_4)_3$  y  $FeCl_3$  en las condiciones hidráulicas señaladas en el cuadro de resultados. De acuerdo a la literatura, la oxidación del arsénico podría ser interferida por el hierro, pero de acuerdo a la información de la calidad del agua a tratar, la presencia de este elemento no es significativa.
  - c. Para mostrar la necesidad de la oxidación preliminar en el presente estudio se evaluó el efecto del estado de oxidación del arsénico en la remoción mediante pruebas de tratamiento del agua (con arsenito) con y sin adición de cloro.
  - d. Con las combinaciones más eficientes de remoción se realizaron pruebas con muestras de agua con diferentes concentraciones de arsénico, empleando un reactor de cuatro litros con eje de giro horizontal. Las condiciones hidráulicas se indican en el cuadro de resultados.
  - e. Posteriormente se probó las mejores combinaciones con reactores de 18 a 20 litros (botellones y baldes). Las condiciones hidráulicas se indican en el cuadro de resultados.
3. Selección de la arcilla más apropiada y reproducibilidad de las pruebas
  - a. Se dosificó seis tipos de arcillas activadas (Fultmont Premiere, Super A, A.A, B.B, X.X) y naturales (bentonitas), seleccionando la mejor para tratar aguas con 0.8 mg/l de arsénico.
  - b. Luego se realizaron un número de pruebas de remoción empleando reactores de 20 litros con las mejores mezclas ALUFLOC y FERRIFLOC, para estimar la reproducibilidad de los resultados para el tratamiento del agua en concentraciones de As de 0,4 y 0,8 mg/L. Luego se procedió a realizar las pruebas estadísticas para estimar la reproducibilidad de resultados.
4. Verificación de la efectividad de las mezclas con el tiempo de almacenaje

Se prepararon sachets con las mezclas que contienen un tipo específico de arcilla (activada), sulfato de aluminio y cloro para tratar 20 litros de agua con una concentración de arsénico de 0,55 mg/l. A un lote

de sachets se le controló el cloro residual y aluminio durante 15 días. Paralelamente a estas mediciones se hicieron pruebas de jarras con las mismas mezclas para comprobar si se mantenía su eficiencia de remoción de arsénico (15 días).

Después de los resultados obtenidos y al ver la pérdida de la capacidad del producto para abatir el arsénico, se prepararon sachets con doble compartimento, uno con arcilla y el otro con la mezcla de sulfato de aluminio y cloro. El contenido de los dos compartimentos se mezclaron en el momento de ejecutar las pruebas, se controló el cloro en el producto durante una semana. Paralelamente con estas mezclas se realizaron pruebas baldes provistos de una paleta de agitación. Se evaluó la remoción de arsénico con respecto al tiempo (durante 15 días).

#### Control de la estabilidad del producto

- a. Control del cloro en la mezcla (sachet) con los dos diferentes tipos de coagulantes y con el tiempo

Se envasaron sachets con la mezcla de arcilla/sulfato de aluminio/cloro (500/60/5).

Para el control del cloro se disolvió el contenido del sachet en un litro de agua destilada, luego se hicieron otras diluciones necesarias para lograr los niveles que permitan su medición con el método de DPD.

- b. Control del aluminio en la mezcla

Se tomaron muestras de las soluciones anteriores, para medir su contenido de aluminio.

- c. Pruebas de efectividad de la coagulación

Para estas pruebas se emplearon sachets con las mezclas de arcilla/sulfato de aluminio/cloro, de las cuales se pesó 0,57 g. para tratar un litro de agua. Se trató un agua con 0,8 mg/L de arsénico con las siguientes condiciones de trabajo, las cuales se indican en el cuadro de resultados.

Las pruebas para la evaluación de la estabilidad del producto preparado en base a la mejor combinación de los productos, se realizaron al inicio de la preparación de la mezcla y luego de 7 y 15 días.

- d. Control del cloro residual en la mezcla de sulfato de aluminio/cloro

Se envasaron bolsitas tipo sachet con la mezcla de sulfato de aluminio + cloro, se hicieron controles de cloro residual durante una semana y una a los 15 días.

- e. Pruebas en baldes de 20 litros y agitación manual con paleta

Para esta prueba se uso agua con un contenido de 0,55 mg/L de arsénico.

El contenido de los sachets de compartimento doble se mezcló al inicio de las pruebas disolviéndolo en un vaso con agua. Este contenido se agregó mientras se agitaba con la paleta. Estas pruebas se ejecutaron durante una semana.

#### Pruebas de remoción de arsénico en el campo

Se efectuaron pruebas de campo en Salta y Tucumán, usando directamente las dos mezclas seleccionadas y los equipos: a) reactor de rotación horizontal, b) balde con paleta en eje de rotación vertical, c) botella de 20 litros de plástico transparente y paleta simple.

#### **C. Evaluación económica**

- Costo del estudio

- Costo del producto

## RESULTADOS

A) Características iniciales del agua a tratar:

PH	7,8	Turbiedad	0,4 UN	Sólidos dis.	745 mg/l
+°C	22°C	Dureza total	398 mg/l	Eh	180 mV
Alcalinidad	151 mg/l	Sólidos tot.	752 mg/l		

B) Pruebas de remoción del arsénico en el agua

### Pruebas de remoción de arsénico en el laboratorio

1.1 Evaluación de los productos en forma individual usando agua con 2,2 mg/L de As<sup>+3</sup>

Con dosis de arcillas de 0, 100, 200, 500, 1000 y 2000 mg/L sólo se logró remover 9,1%.

Con dosis de sulfato de aluminio de 0, 40,70,100 y 200 mg/L sólo se logró remover 15,9%.

Con dosis de cloruro férrico de 0, 50, 75, 100, 200 y 300 mg/L; la dosis más alta logra remover 18%.

1.2 Empleando arcillas y coagulantes sulfato de aluminio y cloruro férrico se obtuvo las remociones indicadas a continuación:

Tratamiento de agua con 2.2 mg/l de As					
Arcilla activada/Sulfato de Aluminio Dosis (mg/L)			Arcilla activada/Cloruro Férrico Dosis (mg/L)		
250/20-70	500/40-90	1000/30-80	250/10-60	500/20-70	1000/30-80
% Remoción	% Remoción	% Remoción	% Remoción	% Remoción	% Remoción
38,18	29,54	18,20	19,09	46,80	60,45
32,04	30,45	38,18	42,73	52,27	75,90
28,64	32,27	32,00	50,00	55,90	79,09
37,27	18,64	42,70	56,82	62,27	67,27
30,90	32,27	45,45	55,00	63,18	74,09
29,54	27,27	30,90	63,18	56,36	73,18

2. Evaluación de las combinaciones y selección de la combinación óptima

- a. Con respecto a la efectividad de las combinaciones de arcilla, coagulante y cloro; los resultados obtenidos fueron.

Tratamiento de agua con 2.2 mg/L de As					
Arcilla/Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> mg/L*	Arsénico mg/l	% Remoción	Arcilla/FeCl <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> mg/L	Arsénico mg/l	% Remoción
500/30/5	0,99	55	1000/30/5	0,75	65,0
500/40/5	0,75	65,0	1000/40/5	0,53	76,0
500/50/5	0,56	74,0	1000/50/5	0,20	90,0
500/60/5	0,55	75,0	1000/60/5	0,19	91,0
500/70/5	0,70	68,0	1000/70/5	0,19	91,0
500/80/5	0,68	69,0	1000/80/5	0,18	92,0

\*Dosis aplicada al agua para su tratamiento

- b. Pruebas de la mezcla en sólido de las combinaciones óptimas.

Tratamiento de agua con 2 mg/L de As					
Mezcla 1	Arsénico mg/l	% remoción	Mezcla 2	Arsénico mg/l	% remoción
Arcilla/Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> (500/50/5)	0,545	70	Arcilla/FeCl <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> (1000/60/5)	0,05	98

Condiciones de trabajo:

Mezcla rápida: 1 min; mezcla lenta: 15 min; sedimentación: 10 y 15 minutos para cada una de las mezclas 1 y 2.

- c. Resultados de pruebas con reactor de cuatro litros con eje de giro horizontal

Tratamiento de agua con 2.2 mg/L de As *					
Arcilla/Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> mg/L	Arsénico mg/L	% remoción	Arcilla/FeCl <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> mg/L	Arsénico mg/L	% remoción
500/50/5	0,49	75	1000/70/5	0,05	97
500/60/5	0,48	76	1000/80/5	0,05	97

\*Resumen de los resultados

- d. Equipo mezclador de eje vertical (reactores de 18 a 20 litros)

Tratamiento de agua con 1.1 mg/L de As *					
Arcilla/Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> mg/L	Arsénico mg/L	% remoción	Mezcla mg/L arcilla/FeCl <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub>	Arsénico mg/L	% remoción
1000/50/5	0,16	85	1000/70/5	0,16	85
1000/60/5	0,21	80	1000/80/5	0,24	78

\*Resumen de los resultados

Tratamiento de agua con 0.32 mg/L de As *					
Mezcla mg/L Arcilla/Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub>	Arsénico Mg/L	% remoción	Mezcla mg/L arcilla/FeCl <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub>	Arsénico Mg/L	% remoción
1000/50/5	0,03	90	1000/70/5	0,07	78
1000/60/5	0,028	91	1000/80/5	0,029	90

\*Resumen de los resultados

Mezcla		Tratamiento de agua con 1.4 mg/L As		Tratamiento de agua con 2 mg/L As	
		Arsénico mg/L	% remoción	Arsénico mg/L	% remoción
1	Arcilla/Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> 500/50/5	0,30	78,6	0,55	73
2	Arcilla/FeCl <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> 1000/60/5	0,26	81,4	0,03	98

Las características del agua después del tratamiento fueron

	Tratamiento con Sulfato de Aluminio Arcilla/Cloro: 500/5		Tratamiento con Cloruro férrico Arcilla/Cloro: 1000/5	
	50	60	70	80
Dosis de coagulante				
Temperatura	21°	21	21	21
PH después de dosificar	7,49	7,33	7,66	7,15
Alcalinidad	134	130	112	108
Dureza total	389	387	379	379
Turbiedad UN	6	11	11	12
Sólidos totales	766	780	740	658
Sólidos disueltos	740	698	0,05	0,05
Arsénico	0,49	0,48	97	97
Remoción %	75	76	75	75

### 3. Selección de las arcillas más apropiadas y reproducibilidad del tratamiento

#### a. Pruebas de repetibilidad de las mejores mezclas (1 y 2)

Tratamiento de agua con agua con 0.8 mg/l As					
Coagulante *	Sulfato de aluminio mg/L (1)		Cloruro férrico mg/L (2)		% remoción
1	0,082	0,076	0,194	0,192	76,05 76,30
2	0,165.....	0,175	0,037.....	0,034	95,40..... 95,70
3	0,188.....	0,206	0,136.....	0,133	82,21..... 83,58
4	0,160.....	0,160	0,120.....	0,115	85,19..... 85,80
5	0,290.....	0,300	0,240.....	0,245	70,37..... 69,75
6	0,133.....	0,136	0,113.....	0,120	86,05.....85,19

\* Muestras por duplicado

#### b. Pruebas de reproducibilidad en reactores de 20 litros con las mejores mezclas (balde y eje



vertical)

Tratamiento de agua con 0.8 mg/L As usando como Coagulante:sulfato de aluminio						
Prueba	Balde con eje de agitación vertical (a)		Botella con paleta (b)		Reactor con manivela (c)	
	Mg/L As	% remoción	mg/L As	% remoción	mg/L As	% remoción
1	0,06	92,3	0,04	94,9	0,18	78,6
2	0,05	93,6	0,04	94,9	0,18	78,6
3	0,04	94,9	0,05	93,6	0,20	76,2
4	0,05	93,6	0,09	88,5	0,21	75,0
5	0,06	92,3	0,08	89,7	0,25	70,2

Tratamiento de agua con agua con 0.4 mg/l As						
Prueba	Balde con eje de agitación vertical (a)		Botella con paleta (b)		Reactor con manivela (c)	
	mg/l As	% remoción	mg/l As	% remoción	mg/l As	% remoción
1	0,03	96,5	0,05	94,0	0,05	94,0
2	0,04	95,0	0,04	95,2	0,04	95,2
3	0,03	96,5	0,04	95,2	0,05	94,0
4	0,04	95,0	0,05	94,0	0,04	95,2
5	0,03	96,3	0,04	95,2	0,05	94,0

#### 4. Evaluación de la estabilidad del producto

De acuerdo con los análisis de cloro envasado en sachets (arcilla/sulfato de aluminio/cloro) se observa que el cloro sufre una reducción significativa a través del tiempo ( $p \ll 0,01$ ).

Respecto al tipo de arcilla, las diferencias encontradas entre ellas no alcanzan significancia estadística ( $p > 0,10$ ).

En un 65% las variaciones del nivel de cloro residual pueden ser explicadas por la regresión lineal en función del tiempo y en un 35,5% se deben a otros factores presentes no considerados para el modelo.

El cloro tiene una velocidad promedio de deterioro de 0,19 mg/l diario, de manera que en una semana los niveles de cloro son muy bajos.

Cuando se emplearon sachets con la mezcla de sulfato de aluminio y cloro, separado de las arcillas, los resultados mostraron que el cloro no disminuye con respecto al tiempo de almacenaje antes de su uso (0, 1, 2, 4, 7, 15 días).

Las pruebas realizadas con sachets con compartimientos dobles en baldes (y agitación con paleta) son estables con respecto al tiempo (1 semana).

Las remociones de arsénico usando diferentes tipos de arcillas para tratar agua con 0,55 mg/l de As demuestran que hay diferencia significativa  $p \ll 0,1$  entre éstas para remover el As. El porcentaje de remoción de arsénico tiene variaciones no significativas respecto al tiempo ( $p = 0,85$ ) las cuales podrían explicarse por la aleatoriedad en el experimento. Esto indica que el porcentaje de remoción es estable con el tiempo.

Los resultados de esta parte se ponen en cuadros al final del informe.

## Pruebas de remoción de arsénico en el campo

### a. Provincia de Salta

En esta ciudad se realizaron pruebas de jarras, usando las mezclas óptimas de arcilla/oxidante y coagulantes y se obtuvo los siguientes resultados.

Tratamiento de agua con agua con 0,29 mg/l As				
	Arsénico residual mg/l		% remoción	
	Sin filtrar	Filtrada	Sin filtrar	Filtrada
Arcilla/Al(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> mg/l500/40/5	0,086	0,028	70	97
Arcilla/FeCl <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> mg/l1000/50/5	0,017	0,017	94	94

### a. Prueba con los reactores de 20 litros

#### Botella y paleta de agitación

Condiciones de tratamiento  
 Agitación rápida t = 1 minuto  
 Agitación lenta = 40 rpm 15 minutos  
 Tiempo de sedimentación 20 minutos

#### Balde con paleta de eje vertical

Condiciones de tratamiento  
 Balde de Agitación rápida t = 1 minuto  
 Agitación lenta t = 15 minutos  
 Tiempo de sedimentación 10 horas

Tratamiento de agua con agua con 0,3 mg/l As				
mg/l	Botella		Balde con paleta de eje vertical	
	Arsénico residual mg/l	% remoción	Arsénico residual	% remoción
Mezcla 1	0,14	54	0,08 mg/l	73
Mezcla 2	0,11	63	0,022 mg/l	93

### b. Provincia de Tucumán

Los mejores resultados se obtuvieron aquí, tanto para la mezcla 1 como para la mezcla 2 con el reactor señalado. Se logró obtener una remoción de un 70 a 75%. En los otros recipientes la remoción alcanzada de 60% en ese momento se explicó como una interferencia de las condiciones en que se realizaron las pruebas en cuya agitación participaron varias personas. Las pruebas que se desarrollaron después demostraron que este menor rendimiento se debió al efecto del tiempo en los productos usados.

C) EVALUACIÓN ECONÓMICA

a. Del Estudio

Tabla. Resumen de cálculos y estimaciones totales

	ET1 EFECTIVIDAD. DE MEZ. COAGULANTES		ET2 SELECCIÓN DE ARCILLA Y REPRODUC.		ET3. VERIF. DE EFECT. DE M. (TIEMP. ALMAC.)		TOTAL ESTIMADO	TARIF (\$)	COSTO (\$)
	CONSUMO	COSTO (\$)	CONSUMO	COSTO (\$)	CONSUMO	COSTO (\$)	CONSUMO		
PERSONAL		2087.69		559.12		1564.9			4211,7
1 Químico	321	1945.58	80	484.88	205	1242.51	606 horas	\$ 6061	3672.97
1 T. Laboratorio	67	142.11	35	74.24	152	322.39	254 horas	\$ 2121	538.73
DETERMINACIONES DE LABORATORIO		5280		1800		3470			10500
D. Arsénico	204	5100	72	1800	74	1850	350 deter.	25	8750
D. Aluminio					60	1200	60 deter.	20	1200
D. Cloro residual					140	420	140 deter.	3	420
D. sólidos disueltos	5	40					5 deter.	8	40
D. Alcalinidad	5	30					5 deter.	6	30
D. Dureza total	5	30					5 deter.	6	30
D. Eh	5	30					5 deter.	6	30
D. Sólidos totales	5	25					5 deter.	5	25
D. Turbiedad	5	10					5 deter.	2	10
D. Ph	5	10					5 deter.	2	10
D. +°C	5	5					5 deter.	1	5
OTROS		217.06		87.06		67.05			371.17
GASTOS PRE OPER. Y GENERALES									100
TOTAL		7584.75		2446.18		5101.95			15232.9

tiempo de mezcla rápida: 1 minuto; tiempo de mezcla lenta: 15 minutos; tiempo de sedimentación: 1 hora.

b. Del producto

Tabla. Costo Unitario del ALUFLOC

		Producción	1000 unidades
		1 unidad	1000 unidades
		\$	\$
<b>Costo de Producción</b>		<b>0.507</b>	<b>507.81</b>
<u>Costos Variables</u>		0.490	490.43
Materia prima	0.005	5.00	
Envases de plástico	0.00385	3.85	
Mano de obra	0.477	477.27	
Energía de equipos	0.00431	4.31	
<u>Costos Fijos</u>		0.017	17.38
Energía común (luz)	0.006	6.00	
Depreciación de equipos	0.01138	11.38	

Este costo a la fecha ha sido reducido a EUA\$0.22 por unidad debido a una producción de una cantidad semi -industrial, y se espera que el costo a nivel industrial bajará a por lo menos EUA\$0.15 por unidad.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A) Sobre la efectividad de las muestras coagulantes

Las alternativas de tratamiento propuestas en condiciones controladas de laboratorio logran remover niveles de arsénico hasta en 98%, siendo más efectivo el uso de cloruro férrico para tratar concentraciones mayores de 1 mg/l de arsénico y es mejor usar sulfato de aluminio para concentraciones de arsénico menores a la señalada.

En el campo es posible usar dosificación de la mezcla óptima en sólido pero se requiere uniformar las condiciones de aplicación. Se ha podido apreciar que con tiempos de sedimentación de 10 a 15 minutos se puede remover del 70 al 80% de arsénico pero con mayor tiempo de sedimentación o con filtración se puede remover más del 95% del arsénico presente.

Se debe probar la reproducibilidad de la eficiencia de remoción del arsénico en las aguas de bebida a nivel de la comunidad dispersa para lo cual hay que capacitar a quienes van a tratar el agua a nivel domiciliario. Se les debe recomendar que el tratamiento lo hagan durante la noche y temprano trasvasen el sobrenadante sin remover el sedimento.

Se tiene que estudiar a nivel de laboratorio las posibilidades de reemplazo de cada uno de los componentes de las mezclas a usarse. De preferencia deben ensayarse materiales locales o nacionales para evitar la dependencia de la importación y posibles interrupciones del abastecimiento de estos insumos.

Debe evaluarse el impacto de la medida a través del estudio de nivel de exposición de los habitantes favorecidos con las medidas de control por el agua de bebida tratada para justificar su aplicación a mayor escala y en otras ciudades que tienen el mismo problema.

Se recomienda seguir las diferentes etapas del estudio recomendadas en el anexo II.

B) Las mejores mezclas obtenidas son:

Mezcla 1: Coloide: arcilla activada Tonsil Premiere  
Coagulante: sulfato de aluminio  
Oxidante: cloro

Mezcla 2: Coloide: arcilla activada Tonsil Super A  
Coagulante: cloruro férrico  
Oxidante: cloro

Los mejores mezcladores o reactores para la remoción de arsénico fueron el balde de eje vertical y la botella de 20 litros (nivel de significancia de la diferencia con otros mezcladores  $< 0,0001$ ). Éstos además son más fáciles de manejar.

Con respecto al coagulante a usarse, para la remoción de arsénico se pueden elegir las dos mezclas probadas, pero se recomienda el sulfato de aluminio por su fácil manipulación en comparación al del cloruro férrico (delicuescente). La diferencia encontrada debido a la concentración de As en el agua y al coagulante no alcanza diferencia estadística significativa.

De las pruebas estadísticas para estimar la reproducibilidad (análisis de varianzas) de la remoción de arsénico tomando en cuenta el tipo de envase, concentración de arsénico en el agua y coagulante utilizado, se deduce que no hay diferencia significativa entre la concentración de arsénico residual en el agua y el coagulante utilizado; pero en cuanto al tipo de envase sí hay diferencia significativa, el uso del balde con paleta de eje vertical y la botella de 20 litros, muestran mayores remociones frente a las obtenidas en el reactor de manivela.

C) Se recomienda envasar la mezcla para la remoción de arsénico en aguas subterráneas en sachets de doble compartimento, asegurando un doble sellado, para prevenir reacciones, absorciones y pérdidas entre los constituyentes de la mezcla.

Usando como coagulante sulfato de aluminio para las pruebas de campo, las arcillas Fulmont Premiere y la arcilla natural pueden permitir mayores remociones de arsénico.

D) El mecanismo de remoción del arsénico probablemente sea una combinación de interacciones físicas y químicas entre las que debe predominar la adsorción y coprecipitación de los arsenatos en la superficie del complejo arcilla-hidróxido metálico. También se debe producir adsorción a través de puentes establecidos por cationes polidentados que unen la superficie del complejo arcilla-hidróxido y los arsenatos.

E) Se recomienda estudiar y proponer la mejor manera de disponer de los residuos del tratamiento casero. En las áreas rurales, mientras no se tenga mejor información se deben disponer los lodos en hoyos hechos en el terreno. Cuando tengan una cantidad determinada deben ser enterrados.

F) El desarrollo de una propuesta de producción a nivel industrial ayudará a bajar los costos del ALUFLOC.

## RECONOCIMIENTO

Agradecemos a las autoridades del Ministerio de Salud de Argentina, especialmente al ingeniero José Alvarez y a la Licenciada Silvia Rivero por su colaboración en el desarrollo de las actividades durante la misión de coordinación del estudio en Argentina. A la ingeniera Viviana Liberal responsable del estudio en Salta. A la Quím. Rosalina Condemarín de A.A.A. por proporcionarnos las arcillas naturales y activadas; Al Sr. Rafael Álvarez Calderón por proporcionarnos el hipoclorito de calcio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Hopenhayn-Rich, C.; Biggs M.L.; Fuchs, A.; Bergoglio, R.; Tello, E.E.; Nicolli, H.; Smith, A.H. Bladder Cancer Mortality Associated with Arsenic in Drinking Water in Argentina. *Epidemiology*, March 1996, Volume 7, Number 2.
- De Bertola, V.G.; Biagini, R.E.; Martín, A.; Mosquera, J. Localización Histoquímica del Arsénico en Piel de Pacientes con Hidroarsenismo Crónico. *Archivos Argentinos de Dermatología*. Argentina, Tomo XVI No. 3 Julio-Setiembre de 1966.
- Soria de Paredes, Gladys. Trabajo de Investigación sobre Hidroarsenismo. Localidad Gran Porvenir, Departamento de Banda. Provincia de Santiago del Estero. Argentina, Año 1997.
- Inam, Ahmed; Aasha, Amin. Arsenic on Tap. Threatens millions in May/June 1992. Planet, London, 1997.
- AJE Arsenic Ingestion and Internal cancers: A Review. *American Journal of Epidemiology*, Vol 139, No 12, 1994.
- IMTA. Remoción de Arsénico de Agua para Consumo Humano. Informe Final. México, Diciembre 1997
- Cebrián M.E., Albores A. Garcia-Vargas, and Del Razo L.M. Chronic Arsenic Poisoning in Humans: The case of Mexico. *Arsénico in the Environment, Part II: Human Health and Ecosystem Effects*, ISBN 0-471-3046-0 John Wiley and Sons, Inc. 1994.
- Arsenicism Area of Northern Mexico. *Environmental Pollution* 80 (1993) 91-94.
- Del Razo, L.M.; Corona, C.J.; Garcia Vargas, G.; Albores A. & Cebrián, M. E. Fluoride Levels in Well-Water from a Chronic.
- Nontiel, A. And Welté B. Removal of Arsenic from Drinking Water. Sagep- Eau de París. Paris-France, 1997.
- Del Razo, L.M.; Arellano, M.A.; Cebrián, M.E. The Oxidation States in Well-Water from a Chronic Arsenic Area of Northern Mexico. *Environmental Pollution* 64 (1990) 143-153.
- ATSDR Toxicidad por Arsénico. Estudios de Caso de Medicina Ambiental. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EUA. Servicio de Salud Pública. Agencia para Sustancias y Registro de Enfermedades. Junio de 1990.
- Sancha, A. M. Experiencia Chilena en Abatimiento de Arsénico. Seminario Potabilización de Aguas con Arsénico y Flúor. 9º. Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente. Córdoba-Argentina, junio 1996.
- Nicole, H.; Oconnor, T.; Suriano, J.; Koukharsky, M.L.; Gomez Peral, M.; Bertini, L.; Choen, Y.; Corradi Baleani, O. ; Abril, E. Geoquímica del Arsénico y de otros oligoelementos en aguas subterráneas en la llanura suroriental de la Provincia de Córdoba, s/d.
- Gonsbatt, M.E.; Vega, L.; Herrera, L.A.; Montero, R.; Rojas, E.; Cebrián, M.E.; Ostrosky-Wegman, P. Inorganic Arsenic Effects on Human Lymphocyte Stimulation and Proliferation. *Mutation Research* 283 (1992) 91-95.
- Kirchmer, C.; Castro de Esparza, M.L. Remoción de Arsénico en aguas con alto contenido de Magnesio. CEPIS, Lima, Perú, 1978.
- Viraraghavan, T Subramarian, K.S. Swaminathan, T.V. Drinking Water Without Arsenic: A Review

of Treatment Technologies. Environmental Systems Information Center. Asian Institute of Technology, ENSIC, Bangkok Thailand. No. 37 1994.

- Harper, Thomas R.; Kingham, Neville W. Removal of Arsenic from wastewater using chemical precipitation methods. Water Environmental Research, Volume 64, Number 2.
- Arcillas Activadas Andinas. Estructura y efecto de las arcillas. Tonsil, Lima, 1998.
- Frey, Michelle M.; Edwards, Marc. Surveying arsenic occurrence. Regulatory Update. Journal AWWA Volume 89, Issue 3, March 1997.
- Root, U.; Meyehoff. In Situ Treatment of Arsenic in Groundwater. Institute of Sanitary Engineering, Water Quality and Solid Waste Management, University of Stuttgart, Germany.
- United States patents process for removal arsenic from groundwater 5,587,086; 5,453,201; 5,451,328; 5,378,366; 5,358,643; 5,076,940; 4,723,992
- Berbenni, P.; Chinaglia, V.; Cristoforetti, C.; De Lucia, G. Arsenic from drinking water by adsorption onto oxides. Dipartimento di Ingegneria Odraulica, Ambientale e Rilevamento, Sezione Ambientale.
- Driehaus W., Jekel. Granular Ferric hidróxide- A New adsorbent for removal of arsenic for drinking Water. Technical University of Berlin, Department of Water Quality Control, Secr. KF 4,
- Callegaro, R.S.; Cusimano, N.O.; Deambrosi, N.E.; Albina, L.C. Métodos prácticos para la corrección de aguas arsenales. Laboratorio de Ingeniería Sanitaria, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Plata 1998.