

Arsénico: Impactos sobre la salud y Métodos para descontaminar

Consenso promovido por la Comisión de Ambiente y Salud
de la Academia de Ciencias Médicas de Santa Fe






Editores

Académicos Yolanda Lombardo, Jorge Reinheimer y Rubén D Piacentini

Colaborador

Académico Rafael Calvo

Calidad Química de las Aguas Subterráneas en la Provincia de Santa Fe

-  Zona con altas concentraciones de Arsénico y Fluor
-  Zona con altas concentraciones de Sales y Arsénico
-  Zona con buena calidad
-  Zona con presencia de Nitratos (baja concentración de sales)
-  Zona con presencia de Hierro, Manganeso y Dureza (baja concentración de sales)



 <http://www.enress.gov.ar/docs/EstadodeSituaci%C3%B3nServiciosdeAguaPotable.pdf>

Publicación on line de la Academia de Ciencias Médicas de Santa Fe

<https://acacimesfe.org/>

- 2020 -

Indice	2
Prólogo	3
Resumen Ejecutivo	4

PRIMERA PARTE: Impactos sobre la salud

Introducción y Fundamentos	7
Efectos del arsénico en la intoxicación aguda o crónica	8
Niveles de As en regiones de Argentina en general y de la Provincia de Santa Fe en particular	9
Referencias (Primera parte)	10
Glosario (Primera parte): definición de las palabras indicadas en el texto con asterisco (*)	12

SEGUNDA PARTE: Métodos para descontaminar

Introducción	13
Métodos para zonas rurales	14
Métodos aplicados en servicios centralizados	15
Tecnologías emergentes	16
Estudios de remoción de arsénico realizados en el país	17
Situación general de la provisión de agua potable en el país y propuestas alternativas	19
Tratamiento de residuos de arsénico	20
Referencias (Segunda parte)	20
Glosario (Segunda parte): definición de las palabras indicadas en el texto con asterisco (*)	21
Agradecimientos	23

Prólogo

La Academia de Ciencias Médicas de la Provincia de Santa Fe, fundada en los últimos meses del año 2017, comienza a funcionar y su actuación hasta el presente consiste en la creación de su Primer Claustro de Miembros de Número que se llamaron Fundadores, en número de 30, cuya actividad resulta significativa durante los años 2018 y 2019 hasta la iniciación del 2020, cuando comienza la agresión mundial del Corona virus, que ha sido capaz de detener el estado evolutivo de nuestro país y del mundo habitado.

No obstante el temperamento del claustro, estimulado por el tremendo desafío, lejos de encerrarse en el acuartelamiento necesariamente impuesto a la población, no acalló las mentes comprometidas a encarar problemas médicos de la comunidad.

Demostración del poder de esa posición fueron la adjudicación de los Sitiales Académicos, el establecimiento de la página WEB en su presentación al mundo al que ofrece sus siete solapas de gestión, donde tienen lugar las expresiones científicas, tanto de los Miembros como de los grupos de trabajo que en 5 Comisiones expresan el nacimiento de ideas y presentación de trabajos científicos que no han detenido su producción.

Se incorporaron los Nuevos Académicos del año, se co-auspicó el Congreso Internacional del Worm en el Parque de España, presidido por el Dr Diego de Mendoza, miembro de la Comisión Directiva de la Academia.

En el año 2019 se incorporó nuestro primer miembro Correspondiente en la persona del Dr Felix Umansky, neurocirujano argentino radicado en Israel.

El Covid 19 sigue azotando la Tierra con su marcha agorera, a la espera de una vacuna que sea lo suficientemente buena para neutralizar tan dramáticamente contagiosa patología.

Justificando nuestra existencia en el mundo de la Salud, hoy estamos ofreciendo la presentación primaria de la Comisión "Ambiente y Salud" de nuestra Academia, coordinada por el Profesor Dr Rubén Darío Piacentini, cuyo grupo de trabajo ofrece las páginas clarividentes donde sus creadores expresan un Proyecto viable, cuyo destino es el diagnóstico y tratamiento de componentes arsenicales en las napas subterráneas de la Provincia de Santa Fe, con un mapeo geográfico de las zonas más expuestas y anunciando a las autoridades Sanitarias la manera de prevenir y tratar tan peligrosa situación regional.

Oscar Fay

RESUMEN EJECUTIVO*

Impactos sobre la salud

Numerosos estudios demuestran la toxicidad del arsénico (As) en la salud humana. En este contexto, los compuestos inorgánicos del As han sido clasificados como carcinogénicos por la Agencia Internacional de Investigación sobre Cáncer. La vía más común de incorporación del As en el hombre es a través del agua de bebida, aunque también contribuyen a su incorporación la dieta (vegetales producidos en zonas con agua en alto contenido de As) o por vías respiratorias. También puede incorporarse por exposición de As a diferentes tipos de actividad laboral (actividad minera, fundiciones, uso de insecticidas), entre otras.

Los compuestos inorgánicos de As pueden originar intoxicaciones agudas o crónicas, que dependen de la dosis y del tiempo de exposición al mismo. Las intoxicaciones agudas ocasionan en general náuseas, problemas intestinales, cardiovasculares entre otros. La intoxicación crónica con As denominada "Arsenicosis" incluye numerosas modificaciones clínicas causadas por exposición prolongada al As que se manifiestan en todo el organismo, afectando la mayoría de los órganos (hígado, riñón, corazón, pulmones, músculos), observándose también cambios dermatológicos. La exposición aumenta el riesgo de enfermedad cardiovascular, diabetes, alteraciones genéticas, epigenéticas* y estrés oxidativo*. Las consecuencias más graves de las intoxicaciones crónicas son los cambios malignos en la mayoría de los tejidos del organismo, con el riesgo de desarrollar cáncer en diferentes órganos. También se constatan efectos adversos en los niños, donde aparecen rápidamente problemas dermatológicos.

La toxicidad del As es a través de la inactivación de enzimas relacionadas con las vías metabólicas (en respuesta al estrés, daño genético, síntesis y reparación del ADN). La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece 10 microgramos/litro (donde "microgramo" = 1 millonésima de gramo) como nivel máximo de As permitido en el agua de bebida. En nuestro país, diversas áreas de la planicie pampeana y zonas adyacentes, de alrededor de un millón de Km², se encuentra muy afectada por la concentración de As en agua, que supera ampliamente este nivel. En esta amplia región se encuentran las provincias de Santa Fe, Buenos Aires, Chaco, Córdoba y Santiago del Estero. Un relevamiento de la Red de Seguridad Alimentaria Nacional de CONICET demostró, en un vasto análisis de muestras, que el agua que consume más del 50% de esta región contiene cantidades de As superiores a las establecidas por la OMS. Estudios recientes demostraron que la provincia de Santa Fe tiene contaminación con As en sus acuíferos en aproximadamente 60% del territorio, con niveles muy altos en un rango de 25,8 a 400,4

microgramos/litro. El contenido de As en aguas de diferentes localidades de la provincia (San Cristobal, Totoras, Colonia Rosas, entre otras) varía entre 50 y 100 microgramos/litro.

El Código Alimentario Argentino ha propuesto reducir los niveles de As en agua de 50 a 10 microgramos/litro, recomendando alcanzar este límite para el año 2017 ya transcurrido, como vía de prevención del hidroarsenicismo.

Este problema sanitario debe estar focalizado en reducir la ingestión en agua de bebida contaminada con arsénico, con énfasis en la utilización de fuentes alternativas de agua de bebida.

Métodos para descontaminar

La mayoría de las tecnologías de remoción de As son eficientes cuando el elemento está presente en el estado pentavalente [As(V)]. Por ello, la mayoría de los métodos de remediación de As usan una etapa previa de oxidación, para transformar todo el As en As(V). Sin embargo, la oxidación sin la ayuda de otras transformaciones físicas o químicas, no elimina el As del agua, sino que debe acompañarse de otro tratamiento que elimine el elemento de la solución.

- **Métodos para zonas rurales**

Estos métodos deberían ser accesibles, amigables con el ambiente y adaptados a las características culturales de la población. Diversos métodos han sido usados. Sin embargo, la mayoría de ellos no son aplicables en regiones rurales pobres y aisladas. En estas, generalmente, la luz solar es altamente disponible y los métodos basados en el uso de energía solar pueden ser usados. Un ejemplo lo constituye el método SORAS (Oxidación solar para remover As), método simple que consiste en la irradiación solar del agua contenida en una botella transparente para producir una oxidación fotoquímica del As (III) a As (V) en la presencia de citrato, agregado a la botella en la forma de unas pocas gotas de jugo de limón y de hierro, agregado como virutas, por ejemplo. Luego ocurre una precipitación de hidróxidos de hierro, la adsorción* del As (V) y una floculación*. La eficiencia del método es muy dependiente de la naturaleza del agua y la tecnología debe ser adaptada a cada región.

- **Métodos aplicados en servicios centralizados**

Las tecnologías más comunes incluyen en estos casos, procesos que se pueden utilizar solos o en combinación, tales como la oxidación, coprecipitación y adsorción en flóculos, tratamiento con cal, adsorción sobre superficies adecuadas, uso de resinas de intercambio iónico y tecnologías de membrana (ósmosis inversa*, nanofiltración*, electrodiálisis*). La mayoría de ellas son tecnologías seguras y fáciles de aplicar para la remoción de As en las plantas de tratamiento a gran y mediana escala de servicios centralizados.

- **Algunos sistemas de remoción de arsénico en el país**

En Argentina, la ósmosis inversa es uno de los métodos que más se han utilizado a partir de fines de la década de los 70, habiéndose instalado numerosas plantas, por ejemplo, en las provincias de Santa Fe, Córdoba, Buenos Aires y La Pampa. La Universidad Nacional de Rosario patentó el proceso ArCIS, que utiliza un método de coagulación-adsorción. Se instalaron plantas de remoción basadas en esta tecnología

en Lezama, provincia de Buenos Aires, donde se provee agua apta para el consumo humano a 5000 pobladores. Más tarde, varias plantas pequeñas y medianas con esta metodología se aplicaron con éxito en el país, para poblaciones con menos de 10000 habitantes. La Universidad Nacional de Salta y el Instituto de Investigaciones para la Industria Química (INIQUI) de CONICET, trabajan en remoción de As desde 2009. El sistema desarrollado se basa en la precipitación-filtración a través de un lecho de arena y utilizando distintos materiales de hierro. En base a esto, se escalaron dos plantas de tratamiento ubicadas en dos escuelas de la región del Chaco salteño. Las plantas permiten una producción de 1000 litros diarios de agua, con un tenor de As inferior a 50 microgramos/litro.

- **Situación general de la provisión de agua potable en el país y propuestas alternativas**

Las tecnologías de remoción de As que han sido probadas a escala real, y en las que existe el conocimiento para su implementación, así como proveedores confiables, son la de ósmosis inversa y el proceso de coagulación*-adsorción-filtración*. En general, es muy difícil lograr un suministro continuo de agua con concentraciones de As menores de 10 microgramos/litro. Por supuesto que todo dependerá de qué niveles de concentración se parta en el agua a tratar. Si se considera como una buena eficiencia una remoción del orden del 90%, sólo se podrá tratar agua con un máximo de 100 microgramos/litro. En la provincia de Santa Fe, de los 373 servicios centralizados de agua que funcionan actualmente, 17 se abastecen de aguas superficiales, las cuales requieren solamente un tratamiento de potabilización convencional, mientras que el resto se abastece de fuentes subterráneas de calidades diversas y concentraciones elevadas de As, mayormente en toda la franja Oeste de la misma. La Empresa Aguas Santafesinas S.A. abastece sólo a 15 localidades. Existen en Santa Fe 86 plantas de ósmosis inversa para proveer agua en bidones y 39 plantas de ósmosis inversa para distribución de agua por red. La provisión de agua en bidones es una solución que permite proveer agua segura de calidad controlada por el Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ENRESS).

- **Doble red**

Ante la necesidad de cumplir con normativas más exigentes respecto a la calidad del agua, surge como alternativa la construcción de redes dobles, una red que transporte agua potable y otra que transporte agua para otros usos. De esta manera, la planta de tratamiento sólo debe tratar una parte del caudal a suministrar, con la consiguiente disminución de costos de construcción y operativos. De acuerdo a los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud, en algunas localidades de países desarrollados se ha provisto un suministro adicional de cañería para casas y edificios de una fuente alternativa de agua no potable, con lo que se crea un suministro de redes dobles. El objetivo es reducir el uso de agua de alta calidad. Existen experiencias exitosas que funcionan desde hace muchos años en Jovita, Córdoba (unos 5000 habitantes) y en San Guillermo, Santa Fe (unos 7800 habitantes).

** Al final de cada una de las partes del Consenso está detallado un Glosario de palabras científico/técnicas.*

PRIMERA PARTE

Impactos sobre la salud

Introducción y fundamentos

Numerosos estudios demuestran la toxicidad del arsénico (As) en la salud humana. Al respecto, los compuestos inorgánicos de As han sido clasificados en el Grupo I como carcinogénicos para el humano [1].

En medios acuáticos subterráneos, el arsénico proviene de los minerales. El arsénico prevalece preferentemente en las formas inorgánicas como As (III) y As (V) y su distribución depende del pH, del potencial redox y de la salinidad del agua. En medios oxidantes las formas predominantes son las pentavalentes, mientras que las formas trivalentes se encuentran en medios reducidos y su comportamiento bioquímico y toxicológico varía ampliamente. La absorción del As se realiza predominantemente en el intestino delgado [2], aunque también una cantidad pequeña ocurre por contacto en la piel y por inhalación. Su biodisponibilidad depende de factores fisicoquímicos relacionados con el tipo de compuesto arsenical: solubilidad, matriz a la que está unido (alimentos, agua, otras bebidas, suelo) y también de factores relacionados al individuo, entre los cuales se encuentran la edad y las condiciones de ayuno/alimentación [3,4].

La vía de incorporación más habitual del As en el hombre es a través del agua de bebida, si bien la dieta y la inhalación por vías respiratorias también puede contribuir a su incorporación. En las zonas con aguas arsenicales es corriente observar que los vegetales tengan una concentración de arsénico elevada [5,6]. El ganado también puede padecer los efectos de la arsenicosis* en zonas con alto contenido de As en el agua. Aunque menos frecuente las exposiciones al As pueden ser de tipo laboral (actividad minera, fundiciones, producción y uso de insecticidas, desecantes y preservantes de la madera y por tratamientos farmacológicos (productos que contiene As para tratamiento de algunas enfermedades) [7-10].

En el organismo humano, la metabolización del As ocurre en 2 etapas consecutivas de metilación*, cada una integrada por dos reacciones principales: reducción y metilación oxidativa, utilizando glutatión como reductor y S-adenosil metionina* como dador de grupos metilos. En la primera etapa, se reduce el As(V) a As(III) seguido de la metilación oxidativa del As(III) a ácido monometilarsónico* [MMA (V)]. En la segunda etapa se produce la reducción del MMA(V) a MMA (III) y su posterior metilación a ácido dimetilarsínico* [DMA(V)]. Los productos MMA(III) y MMA(V) se excretan principalmente por la orina y solamente el 5% por las heces. En el organismo humano coexisten las especies metiladas y no metiladas, siendo los intermediarios metabólicos trivalentes mucho más tóxicos que los pentavalentes y el MMA III es el de mayor toxicidad [11-15].

Efectos del arsénico en la intoxicación aguda o crónica

Los compuestos inorgánicos del As pueden originar intoxicaciones agudas o crónicas. Cuando los individuos están expuestos a una elevada dosis única o a dosis repetitivas durante un corto período de tiempo (no mayor de 24 horas), puede provocarse una intoxicación aguda cuyos efectos aparecen poco tiempo después de la ingestión o inhalación de estos compuestos. Estos efectos se destacan por lo general con la presencia de náuseas, vómitos, diarrea, problemas cardiovasculares y encefalopatías [8].

Las concentraciones de As que se encuentran naturalmente en las aguas subterráneas no producen intoxicaciones agudas pero son capaces de originar intoxicaciones crónicas debido a la ingesta iterativa de pequeñas cantidades de As a través del agua y de alimentos que han sido cultivados o cocinados en aguas con mayor contenido de As, durante períodos de tiempo prolongados (en general varios años) en poblaciones muy extendidas geográficamente. También deben considerarse otras fuentes de contaminación relacionadas con actividades humanas, tal como se mencionó anteriormente.

Se considera en la actualidad la toxicidad crónica del As dentro del término “Arsenicosis” que incluye numerosas manifestaciones clínicas causadas por una exposición prolongada del mismo.

Investigaciones de Ratnaike [8] y de Baker et al [9] demuestran que las alteraciones clínicas se manifiestan virtualmente en todo el organismo, debido a que el As absorbido se acumula en hígado, riñón, corazón, y pulmones, y en menor cantidad, en el músculo, sistema nervioso, tracto gastrointestinal y bazo. El As se deposita también en tejidos ricos en queratina* (uñas, cabellos, piel) siendo muy común observar cambios dermatológicos tales como hiperpigmentación y keratosis*.

Se han observado efectos gastrointestinales por la exposición oral crónica de As y también en la exposición aguda, con efectos irritantes sobre la mucosa digestiva [10]. También se mencionan efectos neurológicos que incluyen: fatiga, depresión, mareos e insomnio [10]. Se ha constatado también mayor riesgo de enfermedad cardiovascular, enfermedades respiratorias, diabetes, neutropeña* y alteraciones genéticas, epigenéticas* y estrés oxidativo*.

Las consecuencias más graves de las intoxicaciones crónicas son cambios malignos en la mayoría de los tejidos del organismo, donde se ha observado mayor riesgo de desarrollar cáncer en diferentes órganos. Estudios epidemiológicos constataron que la ingestión de As aumenta el desarrollo de cáncer de piel [9], siendo el más común el carcinoma de células escamosas. También se han observado los cánceres de pulmón, riñón, vejiga, hígado y próstata. En un trabajo reciente, Roman et al [16] analizaron durante el

período 2008-2015, en la provincia de Córdoba, Argentina, el efecto de la combinación de dietas contaminadas con elevados niveles de As en el agua de bebida, en individuos que realizan trabajos de agricultura y demostraron que tenían una marcada elevación de contraer cáncer de próstata.

Los niños son más susceptibles que los adultos a los efectos adversos del As. Se ha observado que las enfermedades dermatológicas aparecen más rápidamente en esta población. Estudios recientes demuestran que niños expuestos durante el período pre natal y post natal pueden tener un menor desempeño neurológico que los niños no expuestos [8,17]. Existen evidencias que sugieren que el As atraviesa la barrera placentaria y puede encontrarse en bajos niveles en la leche materna, por lo que las mujeres embarazadas y los niños pequeños constituirían un grupo de riesgo importante.

La toxicidad que ejerce el As es a través de la inactivación de numerosas enzimas, principalmente aquellas que se relacionan con las vías metabólicas en procesos fisiológicos claves en el metabolismo, la respuesta al estrés, respuesta al daño genético, síntesis y reparación del ADN y apoptosis*, afectando también al daño oxidativo por diferentes agentes químicos. Entre las enzimas involucradas se encuentran la catalasa*, óxido nítrico sintasa*, superóxidodismutasa*, y mieloperoxidasa*, entre otras [18].

La asignación de riesgo debido a la toxicidad del As es más complicada cuando existen varios compuestos que son capaces de modular su toxicidad por exposición crónica. Entre ellos se encuentran los co-contaminantes en el agua de bebida, como el antimonio y los incorporados a las dietas como el selenio y el zinc [19].

Los efectos anteriormente mencionados relacionados con la salud humana han sido analizados por numerosos organismos internacionales y destacados científicos, incluyendo, entre otros a: World Health Organization [20], US Agency for Toxic Substances and Disease [21], Nachman et al. [22] y el Programa Internacional sobre Seguridad Química (IPCS) de la Environmental Protection Agency, de Estados Unidos [23].

Niveles de As en regiones de Argentina en general y de la Provincia de Santa Fe en particular

Tal como se detalló en la Primera parte de este Consenso y de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud, la cantidad de As permitida en el agua de bebida es de 10 µg/litro (donde “µg” indica “microgramo = 1 millonésima de gramo”). Sin embargo, numerosas regiones de la Argentina pampeana en el Oeste al río Paraná y en el Este al río de la Plata [24], están muy afectada por una concentración mayor de As que supera ampliamente esta cifra. El área de la planicie pampeana Argentina con una extensión de 1 millón de Km², que abarca desde el borde con Paraguay en el Norte a la meseta patagónica en el Sur y desde la colina pampeana en el Oeste a los ríos Paraná y la Plata en el Este, muestra una concentración de As en un rango de <4 a 5300 µg/litro [25]. En esta amplia región se encuentran las provincias de Buenos Aires, Chaco, Córdoba, Santiago del Estero y Santa Fe. Al respecto, un relevamiento de la Red de Seguridad Alimentaria Nacional del CONICET demostró, en un análisis realizado de más de 400 muestras, que el agua que se consume en más de la mitad de estas regiones (ciudades o áreas rurales) contiene cantidades de As superiores a la recomendación de la OMS para prevenir el hidroarsenicismo*. Estudios de Nicolli et al [26] y Vazquez et al [27] demostraron que la provincia de Santa Fe tiene contaminación de As en sus acuíferos sobre el lado oeste (aproximadamente el 60% de la provincia) con niveles de As de hasta 1000 µg/litro. Trabajos de M Sigrist et al [28], constataron en 59 muestras colectadas de 27 localidades diferentes en el

área central Oeste de la provincia de Santa Fe, casi una exclusiva preponderancia de las formas pentavalentes del As, con un rango total de concentración de As de 25,8 a 400,4 µg/litro. La concentración de As en aguas en diferentes localidades de la provincia de Santa Fe (San Cristóbal, Totoras, Colonia Rosa, entre otras), varía entre 50 y mayor de 100 µg/litro [29]. Bardach et al. [30] constataron niveles elevados de As en el agua de bebida de la provincia de Buenos Aires de más de 100 µg/litro.

Es de destacar que la legislación argentina en el Código Alimentario Argentino, Capítulo XII [31], redujo el máximo nivel contaminante (MCL) de 50 a 10 µg/litro, recomendando alcanzar ese valor en el país para el año ya transcurrido de 2017. El foco del problema debe ser el de *reducir la ingestión de arsénico del agua de bebida, con énfasis en la utilización de fuentes alternativas de agua de bebida.*

Referencias (Primera parte)

1-International Agency for Research on Cancer 1987.IARC Supplement 7 Vol 1-4 Lyon.World Health Organization Press, France (2012).

2-Gonzalez M J,Aguilar M W,Martinez M C.Mechanisms of absorption of As₂O₃ fromrat small intestine: The effect of different parameters. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology .11: 239-247 (1997).

3-Yamauchi H, Yamamura Y. Concentration and Chemical Species of Arsenic in Human Tissue. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 31: 267-277 (1983).

4-Vahter, M, Marafante E. Intracellular Interaction and Metabolic Fate of Arsenite andArsenate in Mice and Rabbits. Chémico- Biological Interacttions. 47: 29-44 (1983).

5-Queirolo F, Stegen S, Restovic M, Paz M, Ostapczuk P, Schweger M J, Muñoz L. Total arsenic, lead and cadmium levels in vegetables cultivated at the Andean villages of Northern Chile. Science of the Total Environment. 255:75 (2000b).

6-Sancha A M,Frenz P. Estimated of the current exposure of the urban population of Northern Chile to interdisciplinary perspectives on drinking water risk assessment and management. Proceedings of the Santiago de Chile.Symposium, September 1998 IAHS Publ.Nº269, pp3-8 (2000).

7-Lewis R,Kosnett M J. Metals in: Ladou J, HarrinsonR.Editors. Occupational and Environmental Medicine 5th Mc graw- Hill Education.p463-485 (2014).

8-Ratnike R N. Acute and chronic arsenic toxicity (Review). Postgraduate Medical Journal. 79:391-396 (2003).

9-Baker B A , V Cassano V, Murray C .Arsenic exposure , assessment , toxicity, diagnosis and management. Journal of Occupational and Environmental Medicine (JOEM) 60: e 634-e639 (2018).

10-Roy P, Saha A.Metabolism and Toxicity of Arsenic: A Human Carcinogen. Current Science. 82 (1): 38-45 (2002)

- 11-Petrick J S, Ayala-Fierro F, Cullen WR, Carter D E, Aposhian HV. Monomethylarsonous acid [MMA(III)] is more toxic than arsenite in Chang human hepatocytes. *Toxicology and Applied Pharmacology*.163 (2): 203-207(2002).
- 12-Mandal B K, Suzuki K T. Arsenic Round the World: a Review. *Talanta*, 58 (1): 201- 235(2002).
- 13-Valenzuela, O L, Borja-Aburto VH, Garcia-Vargas G G, Cruz-Gonzalez M B, Garcia-Montalvo E A, Calderon-Aranda E S, Del Razo L M. Urinary trivalent methylatearsenic species in a population chronically exposed to inorganic arsenic. *Environmental Health Perspectives*. 113: 493-506 (2005).
- 14-Yamauchi, H, Yamamura Y. Concentration and Chemical Species of Arsenic in Human Tissue. *Bulletin of Environmental Contaminations and Toxicology*. 31: 267-277 (1983).
- 15-Aposhian H V. Enzymatic methylation of arsenic species and other approaches to arsenic toxicity. *Annual Review Pharmacology and Toxicology*. 37: 397-419 (1997).
- 16-Roman D M, Niclis C, Aballay L R, Lantieri M J, Diaz M D P, Muñoz S E. Effects of prostate cancer risk do exposure to arsenic, occupation and diet have synergistic. *Asian Pacific of Cancer Prevention*. 19: 1495-1501 (2018).
- 17-Vahter, M E. Effects of Arsenic on Maternal and Fetal Health. *Annual Review of Nutrition*.29: 381–99 (2009).
- 18-Ghosh P, Banerjee M, Giri A K, Ray K. Toxicogenomics of Arsenic: Classical Ideas and Recent Advances. *Mutation Research*. 60. International Agency for Research on Cancer (IARC). Monographs 659:293-301 (2008).
- 19-Gobel T. Confounding Variables in the Environmental Toxicology of Arsenic. *Toxicology*, 144: 155-162 (2000).
- 20-World Health Organization. Exposure to arsenic. A mayor public health concern. Geneva, Switzerland. Publicación de WHO (2010).
- 21-US Agency for Toxic Substances and Disease. Addendum to Toxicological Profile for Arsenic. Washington DC US Department of Health and Human Services (2016).
- 22-Nachman K E, Ginsberg G L, Miller M D, Murray C J, Nigra A E, Pendergrast C B, Miligatin G. Dietary arsenic exposure : current status in the United States and recommendations for an improved path forward. *Science of the Total Environment* .581: 22-236 (2017).
- 23-IPCS Environmental Protection Agency: Arsenic Compounds EPA. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-091/documents/arsenic-compounds.pdf> International programme on Chemical Safety ,IPCS/63.
- 24-Nicolle M, Bundschuh J, Blanco M, Tujchneider O, Panarello H, Dapeña C, Rusansky L. Arsenic and associated trace elements in groundwater from the Chaco-Pampean plain. Argentina: results from 100 years of research. *Science of the Total Environment*. 490:36-56 (2012).
- 25-Smedley P, Kinniburgh D. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural water. *Applied Geochemistry*. 17:517-568 (2002).

- 26-Nicolli M, Bundschuh J, Garcia J, Falcon C, Jean J. Sources and controls from the mobility of arsenic in oxidizing ground water from loess –type sediments in arid /semi-arid dry climates.Evidence from the Chaco- Pampean plain. Water Research 44:5589 -5604 (2010).
- 27-Vazquez H, Ortolani V, Rizzo G, et I. Documento ENRRES. Rosario, Santa Fe, Argentina, p17. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/busaca/fulltext/arsenico.pdf> (consulta realizada e20/06/2005).
- 28-Sigrist M, Albertengo A, Brusa L, Beldomenico H, Tudino M. Distribution of inorganic arsenic species in ground water from Central- West part of Santa Fe, Province, Argentina. Applied Geochemistry 39:43-48 (2013).
- 29-Gomez A. En Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento.II Seminario Hispano –Latino americano sobre temas actuales de hidrología subterránea –IV Congreso Hidrogeológico Argentino.Rio Cuarto, Córdoba, pp147 (Octubre 2005).
- 30-Bardach A E, Ciapponi A, Soto N, Chaparro M R,Calderon M, Briatone A, Cadoppi N, Tassara R, Litter M I. Epidemiology of chronic disease related to arsenic in Argentina: A sistematic review. Science of the Total Environment, 538: 802-816 (2015).
- 31-Código Alimentario Argentino. Ministerio de salud y Acción Social de la República Argentina. Capítulo XII (2012). Disponible en: http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp.

***Glosario (Primera parte)**

Apoptosis: Muerte celular programada.

Arsenicosis: Intoxicación por arsénico. Enfermedad crónica que resulta de beber agua con altos niveles de arsénico durante un largo período de tiempo (5-20 año).

Catalasa: Enzima antioxidante.

Dimetilarsénico: Compuesto inorgánico del arsénico.

Epigenética: Campo de la ciencia que estudia los cambios hereditarios causados por la activación y desactivación de los genes, sin ningún cambio en la secuencia de ADN subyacente del organismo.

Estrés oxidativo: Afección en la que las concentraciones de antioxidantes son más bajas de lo normal.

Keratosis: Placa gruesa y escamosa en la piel que se puede convertir en cáncer.

Hidroarsenicismo: Es una enfermedad ambiental crónica cuya etiología está asociada al consumo de aguas contaminadas con sales de arsénico.

Metilación: Adición de un grupo metilo (-CH₃) a una molécula.

Mieloperoxidasa: Enzima responsable de la actividad microbicida contra un amplio espectro de organismos.

Monometilarsénico: Compuesto inorgánico del arsénico.

Neutropeña: Cantidad insuficiente de neutrófilos un tipo de glóbulos blancos de la sangre.

Óxido nítrico sintasa: Enzima que cataliza la conversión de L-arginina a L- citrulina produciendo óxido nítrico.

Potencial redox: Es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones.

Queratina: Proteína cuya función principal es proteger las células epiteliales, siendo un elemento fundamental en la formación de la capa externa de la piel.

S-adenosil metionina: Es un co-sustrato común que interviene en la transferencia de grupos metilos.

Superóxido dismutasa: Las superóxido dismutasas son una familia de enzimas cuya función principal es la defensa de los organismos aeróbicos frente a radicales libres de oxígeno.

SEGUNDA PARTE

Métodos para descontaminar

Introducción

El arsénico (As) es un metaloide* abundantemente presente en ambientes naturales y puede encontrarse en cuatro estados de oxidación: As(V), As(III), As(0) y As(-III). Su presencia está asociada a fuentes naturales, incluyendo la corteza terrestre, suelos, sedimentos, aire, agua y organismos vivos y a fuentes antropogénicas*. El pH* y el potencial redox* definen la forma química de las especies de arsénico en los suelos. La exposición de los seres humanos al elemento ocurre a través del consumo de agua y alimentos contaminados y la contaminación se produce por la liberación de As a suelos y acuíferos, debido a procesos naturales, tales como fenómenos volcánicos y desintegración de rocas. El As es uno de los contaminantes inorgánicos más tóxicos, presente fundamentalmente en agua subterránea y detectado en una amplia escala de concentraciones en todo el mundo. Las actividades humanas como la minería, los procesos industriales, la fundición de metales, la producción de pesticidas y de preservantes de madera, aportan una contaminación adicional en suelos y acuíferos. El As inorgánico predomina en las carnes, en los lácteos y en los cereales, pero también está presente en vegetales y frutas.

Las fuentes antropogénicas de As en el medio ambiente superan en una relación 3:1 a las fuentes de origen natural. La oxidación de minerales de sulfuro en actividades de minería, el uso de pesticidas, la aplicación de fertilizantes y los residuos industriales constituyen las principales causas de ingreso del contaminante al ambiente [1-3].

La mayoría de las tecnologías de remoción de As son eficientes cuando el elemento está presente en el estado pentavalente*, principalmente como oxianiones* H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} (pH 2-12). La forma trivalente* es neutra (H_3AsO_3) hasta pH 9,2 y presenta menor capacidad para ser removida. Por ello, la mayoría de los métodos de remediación de As usan una etapa previa de oxidación para transformar todo el As en As(V). Sin embargo, la oxidación, sin la ayuda de otras transformaciones físicas o químicas, no elimina el As del agua, sino que debe acompañarse de otro tratamiento que elimine el elemento de la solución. Además, la ebullición del agua para la purificación no elimina el As; por el contrario, este proceso aumenta la concentración de As por evaporación, hecho comúnmente ignorado por las personas que podrían resultar afectadas [4].

Métodos para zonas rurales

Estos métodos deberían ser accesibles, amigables con el ambiente y adaptados a las características culturales de la población. Diversos métodos han sido usados para remover As de aguas para bebida. Sin embargo, la mayoría de ellos no son aplicables en regiones rurales pobres y aisladas. En estas, generalmente, la luz solar es altamente disponible y los métodos basados en el uso de energía solar pueden ser usados.

El método SORAS (Solar Oxidation for Arsenic Removal) es un método simple de irradiación solar del agua contenida en una botella transparente de tetraftalato de polietileno (PET), comúnmente empleada como envase de gaseosas. La oxidación fotoquímica del As (III) a As(V), a pH neutro, es promovida bajo irradiación solar en la presencia de citrato*, agregado a la botella en la forma de unas pocas gotas de jugo de limón y de hierro (Fe) presente, agregado como virutas, por ejemplo. Luego ocurre una precipitación de Fe hidróxidos*, la adsorción* del As (V) y una floculación*. Sin embargo, la eficiencia del método es muy dependiente de la naturaleza del agua, de la radiación solar disponible en un dado lugar y momento del día y la tecnología debe ser adaptada a cada región. En experiencias llevadas a cabo en la localidad de Los Pereyra (Tucumán), el alambre de embalaje fue la mejor fuente de Fe, material barato y muy usado en actividades agrícolas de esta región. El método SORAS, convenientemente modificado de acuerdo a la composición del agua del lugar, resulta adecuado para ser aplicado en localidades rurales aisladas donde no existan redes de agua [2,5,6]. Recientemente, la atención ha sido también focalizada en otras metodologías, simples y de bajo costo para remover As de aguas subterráneas en pueblos rurales. Se trata de avanzadas tecnologías de oxidación o procesos tales como la fotocatalisis* heterogénea y Fe cerivalente* (ZVI). Experiencias llevadas a cabo en la planicie Chaco Pampeana, mostraron la efectividad de las 2 tecnologías de bajo costo: fotocatalisis heterogénea con Dióxido de Titanio (TiO_2) soportado en las paredes de botellas plásticas con adición de Fe, o Fe cerivalente en el mismo tipo de botellas plásticas [2,4].

El Diario La Nación publicó una nota [7] sobre el desarrollo de alumnos y docentes de una escuela secundaria de Tucumán, de purificadores caseros para usar en parajes rurales. En el Este de la provincia, el nivel de As en el agua oscila entre 10 y 50 $\mu\text{g}/\text{litro}$. Este valor se adecúa a los parámetros del Código Alimentario Argentino, pero en general supera el valor aconsejado por la OMS de solo 10 $\mu\text{g}/\text{litro}$. El filtro diseñado por los alumnos y docentes consiste en colocar, en un envase de plástico, diferentes cantidades de algodón, piedras, gravas, Carbón activado, arena gruesa y fina, con lo cual el contenido de As puede bajarse hasta 2,5 $\mu\text{g}/\text{litro}$. El proyecto trata de que el purificador se implemente en escuelas rurales, para aplicarlo luego en las viviendas.

Una metodología de bajo costo a escala familiar para la remoción de As se desarrolló en Perú utilizando ALUFLOC, una mezcla de un oxidante (cloro), arcillas activadas* (que actúan como adsorbentes de As y/o intercambiadores de iones) y un coagulante ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ o FeCl_3). Esta metodología se probó en Puno, permitiendo eliminar hasta el 98% del As disuelto (concentración de As en el agua cruda: 1000 $\mu\text{g/litro}$); a altas concentraciones de As, la eficiencia de remoción disminuía. La dificultad más importante en este caso, es que el usuario depende de la provisión del material de tratamiento, lo que requiere programas estatales de sostenimiento. Esta limitante es importante en lugares de difícil acceso [2,4,8].

Estudios internacionales de este tipo dan cuenta, por ejemplo, de que en la zona rural de Bangladesh, diferentes técnicas para remover As han sido provistas por organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, tales como filtros de arena y otros tipos de filtros y colectores de agua de lluvia, pero con baja aceptación social. La instalación de “pozos tubulares” (perforaciones a distintas profundidades y extracción del agua a través de tubos) fue identificada como una opción socialmente aceptada [9].

La presencia de As en agua, no sólo puede tener un efecto directo en las personas cuando está presente en el agua de bebida, sino también indirecto cuando el agua con As es utilizada para riego en terrenos donde se cultivan vegetales para la alimentación de esas personas. En este caso existe la posibilidad de que estos vegetales absorban el As del agua de riego, así como también es posible que incorporen el As del suelo. Muchos estudios se llevaron a cabo para atender el problema de la incorporación de As al arroz, maíz, trigo, etc y se ha encontrado que las estrategias biotecnológicas son las más efectivas para reducir la acumulación de As en los granos de arroz, mediante la producción de plantas transgénicas consideradas seguras. Debe tenerse en cuenta que la comercialización de arroz transgénico está sujeto a regulaciones gubernamentales en lo relativo a bioseguridad hacia los humanos y el ambiente, por lo que, si se cumplen dichas regulaciones, estas herramientas biotecnológicas tienen gran potencial [10].

Métodos aplicados en servicios centralizados [2,4,8]

Las tecnologías más comunes incluyen en estos casos procesos que se pueden utilizar solos o en combinación, tales como la oxidación, coprecipitación* y adsorción* en flóculos, tratamiento con cal, adsorción* sobre superficies adecuadas, uso de resinas de intercambio iónico y las tecnologías de membrana. La mayoría de ellas son tecnologías seguras y fáciles de aplicar para la remoción de As en las plantas de tratamiento a gran y mediana escala de servicios centralizados. Un resumen de estos procedimientos es el siguiente:

- **Adsorción***

El As puede ser adsorbido en la superficie de varios adsorbentes que pueden estar basados en alúmina activada, en adsorbentes con hierro y otros óxidos (óxidos/hidróxidos de hierro, dióxido de titanio, óxido de cerio), o bien bauxita, hematita, feldespato, laterita, minerales arcillosos (bentonita, caolinita, etc.), carbón de hueso, material celulósico, etc.

- **Oxidación y reducción**

La oxidación es un paso necesario para transformar previamente las especies de As(III) en especies de As(V), más fácilmente removibles del agua. La simple aireación directa es lenta, pero puede acelerarse empleando un número de sustancias químicas como cloro gaseoso, hipoclorito, ozono, permanganato, peróxido de hidrógeno, óxidos de manganeso o el reactivo de Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$). El permanganato de

potasio oxida eficazmente el arsenito* y puede ser un reactivo de bajo costo, ampliamente disponible y adecuado para los países en desarrollo. La radiación ultravioleta sola o con absorbentes de luz adecuados, como Dióxido de titanio (TiO₂), puede ser también una opción conveniente para la oxidación de As (III).

- **Precipitación**

Estos métodos aprovechan la insolubilidad de algunos compuestos inorgánicos de As, como el sulfuro de As(III), el arseniato* de calcio y el arseniato férrico, para eliminar As del agua. Mediante la adición de sales de calcio, magnesio, manganeso(II) o hierro(III) a soluciones de As(V), se obtienen sólidos que contienen As, los que pueden separarse por sedimentación o filtración.

- **Coagulación* y filtración**

Es la tecnología más recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la remoción de As y se utiliza comúnmente en Chile y EE.UU. El As que se elimina es el pentavalente, que se adsorbe formando coágulos que se retiran mediante filtración. Dado que la remoción de As(III) es menos eficiente que la de As(V) y que el agua puede contener ambas especies, se aconseja siempre incluir una etapa previa de oxidación, que se realiza generalmente con cloro. Los coagulantes más utilizados son el sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃), el policloruro de aluminio (PAC), y el cloruro de hierro (FeCl₃). La filtración es un paso necesario; usando filtros de arena, la eliminación de arseniato mejora a más del 96%. La tecnología de coagulación-filtración es simple, utiliza productos químicos comunes, los gastos de instalación son pequeños, y se puede aplicar fácilmente a grandes volúmenes de agua.

- **Procesos basados en membranas (ósmosis inversa/nanofiltración/ electrodiálisis)**

Una membrana semipermeable puede definirse como una película delgada que separa dos fases y actúa como una barrera selectiva para el transporte de materia, permitiendo el pasaje de agua, iones o moléculas pequeñas a través de ella. En la mayoría de las aplicaciones, el agua fluye a través de la membrana mediante una fuerza impulsora, como por ejemplo una corriente eléctrica continua (electrodiálisis, ED) o presiones elevadas (ósmosis inversa, OI, y nanofiltración, NF). De los procesos posibles, la NF o la OI, que utilizan membranas de alta presión, tienen tamaños de poro adecuados. La OI es una tecnología desalinizadora, no específica, que permite la remoción de As con más de un 95% de eficiencia.

Tecnologías emergentes [1,2,8]

En las últimas décadas, una gran cantidad de grupos científicos y tecnológicos se han dedicado a desarrollar nuevas tecnologías para la remoción de As, con el objeto de minimizar los costos de inversión, operación y mantenimiento (es decir, tecnologías de bajo costo) y simplificar el desarrollo tecnológico (es decir, sistemas de baja complejidad). Algunas de estas tecnologías no son más que la adaptación de los métodos convencionales como la coagulación-filtración y la adsorción*, con la utilización de materiales muy baratos (arena recubierta de hierro, ladrillos, limaduras de hierro, alúmina activada o carbón) para ser empleados a escala de comunidad o domiciliaria.

- **Métodos de adsorción* y de coagulación-floculación combinados**

Se han desarrollado o adaptado diferentes tecnologías para la remoción de As en agua de bebida para uso familiar que utilizan la secuencia oxidación, adsorción* y coagulación*, reduciendo la escala de los métodos convencionales utilizados en las plantas de tratamiento de agua.

- **Materiales geológicos como adsorbentes naturales y otros materiales de bajo costo**

La remediación con materiales geológicos naturales (suelos o sedimentos) es una solución emergente a nivel familiar para poblaciones de bajos recursos de asentamientos rurales aislados, especialmente si los materiales están disponibles localmente y la población puede aprovisionarse directamente. Se ensayaron varios minerales naturales ricos en Fe y Al tales como hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), goethita ($\alpha\text{-FeO(OH)}$), gibsita ($\gamma\text{-Al(OH)}_3$) y suelos o sedimentos incluyendo estos minerales (por ejemplo, oxisoles, laterita), piedra caliza autóctona (Soyatal), zeolitas recubiertas de hierro y minerales de arcilla (montmorillonita, bentonita). También se investigaron materiales basados en óxidos de hierro/manganeso, como la arena verde y otros minerales naturales. Una opción muy viable es el uso de filtros de arena simples para aguas subterráneas con concentraciones de As de hasta 400 $\mu\text{g/litro}$. Otros materiales de interés para pequeña escala son arena recubierta de óxido de hierro (IOCS), arena recubierta de dióxido de manganeso y partículas de piedra caliza cubierta por óxido de hierro.

- **Métodos biológicos**

Existe poca información publicada sobre el uso de remoción biológica de As de agua, aunque estos métodos presentan un gran potencial, debido a su compatibilidad ambiental y a la posible relación costo-efectividad. La actividad microbiana puede extraer, movilizar y retener As a través de sorción*, complejación*, coprecipitación* y procesos de oxidación-reducción.

En América Latina, se han ensayado diferentes materiales biológicos naturales de bajo costo como celulosa, hueso molido, juncias*, biomasa de sorgo y biomasa de residuos para determinar su capacidad en la remoción de As de agua. Se han desarrollado filtros usando una combinación de celulosa y carbón activado de lignito como adsorbentes. Se ha probado también biomasa activa de residuos con alto contenido de proteína fibrosa (ricas en queratina) obtenidos a partir de plumas de gallina. La fitofiltración, es decir, el uso de plantas para eliminar los contaminantes del agua, es otra tecnología emergente. La fitorremediación puede realizarse también utilizando especies de plantas con tolerancia al As. Las algas secas constituyen otro material que se está estudiando con este fin [6].

- **Sustitución de la fuente**

Si bien sustituir la fuente de provisión de agua por aquellas libres de As parecería una opción válida, aún deben realizarse enormes esfuerzos para llegar a la concreción de esta meta. Para ello, las opciones serían la búsqueda de agua subterránea con contenido menor (o nulo) de As, el tratamiento de agua superficial o la recolección de agua de lluvia. Por otra parte, perforar a profundidades mayores a 100 m es caro, y no puede ser llevada a cabo mediante las técnicas de percusión manuales localmente disponibles.

Estudios de remoción de arsénico realizados en el país [1]

En Argentina, la ósmosis inversa es uno de los métodos que más se han utilizado a partir de fines de la década de los 70, habiéndose instalado numerosas plantas, por ejemplo, en las provincias de Santa Fe, Córdoba, Buenos Aires y La Pampa.

En la provincia de Buenos Aires, los estudios que documentan la remoción de As son escasos. La implementación de sistemas que usan coagulación-adsorción como método de remoción centralizado o en hogares, el uso de adsorbentes comerciales en puntos de uso (POU) y plantas de OI en diferentes lugares de la provincia, tal como en Suipacha, son los únicos métodos identificados hasta el presente. Actualmente

(2020) hay 66 plantas de tratamiento instaladas en la provincia y otras 15 en alguna instancia de proyecto, construcción, etc. En relación a la tecnología implementada en las 66 unidades instaladas, 52 corresponden a OI, 11 a coagulación-floculación y 3 a unidades de nanofiltración. Con respecto a las unidades de OI, en 38 localidades se realiza la distribución por red, en 7 doble-red y en otras 7 la distribución es mediante bidones, marcando estos dos últimos sistemas de distribución una tendencia creciente. Otra experiencia es la implementación de POU basados en adsorción* sobre lechos fijos de hidróxido férrico sintético granular en cuatro localidades de Argentina, tres de ellas en la provincia de Buenos Aires (Junín, Suipacha y Chivilcoy).

Según nuestro conocimiento, los únicos resultados documentados son los de la compañía Agua y Saneamientos Argentinos (AySA), que instaló la mayor planta de tratamiento de agua por OI de Sudamérica y trata agua de pozo de las localidades de González Catán y Virrey del Pino, beneficiando a unos 400000 habitantes. En la provincia de Salta se instalaron en escuelas dispositivos de remoción de As basados en cartuchos rellenos de arena, materiales de hierro locales, lana de hierro y alambre de enfardar, así como nanopartículas de hierro comerciales.

Un método que utiliza la corrosión electroquímica de un lecho fijo de hierro metálico, fue desarrollado y aplicado en San Juan. El procedimiento es ideal para ser aplicado a pequeña escala y consiste en una cloración oxidativa, un paso por un lecho relleno de limaduras de hierro o de pequeñas piezas de hierro, acondicionamiento de los flóculos y filtración. Se obtuvieron remociones por encima del 90%.

La Universidad Nacional de Rosario patentó el proceso ArCIS, que utiliza un método de coagulación-adsorción* en flóculos de hidróxido de aluminio $[Al(OH)_3]$ empleando como coagulante el cloruro de polialuminio (PAC) o el cloruro férrico, seguido de una filtración doble: una primera prefiltración gruesa ascendente en mantos de grava y luego una filtración rápida final (<http://noticias-ambientales-argentina.blogspot.com/2015/06/la-unr-desarrolla-nuevo-metido-de.html>). Se instalaron plantas de remoción basadas en esta tecnología en Lezama, provincia de Buenos Aires donde se provee agua apta para el consumo humano a unos 5000 pobladores. Más tarde, varias plantas pequeñas y medianas con esta metodología se aplicaron con éxito en el país, para poblaciones con menos de 10000 habitantes [9].

En 2009, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina (INTI) desarrolló un modelo de intervención para el abatimiento de As en agua de bebida para comunidades con suministro de red pública de agua y pozos privados, que se aplicó en aguas subterráneas de Taco Pozo (Chaco) y de Lobos (Buenos Aires).

En la Universidad Nacional de La Plata (UNLaPlata), se vienen realizando tareas interdisciplinarias en los centros e institutos INREMI (Geología) CEQUINOR (Química), PLAPIMU (Tecnología) y LEMIT (Disposición de residuos del tratamiento), en una tecnología para la eliminación de As, simple y de bajo costo, en aguas conteniendo valores superiores a los recomendados por la OMS. Se trabaja en una alternativa de remoción de As que hace uso de especies minerales del país, en base al proceso de adsorción*, tipo "batch", empleando como adsorbentes, especies ricas en hierro. Se realizaron evaluaciones de depósitos minerales localizados en nueve provincias argentinas

En el INIFTA (UNLaPlata) se desarrolló una planta de tratamiento de aguas para la eliminación de As basada en el uso de hierro cerivalente.

La Universidad Nacional de Salta y el Instituto de Investigaciones para la Industria Química (INIQUI) de CONICET trabajan en remoción de As desde 2009. El sistema desarrollado se basa en la precipitación-filtración a través de un lecho de arena y utilizando distintos materiales de hierro (clavos, alambre, etc.) activados para generar una capa de oxihidróxidos* de hierro. En base a esto, se escalaron dos plantas de tratamiento ubicadas en dos escuelas de la región del Chaco salteño. Las plantas permiten una producción de 1000 litros diarios de agua, con un tenor de As inferior a 50 µg/litro.

Situación general de la provisión de agua potable en el país y propuestas alternativas

Las tecnologías de remoción de As que han sido probadas a escala real y en las que existe el know-how para su implementación, así como proveedores confiables, son la OI y el proceso de coagulación-adsorción-filtración. Las eficiencias que se pueden lograr con las tecnologías mencionadas dependen de la matriz del agua [9]. Si además de contener As, el agua es muy salina, la única solución disponible al presente es la OI. Por otra parte, si el agua contiene alta salinidad y concentraciones elevadas de Fe y Mn, será necesario implementar un proceso de remoción de esos metales, antes de la OI. Si el agua es superficial y con contenidos salinos altos, como ocurre en el caso del Río Salado (provincias de Santa Fe y Buenos Aires), será necesario implementar un proceso convencional de remoción de turbiedad y luego una OI. En general, se puede decir que es muy difícil lograr un suministro continuo de agua con concentraciones de As menores de 10 µg/litro. Por supuesto que todo dependerá de qué niveles de concentración se parta en el agua a tratar. Si se considera como una buena eficiencia una remoción del orden del 90%, sólo se podrá tratar agua con un máximo de 100 µg/litro.

En la provincia de Santa Fe, de los 373 servicios centralizados de agua que funcionan actualmente, sólo 17 se abastecen de aguas superficiales, las cuales requieren solamente un tratamiento de potabilización convencional, mientras que el resto se abastece de fuentes subterráneas de calidades diversas y concentraciones elevadas de As, mayormente en toda la franja Oeste de la misma. La Empresa Aguas Santafesinas S.A. abastece sólo a 15 localidades, y el resto está servido por municipios, comunas o cooperativas. Existen en Santa Fe 86 plantas de OI para proveer agua en bidones y 39 plantas de OI para distribución de agua por red. En las poblaciones en las que se han instalado pequeñas plantas de OI, se entrega agua en bidones a razón de 5 lt/habitante por día. La provisión de agua en bidones es una solución que permite proveer agua segura de calidad controlada por el Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ENRESS), que tiene a su cargo la supervisión de la calidad. Esta misma solución se ha implementado en otras provincias, como La Pampa [9].

Para solucionar el problema en forma definitiva, el gobierno de Santa Fe ha diseñado un sistema provincial compuesto por 12 acueductos que prevé llevar agua tratada desde el río Paraná hasta prácticamente todas las localidades de la provincia. En la provincia del Chaco también se encaró un proyecto de tres acueductos, de los cuales uno está en ejecución, con aproximadamente 500 Km de longitud, que proveerá agua potable desde el río Paraná a 26 localidades del interior de la provincia. Por sus dimensiones, es la obra más importante en América Latina y abastecerá a 380 mil chaqueños.

En la provincia de Salta, se ha construido un acueducto en la región de la Puna, que permitirá reemplazar la fuente actual de agua para potabilización del pueblo de San Antonio de los Cobres.

Ante la necesidad de cumplir con normativas más exigentes respecto a la calidad del agua, surge como alternativa la construcción de redes dobles, una red que transporte agua potable y otra que transporte agua para otros usos. De esta manera, la planta de tratamiento sólo debe tratar una parte del caudal a suministrar, con la consiguiente disminución de costos de construcción y operativos.

De acuerdo a los lineamientos de la OMS, en algunas localidades de países desarrollados se ha provisto un suministro adicional de cañería para casas y edificios de una fuente alternativa de agua no potable, con lo que se crea un suministro de redes dobles. El objetivo es reducir el uso de agua de alta calidad para emplearla en baños, lavado de ropa, riego o simplemente para conservar recursos de agua escasos.

Existen experiencias exitosas que funcionan desde hace muchos años en Jovita, Córdoba (5000 habitantes) y en San Guillermo (7800 habitantes), Santa Fe.

En la provincia de Buenos Aires, mediante el Plan Cuidar, llevado adelante por el Servicio Provincial de Agua Potable Rural, se implementó la doble red en aproximadamente 20 localidades con poblaciones menores a 1000 habitantes.

Tratamiento de residuos de arsénico

Las tecnologías para la remoción de As generan residuos como consecuencia de las operaciones de coagulación*, floculación* y sedimentación, así como del lavado ascendente de los filtros y, en menor grado, de la presedimentación del agua sin tratar, del ablandamiento con cal-soda, de los coadyuvantes de la coagulación*, o de la regeneración de las unidades de intercambio iónico. En general, estos residuos son estables o no putrescibles y, por lo tanto, se retiran o descargan de modo intermitente más que de forma continua. Por su parte, los sistemas de membranas originan gran cantidad de agua de rechazo. Para que un método funcione, se necesita una evaluación cuidadosa de las características de la calidad del agua, a qué valores de concentración de As se quiere llegar, la factibilidad de implementación de un sistema de remoción de As ya existente y probado, y las opciones de gestión de los residuos producidos. Aunque en América Latina están disponibles varias tecnologías de remoción, es urgente desarrollar tecnologías y métodos con foco particular en las operaciones rurales a pequeña escala [1].

Referencias (Segunda parte)

- 1- Litter, M.I. (Coordinadora de grupo *Ad Hoc*). Arsénico en agua. Informe Final. RSA-CONICET (2018).
- 2- Marta Litter. La problemática del arsénico en América Latina. Seminario. Seminario CNEA-CONICET-UNSAM (2018).
- 3- Sigrist, Mirna. (2009). Metodologías combinadas de análisis en línea. Estudios de especiación de arsénico inorgánico en aguas subterráneas. (Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales). Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n4520 Sigrist.

- 4- Höll, W.; Litter, M.I. Ocurrencia y química del arsénico en aguas. Sumario de tecnologías de remoción de arsénico de aguas. En: Litter, M.I.; Sancha, A.M.; Ingallinella, A.M. (Eds.), Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas. Editorial Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. pp. 17-31 (2010).
- 5- J. d'Hiriart, M. del V. Hidalgo, M.G.García, M.I.Litter, M.A.Blesa. Arsenic removal by solar oxidation in groundwater of Los Pereyra, Tucuman province, Argentina. Chapter 67 (pp 615-624). En el libro: Arsenic in natural groundwater of Latin America. Occurrence, health impact and remediation. Balkema Publisher, Lisse, The Netherlands. Vol. 1 (2009).
- 6- M.E.Morgada de Boggio, I:K:Levy, M.Mateu and M.I.Litter. Low-cost technologies for arsenic removal in the Chaco-Pampean plain, Argentina. Chapter 73 (pp 677-683). En el libro: Arsenic in natural groundwater of Latin America. Occurrence, health impact and remediation. Balkema Publisher, Lisse, The Netherlands. Vol. 1 (2009).
- 7- Colcombet P. Un grupo de estudiantes creó un filtro para tratar el agua con arsénico. Diario La Nación, pág. 22 (23/04/2019).
- 8- Marta Litter, Maria A. Armienta, Ruth E. Villanueva Estrada, Edda C. Villamil Lepori and Valentina Olmos. Arsenic in Latin America: Part II. En el libro: Arsenic in drinking water and Food. Sudhakar Srivastava (Ed.). Springer Nature Singapore Pte. Ltd., pp. 113-182 (2020). Disponible en : <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8587-2>.
- 9- Penradee Chanpiwat, Suthipong Stiannopkao, Myoung-Soo Ko and Kyoung-Woong Kim. Global market and field studies of arsenic accumulation in rice. En el libro: Arsenic in drinking water and Food. Sudhakar Srivastava (Ed.). Springer Nature Singapore Pte. Ltd., pp. 235-260 (2020). Disponible en : <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8587-2>.
- 10- Natasha Das, Surajit Bhattacharya and Mrinal K. Maiti. Biotechnological strategies to reduce arsenic content in rice. En el libro: Arsenic in drinking water and Food. Sudhakar Srivastava (Ed.). Springer Nature Singapore Pte. Ltd., pp. 445-458 (2020). Disponible en : <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8587-2>.

***Glosario (Segunda parte)**

Adsorción: fenómeno por el cual un sólido o un líquido atrae y retiene en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos.

Arseniato: compuesto que contiene el ion arsenato $[\text{AsO}_4]^{3-}$ o cualquiera de las sales del ácido arsénico $[\text{H}_3\text{AsO}_4]$.

Arsenito: sal formada por la combinación del ácido arsenioso con una base, siendo el ácido arsenioso un compuesto inorgánico de arsénico con la fórmula $\text{As}(\text{OH})_3$. Una base (también denominada álcali) es una sustancia que presenta propiedades alcalinas. En disolución acuosa aporta iones al medio.

Arcillas activadas: arcillas coloidales seleccionadas y activadas según su destino por medio de un producto alcalino o ácido, desecadas y trituradas. Se trata de arcillas que se han sometido a un proceso por medio del cual se convierten en una fase sólida capaz de absorber partículas.

Citratos: sales del ácido cítrico, buenas reguladores de acidez.

Complejación: reacciones en las que un metal o ion central se une con sustancias llamadas ligandos, formando complejos o compuestos de coordinación.

Coadyudante: que colabora, auxilia, coopera.

Coprecipitación: proceso por el cual una especie que normalmente es soluble se separa de la solución durante la formación de un precipitado. En la coprecipitación los compuestos que habitualmente son solubles, resultan arrastrados en la formación de un precipitado.

Fe cerovalente: polvo de hierro de alta calidad y pureza para tratamiento de agua y otras aplicaciones de remediación de suelos. El hierro cerovalente (ZVI) es un material emergente cada vez más utilizado para el tratamiento de diversos contaminantes, particularmente metales tóxicos.

Floculación: proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

Fotocatálisis: reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato.

Fuente antropogénica: que tiene origen en la actividad humana.

Hidróxidos: compuestos químicos, formado por un metal y aniones hidroxilos (OH⁻¹).

Juncias: planta herbácea de la familia ciperáceas (*Cyperus longus*), olorosa y medicinal.

Metaloides: elementos químicos.

Oxianión: anión que contiene oxígeno. La mayoría de los elementos pueden formar oxianiones.

Oxihidróxido: compuesto químico formado por un metal, oxígeno y grupos (OH).

Pentavalente: compuesto químico que puede retener o sustituir cinco átomos de hidrógeno por cada átomo suyo.

pH (potencial hidrógeno): es una medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución o sustancia.

Potencial redox: es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones.

Sorción: proceso mediante el cual un material es absorbido por otro;incluyelasoperaciones de absorción,adsorción*,intercambioiónico y diálisis.

Trivalente: que participa en reacciones químicas con tres valencias.

Agradecimientos

Los autores agradecen a *Ing. Norberto Tscheiller, Dra. Marta Litter, Dra Mirna Sigrist, Dra María Alejandra Maine y Bioq Laura Modini* por su aporte en bibliografía sobre el tema del presente Consenso.
