

Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica

Potential natural low-cost adsorbents for the removal of arsenic in drinking water in Costa Rica

Andrea Acuña-Piedra¹, Andrés Araya-Obando²,
Luis G. Romero-Esquivel³

Fecha de recepción: 5 de mayo de 2016
Fecha de aprobación: 26 de agosto de 2016

Acuña-Piedra, A; Araya-Obando, A; Romero-Esquivel, L.
Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Número Especial Estudiantes 3. Pág 23-34.
DOI: 10.18845/tm.v29i6.2899



- 1 Estudiante de Ingeniería Ambiental. Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: aandrea26049@gmail.com
- 2 Investigador de la Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Teléfono (506) 2550-2311. Correo electrónico: jobando@itcr.ac.cr
- 3 Investigador de la Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Teléfono (506) 2550-2568, correo: lromero@itcr.ac.cr

Palabras clave

Arsénico; tratamiento de agua; adsorción; adsorbentes naturales.

Resumen

El arsénico presente en agua puede llegar a causar serios problemas en la salud de los consumidores. En Costa Rica, se han identificado aguas de consumo humano con concentraciones mayores al límite permitido (10 µg/L). La adsorción del arsénico por un material adsorbente ha sido utilizada en otros países con éxito. Para ello, se han utilizado gran variedad de materiales adsorbentes sintéticos, naturales o subproductos de procesos industriales o agrícolas. Los adsorbentes sintéticos, por lo general, presentan alta capacidad de adsorción pero representan altos costos adquisitivos, contrariamente a los materiales naturales y de residuos de procesos que aunque tienen capacidades de adsorción menores, son más baratos y se encuentran más fácilmente. En el marco del contexto en mención, se presenta un análisis de las opciones de materiales naturales de origen local y de bajo costo adquisitivo, con un contenido relativamente alto de óxidos de hierro, aluminio y titanio, que podrían ser utilizados para remover arsénico del agua. Los materiales identificados son biotita, piedra caliza, diatomita, arenas ricas en magnetita y rocas piroclásticas de composición basáltica. Todos esos materiales son originarios de la zona de Guanacaste, afectada por la presencia de arsénico en agua.

Keywords

Arsenic; water treatment; adsorption; natural adsorbents; Costa Rica.

Abstract

Arsenic in water can lead to serious health problems for consumers. In Costa Rica, concentrations higher than the allowable limit (10 µg/L) have been identified in water for human consumption. The adsorption of arsenic on an adsorbent material has been used successfully in other countries for arsenic removal. To do this, a large variety of synthetic or natural products of industrial or agricultural processes are available as adsorbent materials. The synthetic adsorbents usually have high adsorption capacities but represent higher purchasing costs, contrary to natural materials and processes waste, which are cheaper and easier to find; nevertheless, they have a lower adsorption capacity. Within this context, an analysis of local options for natural materials at low cost is presented. They are materials with a relatively high content of iron oxides, aluminum and titanium, that could be used to remove arsenic from water. The identified materials are biotite, limestone, diatomite, magnetite enriched sands and pyroclastic rocks of basaltic composition. All these materials originate in the area of Guanacaste, affected by presence of arsenic in water.

Introducción

La presencia de arsénico en aguas de consumo humano ha afectado aproximadamente a 200 millones de personas en el mundo (Baig, Sheng, Hu & Xu, 2013). La incidencia de enfermedades está asociada con daños como hiperqueratosis, callosidades en las extremidades, lesiones cutáneas, afecciones cardiovasculares, diabetes mellitus, desórdenes neurológicos e hipertensión, entre otros (Centeno, Tseng, Van der Voet & Finkelman, 2007). Debido a esto, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han establecido un límite máximo

permisible de 10 µg/L (Henke, 2009; Cáceres, 2007). En el caso de Costa Rica, la presencia de arsénico en el agua en concentraciones mayores a ese límite se detectó desde el año 2009. Las regiones afectadas han sido los cantones de Bagaces y Cañas, en conjunto con los distritos de Aguas Zarcas y Los Chiles en la zona norte del país (AyA, 2013). En total, 12 000 personas de 23 comunidades se han visto perjudicadas (Astorga, 2013). Entre las medidas que se han tomado para atender esta situación están la interconexión con fuentes no contaminadas, el suministro de agua por medio de camiones cisterna y la instalación de filtros Kanchan (AyA, 2013). Por otra parte, a la fecha se han instalado 6 plantas de tratamiento, las cuales cuentan con lechos de adsorción que utilizan como adsorbente el dióxido de titanio.

En Latinoamérica en las últimas décadas, se ha reconocido la necesidad de implementar tecnologías para remover el arsénico, utilizando recursos naturales y locales de las zonas afectadas junto a técnicas de bajo costo, fáciles de manejar y que puedan ser mantenidas por la población local (Bundschuh et al., 2010). Current information about the contamination of ground- and surface-water resources by arsenic from geogenic sources in Latin America is presented together with possible emerging mitigation solutions. The problem is of the same order of magnitude as other world regions, such as SE Asia, but it is often not described in English. Despite the studies undertaken by numerous local researchers, and the identification of proven treatment methods for the specific water conditions encountered, no technologies have been commercialized due to a current lack of funding and technical assistance. Emerging, low-cost technologies to mitigate the problem of arsenic in drinking water resources that are suitable for rural and urban areas lacking centralized water supplies have been evaluated. The technologies generally use simple and low-cost equipment that can easily be handled and maintained by the local population. Experiences comprise (i. Materiales naturales ricos en hierro, aluminio y titanio se han caracterizado por ser buenos adsorbentes de arsénico (Litter et al., 2010), al mismo tiempo que representan un bajo costo por su fácil obtención. Según la revisión bibliográfica realizada por los autores de este artículo, en Costa Rica hasta la fecha no se han realizado estudios de adsorbentes naturales para la remoción de arsénico, provenientes de las zonas afectadas, ya que solo se ha trabajado con materiales sintéticos o bien naturales, pero no con las características anteriormente mencionadas. El objetivo del presente artículo es mostrar una serie de potenciales adsorbentes naturales de bajo costo, provenientes de las regiones afectadas de Costa Rica, como posibles opciones para remover arsénico del agua.

Tecnologías para la remoción de arsénico del agua

Existe una gran cantidad de tecnologías para remover el arsénico del agua: coagulación/floculación, oxidación/precipitación, filtración con membranas, resinas de intercambio iónico, tecnologías fotoquímicas y adsorción (Feenstra, Erkel & Vasak, 2007; Jain & Singh, 2012; Litter, Morgada & Bundschuh, 2010). No obstante, a pesar de que la mayoría de los problemas relacionados con el arsénico en Latinoamérica han sido solucionados, especialmente en áreas urbanas o en sitios con acceso a sistemas centralizados, la mayoría de estas tecnologías son costosas y sofisticadas (Litter et al., 2012).

Durante el proceso de selección de tecnología, se debe tomar en cuenta i) la incidencia de enfermedades crónicas, ii) la concentración y especialización del arsénico, iii) la composición y el volumen de agua por tratar, iv) el tamaño de la estructura en función de las eficiencias esperadas, y finalmente, v) la complejidad de la instalación y el mantenimiento de la infraestructura (Litter et al., 2010; Sorensen & McBean, 2015). Actualmente se dan casos de negligencia en el uso de este tipo de tecnologías, rechazo o abandono, en países en desarrollo, lo cual evidencia que existen otra serie de criterios que no siempre son considerados y que posiblemente determinan el éxito o el fracaso en su aplicación. Dentro de los criterios no considerados se encuentra el

hecho de que muchas veces las unidades de tratamiento requieren un monitoreo muy sensible y arreglos de mantenimiento que van más allá del alcance económico. Además, el volumen, el manejo y la disposición final de los desechos generados deben ser considerados (Sorensen & McBean, 2015). Intervienen también una serie de factores culturales y políticos que juegan un papel importante en la implementación de las tecnologías para la remoción de arsénico, desde asuntos de participación comunitaria hasta cambios en las propiedades organolépticas del agua, entre otros.

En síntesis, una tecnología es considerada adecuada y sostenible bajo los siguientes criterios: i) se utiliza equipo a pequeña escala; ii) es accesible para una población de bajos recursos; iii) el diseño es simple, por lo que la instalación y el mantenimiento pueden estar a cargo de los actores locales; iv) se utilizan energías renovables como la luz solar, y, finalmente, v) se utilizan materiales locales, por lo que no hay que transportar insumos largas distancias (Bundschuh et al., 2010; Sorensen & McBean, 2015) it has become apparent that appropriate technology is often insufficient to create lasting water infrastructure. Specifically, low sustainability of household Arsenic\Iron Removal Plants (AIRPs). Por ello, la posibilidad de emplear las técnicas de adsorción mediante adsorbentes de bajo costo y adsorbentes naturales es muy alta en Costa Rica.

Remoción de arsénico basada en adsorción

El proceso de adsorción del arsénico consiste en que especies iónicas de arsénico (adsorbato) presentes en el agua se acumulan en la superficie de un sólido (adsorbente). Inicialmente, el arsénico entra en contacto con la superficie del adsorbente; seguidamente se difunde por los poros del material y finalmente el arsénico entra en los espacios capilares y los bordes de los poros (Holl & Litter, 2010). Según Henke (2009), Mohan & Pittman (2007) y Feenstra, Erkel, & Vasa (2007), la principal ventaja de la adsorción son el buen conocimiento que se tiene del método y de su funcionamiento, además de que ya se han estudiado y desarrollado diversos materiales adsorbentes que remueven exitosamente el arsénico del agua. Dichos autores concuerdan en que, en general, tanto la puesta en práctica del método como su sostenimiento son de bajo costo; no obstante, hay que considerar que este depende del tipo de adsorbente utilizado. Los mismos estudios señalan algunas desventajas, tales como la interferencia en el proceso de sustancias presentes en el agua y de variaciones del pH, lo que requiere un adecuado ajuste. Además, como en la mayoría de las tecnologías, la generación de residuos sólidos o líquidos con arsénico, cuando una vez que el adsorbente está saturado, se debe eliminar o regenerar este.

Tipos de adsorbentes

Existe una gran variedad de materiales adsorbentes que han sido estudiados, algunos de origen sintético, otros de origen natural, así como otros provenientes de residuos de procesos. Tanto las características físicas del material como el volumen y diámetro de los poros, así como el área específica y la textura del adsorbente influyen en gran medida, ya que el proceso de adsorción se da en la superficie de los materiales (Holl & Litter, 2010). Los compuestos presentes en el adsorbente van a determinar la carga de la superficie de este mismo. Adsorbentes ricos en óxidos/hidróxidos de metales, por lo general, se encuentran cargados positivamente, por lo que pueden atraer hacia su superficie los compuestos de arsénico con carga negativa (Clifford, 1999; Glocheux, Pasarín, Albadarin, Allen & Walker, 2013)

Adsorbentes sintéticos

Algunos adsorbentes sintéticos se pueden encontrar en el comercio, mientras que otros solo han sido probados en el laboratorio. El cuadro 1 muestra diversos materiales sintéticos estudiados, así como sus características de adsorción. Se presentan como materiales sintéticos no solo los elaborados artificialmente, sino también aquellos materiales naturales que han sido modificados. Estos materiales se han estudiado para la adsorción de As (V) y en su mayoría se han obtenido pH idóneos, en un rango de 7,4 - 6,5. La mayoría presentan como componente principal hierro o aluminio; esto ocasiona que, como se mencionó anteriormente, la superficie del adsorbente contenga una carga positiva, atrayendo los compuestos aniónicos del As (V). En el común de los casos se usan partículas generalmente mayores a 0,3 mm y la remoción es mayor al 85%.

Adsorbentes naturales de bajo costo

Los adsorbentes naturales representan un bajo costo si están disponibles localmente y son accesibles para la población local. Son considerados una solución emergente para poblaciones de escasos recursos por el hecho del bajo costo de los materiales, comparado con el de los materiales sintéticos, los cuales constituyen muchas veces la única opción (Bundschuh et al., 2010). No obstante, pueden significar las siguientes desventajas: eficiencia muy variable; alta generación de residuos debido a la baja capacidad de adsorción, comparada con la de los materiales sintéticos; posible crecimiento de microorganismos, y dependencia de las características del agua por tratar. Dentro de las ventajas están que pueden ser aplicados tanto en soluciones individuales como en sistemas comunitarios; además, que la operación y el mantenimiento son más sencillos, ya que no se requiere adicionar químicos, junto con el hecho de que pueden ser modificados para incrementar la eficiencia, tal como se mencionó anteriormente. El cuadro 2 resume algunos de los estudios sobre materiales naturales utilizados en la adsorción de As (V) en agua. Muchos de estos materiales presentan un alto contenido en óxidos metálicos de hierro y aluminio. Al comparar el cuadro 2 con el cuadro 1 se observa una menor capacidad de adsorción en algunos casos de un orden de magnitud de 1 o más. Otra diferencia importante es que la mayoría de estos materiales presentan tamaños de partícula mucho menores de 1 mm de diámetro, por lo que su mejor forma de aplicación es en polvo, o en su defecto, se necesita algún proceso de granulación.

Adsorbentes potenciales naturales de arsénico procedentes de Costa Rica

Tal y como se observa en los cuadros 1 y 2, los adsorbentes ricos en óxidos e hidróxidos de hierro, aluminio y titanio han resultado ser los más eficientes en la remoción del arsénico en agua. En este sentido, después de entrevistar a varios geólogos y consultar la literatura disponible, se preseleccionaron cinco materiales ubicados en la región Guanacasteca, los cuales presentan concentraciones altas de estos compuestos. En el cuadro 3 se resumen las características de esos materiales, la biotita, el basalto, la diatomita, la magnetita y la piedra caliza. La figura 1 muestra las zonas afectadas por problemas de arsénico en agua, así como los lugares donde se encuentran disponibles los posibles materiales adsorbentes seleccionados; por tanto, si después de ensayos de laboratorio, alguno de esos materiales presenta una adsorción apropiada, se estaría contando con un material de origen local para la remoción de arsénico.

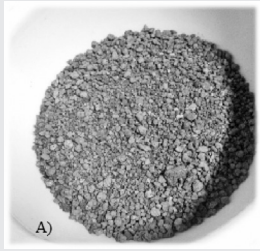
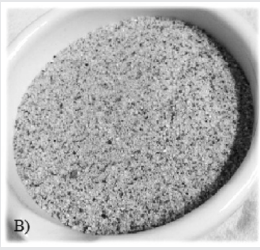

Cuadro 1.- Materiales sintéticos y sus características de adsorción

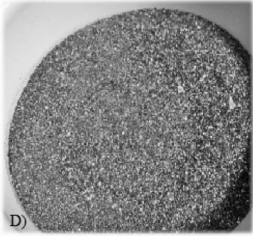

Material	Capacidad de adsorción ($\mu\text{g/g}$)	Concentración inicial ($\mu\text{g/L}$)	Porcentaje remoción (%)	pH	Tamaño de partícula (mm)	Referencia
Hidróxido de hierro granular	8000	100 μg	~100	6,5	2-0,6	(Badruzzaman, Westerhoff & Knappe, 2004)
Hidróxido de hierro granular	8000	100	~100	7	0,6-0,25	(Badruzzaman, Westerhoff & Knappe, 2004)
Laterita acidificada con ácido sulfúrico	923,6	250 – 5000	~100	No mayor a 7,4	<0,075	(Glocheux, Méndez, Albadarin, Allen & Walker, 2013)
Arena cubierta con óxido de hierro	18,3	325	92,00	No mayor a 7,4	0,6-0,8	(Thirunavukkarasu et al., 2001)
Lodo rojo activado con tratamiento de ácido	942	2500- 30 000	>99,80	3,5	<0,075	(Altundogan, Altundogan, Tümen & Bildik, 2002)
Arena cubierta con hierro	~8500	1600	>85	7,2	1,8-4	(Petruzevski, Boere, Shahidullah, Sharma & Schippers, 2002)
Carbón activado granular impregnado con hierro	~5000	1600	>85	7,2	1,07	(Petruzevski et al., 2002)
Hidróxido de hierro granular (a 20 $^{\circ}\text{C}$)	~1700	100	95-99	6,5	0,32-2	(Banerjee et al., 2008)very little information is available on the kinetics and thermodynamic aspects of adsorption of arsenic compounds onto other iron oxide-based adsorbents as well. In order to gain an understanding of the adsorption process kinetics, a detailed study was conducted in a controlled batch system. The effects of temperature and pH on the adsorption rates of arsenic (V
Hidróxido de hierro granular (a 30 $^{\circ}\text{C}$)	~2000	100	95-99	6,5	0,32-2	(Banerjee et al., 2008)very little information is available on the kinetics and thermodynamic aspects of adsorption of arsenic compounds onto other iron oxide-based adsorbents as well. In order to gain an understanding of the adsorption process kinetics, a detailed study was conducted in a controlled batch system. The effects of temperature and pH on the adsorption rates of arsenic (V
Pómez cubierta de óxido de hierro	~7500	4300	-	6,8	0,8-1,5	(Sylvie, 2007)
Pómez cubierta de aluminio	-	250	71	7,0	0,3	(Nasseri & Heidari, 2012)

Cuadro 2. Materiales naturales de bajo costo y sus características de adsorción

Material	Capacidad de adsorción (µg/g)	Concentración inicial (µg/L)	Porcentaje remoción (%)	pH	Tamaño de partícula (mm)	Referencia
Laterita natural	301,2	250 – 5000	-	7,0	<0,075	(Glocheux et al., 2013)
Ferrhidrita	285,0	325	87,00	7,4	-	(Thirunavukkarasu, Viraraghavan & Subramanian, 2001)
Lodo rojo natural	513,0	-	>99,80	-	<0,075	(Altundogan, Altundogan Tümen, & Bildik, 2002)
Geotita	12400,0	10 000- 1 000 000	~100,00	5,5	<0,037	(Ladeira & Ciminelli, 2004)
Gibbsita	4600 ,0	10000- 1 000 000	~100,00	5,5	<0,037	(Ladeira & Ciminelli, 2004)
Oxisol	3200 ,0	10000- 1 000 000	~100,00	5,5	<0,037	(Ladeira & Ciminelli, 2004)
Kaolita	230,0	10000- 1 000 000	-	5,5	<0,037	(Ladeira & Ciminelli, 2004)
Turba natural	~0	5000- 300 000	-	-	-	(Ansonne, Klavins & Viksna, 2013)
Cenizas volátiles de carbón	-	800	81,10 -95,00	6 y 8	-	(Wang & Tsang, 2013)
Cemento hidratado	1920,0	1000	97,00	7	1,4-3	(Bibi, Farooqi, Hussain, & Haider, 2015)
Polvo de mármol	40,0	1000	96,40	7	0,05	(Bibi et al., 2015)
Polvo de ladrillo	40,0	1000	95,30	8	<0,3	(Bibi et al., 2015)
Magnetita	6,614	1500	93,33	6,5	0,1	(Kumwenda, 2009)
Magnetita	243	3700	-	8	12 nm	(Yean et al., 2005)
Magnetita	0,965	500	-	6,1	-	(Mayo et al., 2007)

Cuadro 3.- Adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica

Nombre	Coordenadas Lambert Norte	Descripción	Fotografía
Basalto	X= 420027.80 Y= 272734.12	<p>Según Denyer & Kussmaul (Denyer & Kussmaul, 2000), los basaltos son rocas ígneas muy variadas, de acuerdo a su composición química. Se pueden encontrar de tipo toleítico en la Península de Nicoya y en la Cordillera de Tilarán. Según su recopilación, el basalto toleítico presente en el Complejo de Nicoya contiene 48,1% de SiO₂; 1,1% de TiO₂; 13,3% de Al₂O₃; 0,1% de MnO, y para el caso del hierro, 7,6% de FeO y 3,2% de Fe₂O₃. Alvarado, Pérez, Vogel, Gröger & Patiño (2011) asymmetric, isolated Pleistocene pyroclastic cone, located in front of the Cordillera de Guanacaste, in northern Costa Rica. The cone consists of ~0.09km³ of basaltic tephra, as well as ~0.14km³ of lateral lava flows. Tephrae are tholeiitic, high-alumina, olivine basalts, and represent minor degrees (10-20%) en su estudio específico sobre el Cerro Chopo (Coronación, Anunciación o Asunción), ubicado en la Cordillera de Guanacaste (ver figura 2), determinaron que el cerro presenta un alto contenido de basaltos toleíticos. Además, según los análisis de sus estudios, la composición promedio en FeO en el cerro es de 9,24%, mientras que la de SiO₂ es de 48,34% y la de Al₂O₃ de 18,05%. El color rojo del cerro se debe al contenido de óxidos de hierro (Mora, 1997).</p>	
Biotita	X=370356.51 Y=307702.14	<p>Es un aluminio-silicato hidratado de potasio, magnesio y hierro, (AlSi₃O₁₀), K, (MgFe)₃ y (OH)₂ (Denyer & Kussmaul, 2000). Estudios sobre biotita han demostrado que esta cuenta con aproximadamente 20% de FeO, entre un 3 y un 4% de TiO₂, alrededor de un 15% de Al₂O₃ y un 0,4% de MnO (Dopico, López, Wemmer & Rapalini, 2013). Es común encontrarla en la Formación de Liberia, la cual está a los pies del volcán Rincón de La Vieja, en la vertiente occidental de la Cordillera de Guanacaste (Losilla, Rodríguez, Schosinsky & Bethune, 2001). Es especialmente abundante en las tobas blancas de los alrededores de Liberia (Denyer & Kussmaul, 2000).</p>	
Piedra caliza	X=352686.09 Y=280951.23	<p>La piedra caliza se compone principalmente de carbonato de calcio (calcita) CaCO₃. Comúnmente se hayan impurezas de sílice, arcilla o arena, y cantidades menores de fosfato, hierro, manganeso y materia carbonácea (Guerrero, 2001). La caliza contiene aproximadamente 4% de materiales insolubles, de los cuales la octava parte corresponde a hierro (Guerrero, 2001). La calcita ha sido estudiada como adsorbente de arsénico, As (V), y se han demostrado buenos resultados en la remoción de este, los cuales han alcanzado una capacidad de adsorción en su área de 18,73 µg/m² (Sø, Postma, Jakobsen & Larsen, 2008). Es un tipo de roca muy común en Costa Rica, con reservas abundantes en la Península de Santa Elena, Turrialba y el sur del Valle Central (Denyer & Kussmaul, 2000). En el sector de Guanacaste se puede encontrar en Nicoya, Loma Camastro, Cañas Dulces, Bagaces, Los Ángeles y Líbano.</p>	

Nombre	Coordenadas Lambert Norte	Descripción	Fotografía
Magnetita	X=354594.34 Y=285656.62	<p>La magnetita es un óxido de hierro (Fe_3O_4); se puede encontrar en rocas y arenas (Kumwenda, 2009). La magnetita contiene entre un 10 y un 25% de TiO_2 (Denyer & Kussmaul, 2000). Estudios realizados de arenas de Playa Caldera indican que la fracción de magnetita es de un 33,4%, mientras que la de TiO_2, de un 8,74% (Singer, Page, Bagby, Cox & Ludington, 1990). Se ha trabajado con magnetita en tamaños nanométricos, para remover arsénico. Con un tamaño de 12 nm, se lograron capacidades de adsorción de hasta 243 $\mu\text{g/g}$ (Yean et al., 2005). Sin embargo, con magnetita de tamaño natural, las capacidades de adsorción bajaron hasta 0,992 $\mu\text{g/g}$ (Kumwenda, 2009). En Costa Rica, las mayores acumulaciones de magnetita se ubican en algunas playas del Pacífico y del Caribe, principalmente en las playas al norte de la península de Nicoya, entre Caldera y Tárcoles, y entre Cahuita y Puerto Viejo (Denyer & Kussmaul, 2000).</p>	
Diatomita	X=372145.96 Y=310210.03	<p>Es una roca sedimentaria silíceo, compuesta de hierro, aluminio, amonio, metales alcalinos, y otros constituyentes menores (Vargas, n.d.)²⁵⁽¹⁻²⁾. Contiene un porcentaje de Fe_2O_3 de 0,55%; además de 80,10% de SiO_2, y 10,30% de Al_2O_3, entre otros compuestos. La diatomita se caracteriza por su alta porosidad y permeabilidad, y su baja densidad, baja conductividad térmica, baja abrasión y amplia área de superficie (Denyer & Kussmaul, 2000). Uno de los principales usos es el de medio filtrante. La diatomita en polvo presenta espacios vacíos que permiten evitar el paso de partículas pequeñas, por lo que se usa en la filtración de jugos, cervezas, vinos y productos farmacéuticos (Mathers, 1989). Se puede aplicar como una capa de soporte a través de la cual el filtrado pasa, o bien se aplica directamente al líquido, donde el polvo se mezcla capturando las partículas y aclarándolo (Mathers, 1989). Ha sido probada en la remoción de metales pesados en baja concentración, dando buenos resultados en la adsorción de plata, plomo, cromo (III), zinc y níquel, por lo cual puede ser utilizada en tratamientos terciarios de aguas residuales (Vargas, n.d.)</p> <p>En Costa Rica se conocen trece depósitos y prospectos de diatomita, la mayoría en la zona norte del país, especialmente en Guanacaste (Denyer & Kussmaul, 2000). El depósito más grande se encuentra en Loma Castro, cerca de Cañas Dulces, donde la reserva se estima en 5,8 millones de toneladas (Denyer & Kussmaul, 2000; Vargas, n.d.)²⁵⁽¹⁻²⁾.</p>	

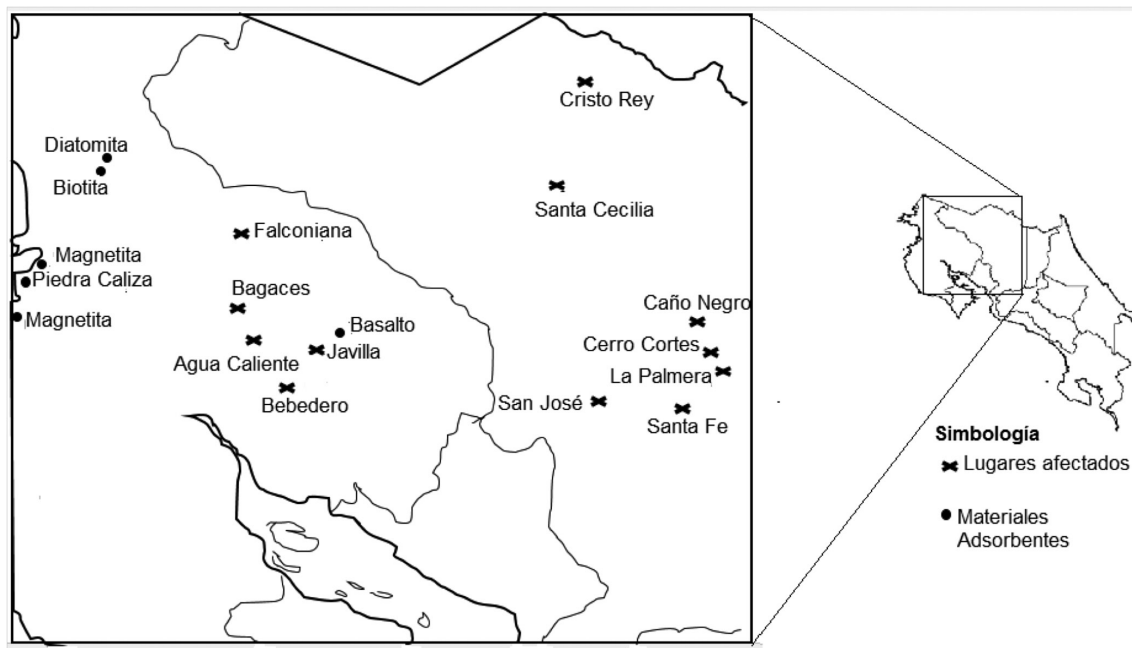


Figura 1. Comunidades afectadas por arsénico en agua, en Costa Rica, y ubicación de materiales potencialmente adsorbentes de arsénico

Conclusiones y recomendaciones

Materiales adsorbentes ricos en óxidos/hidróxidos de metales, principalmente de hierro, titanio y aluminio, pueden adsorber arsénico. Los adsorbentes sintéticos con esta composición suelen ser mejores adsorbentes que los naturales, no obstante, estos últimos son de menor costo económico y fáciles de conseguir.

La remoción de arsénico por medio de la técnica de adsorción con materiales naturales, locales y de bajo costo representa una opción viable y atractiva para solucionar el problema de las zonas afectadas en Costa Rica.

Cerca de las zonas afectadas por la contaminación de arsénico en agua, se pueden encontrar materiales naturales ricos principalmente en hierro, aluminio, manganeso y titanio, los cuales podrían ser utilizados como adsorbentes del arsénico.

La biotita, la diatomita, la magnetita, el basalto y la piedra caliza poseen el potencial de ser adsorbentes. Sin embargo, se deben de hacer estudios específicos para determinar su capacidad de adsorción y si pueden funcionar como buenos adsorbentes.

Bibliografía

- Alfaro, A. (2007). La tierra moler o “ diatomita ” como sistema de remoción de sustancias químicas en el laboratorio. *Ciencia y Tecnología*, 25: 83–96.
- Altundogan, H. S., Altundogan, S., Tümen, F. & Bildik, M. (2002). Arsenic adsorption from aqueous solutions by activated red mud. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 22(3): 357–63.
- Alvarado, G. E., Pérez, W., Vogel, T. A., Gröger, H. & Patiño, L. (2011). The Cerro Chopó basaltic cone (Costa Rica): An unusual completely reversed graded pyroclastic cone with abundant low vesiculated cannonball juvenile fragments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1-4): 163–177. doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.11.010

- Ansone, L., Klavins, M. & Viksna, A. (2013). Arsenic removal using natural biomaterial-based sorbents. *Environmental Geochemistry and Health*, 35(5): 633–42. doi:10.1007/s10653-013-9546-7
- Astorga, Y. (2013). *Decimonoveno Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*.
- y A. (2013). Avance respecto a la atención de sistemas de acueducto referido a la presencia de arsénico por sobre la norma nacional (Informe a Sala Constitucional). San José (pp. 1–40)
- Baig, S. A., Sheng, T., Hu, Y., Xu, J. & Xu, X. (2013). Arsenic removal from natural water using low cost granulated adsorbents: A review. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 50(9999), n/a–n/a. doi:10.1002/clen.201200466
- Banerjee, K., Amy, G. L., Prevost, M., Nour, S., Jekel, M., Gallagher, P. M. & Blumenschein, C. D. (2008). Kinetic and thermodynamic aspects of adsorption of arsenic onto granular ferric hydroxide (GFH). *Water Research*, 42(13): 3371–8. doi:10.1016/j.watres.2008.04.019
- Bibi, S., Farooqi, A., Hussain, K. & Haider, N. (2015). Evaluation of industrial based adsorbents for simultaneous removal of arsenic and fluoride from drinking water. *Journal of Cleaner Production*, 87: 882–896. doi:10.1016/j.jclepro.2014.09.030
- Bundschuh, J., Litter, M., Ciminelli, V. S. T., Morgada, M. E., Cornejo, L., Hoyos, S. G., ... Bhattacharya, P. (2010). Emerging mitigation needs and sustainable options for solving the arsenic problems of rural and isolated urban areas in Latin America - a critical analysis. *Water Research*, 44(19): 5828–45. doi:10.1016/j.watres.2010.04.001
- Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J.-S., ... Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: a review of history and occurrence from 14 countries. *The Science of the Total Environment*, 429: 2–35. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.06.024
- Cáceres, R. E. (2007). *Proceso en lecho fijo de hierro metálico para la eliminación de arsénico de aguas en pequeñas instalaciones*. Universidad Nacional de San Juan.
- Centeno, J., Tseng, C. & Finkelman, R. (2007). Global Impacts Of Geogenic Arsenic : A Medical Geology Research Case, *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 36(1): 78–81.
- Clifford, D. (1999). Ion exchange and inorganic adsorption. In R. Letterman (Ed.), *Water quality and treatment* (5th edit., pp. 9.1–9.91). New York: McGraw Hill. doi:10.1002/047147844X.pc1506
- Denyer, P. & Kussmaul, S. (2000). *Geología de Costa Rica*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Dopico, M., López, C., Wemmer, M. & Rapalini, K. (2013). Composición química de biotita y hornblenda y edades de enfriamiento como indicadores de las condiciones de emplazamiento del complejo plutónico La Esperanza (Pérmico Superior), Macizo Norpatagónico. *SciELO*.
- Feenstra, L. & Erkel, J. Van (2007). Arsenic in groundwater : Overview and evaluation of removal methods. *International Groundwater Resources Assessment Centre*, 1–23.
- Glocheux, Y., Méndez, M., Albadarin, A. B., Allen, S. J. & Walker, G. M. (2013). Removal of arsenic from groundwater by adsorption onto an acidified laterite by-product. *Chemical Engineering Journal*, 228: 565–574. doi:10.1016/j.cej.2013.05.043
- Guerrero, C. (2001). Rocas calizas: Formación, ciclo del carbonato, propiedades, aplicaciones, distribución y perspectivas en la Mixteca Oaxaqueña. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 5: 3–14.
- Henke, K. (2009). Arsenic: Environmental Chemistry, Health Threats and Waste Treatment . In *Arsenic: Environmental Chemistry, Health Threats and Waste Treatment* (pp. 545–568). University of Kentucky Center for Applied Energy Research, Kentucky.
- Holl, W. & Litter, M. (2010). Ocurrencia y química del arsénico en aguas. Sumario de tecnologías de remoción de arsénico en aguas. In M. Litter, A. Sancha & A. Ingallinella (Eds.), *IBEROARSEN Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas* (CYTED, pp. 17–27). Argentina.
- Jain, C. K. & Singh, R. D. (2012). Technological options for the removal of arsenic with special reference to South East Asia. *Journal of Environmental Management*, 107: 1–18. doi:10.1016/j.jenvman.2012.04.016
- Kumwenda, J. M. (2009). *Critical review of iron oxide based arsenic adsorbents*. UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- Ladeira, A. C. Q. & Ciminelli, V. S. T. V. S. T. (2004). Adsorption and desorption of arsenic on an oxisol and its constituents. *Water Research*, 38(8): 2087–94. doi:10.1016/j.watres.2004.02.002

- Litter, M. I., Alarcón-Herrera, M. T., Arenas, M. J., Armienta, M. A., Avilés, M., Cáceres, R. E. & Pérez-Carrera, A. (2012). Small-scale and household methods to remove arsenic from water for drinking purposes in Latin America. *The Science of the Total Environment*, 429: 107–22. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.05.004
- Litter, M. I., Morgada, M. E. & Bundschuh, J. (2010). Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 158(5): 1105–18. doi:10.1016/j.envpol.2010.01.028
- Losilla, M., Rodríguez, H., Schosinsky, G. & Bethune, D. (2001). *Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central*. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José.
- Mathers, S. (1989). Costa Rican diatomite: A review of existing knowledge and future potencial. *Revista Geología América Central*, 10: 3–17.
- Mayo, J. T., Yavuz, C., Yean, S., Cong, L., Shipley, H., Yu, W., ... Colvin, V. L. (2007). The effect of nanocrystalline magnetite size on arsenic removal. *Science and Technology of Advanced Materials*, 8(1-2): 71–75. doi:10.1016/j.stam.2006.10.005
- Mohan, D. & Pittman, C. U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2): 1–53. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.01.006
- Mora, S. (1997). Estudio geológico del Cerro Chopo. *Revista Geográfica de América Central*, 189–199.
- Nasseri, S. & Heidari, M. (2012). Evaluation and comparison of aluminum-coated pumice and zeolite in arsenic removal from water resources. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 1–7.
- Petrusevski, B., Boere, J., Shahidullah, S. M., Sharma, S. K., & Schippers, J. C. (2002). Adsorbent-based point-of-use system for arsenic removal in rural areas. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 135–144.
- Petrusevski, B., Sharma, S., Schippers, J. & Shordt, K. (2007). *Arsenic in Drinking Water*. International Water and Sanitation Centre, Delft
- Singer, D. A., Page, N., Bagby, W. C., Cox, D. P. & Ludington, S. (1990). Evaluación de los recursos minerales de Costa Rica. *Geología América Central*, 11: 1–25.
- Sø, H. U., Postma, D., Jakobsen, R. & Larsen, F. (2008). Sorption and desorption of arsenate and arsenite on calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(24): 5871–5884. doi:10.1016/j.gca.2008.09.023
- Sylvie, K. K. (2007). *Adsorptive Iron and Arsenic Removal with Iron Oxide Coated Pumice*. UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- Thirunavukkarasu, O. S., Viraraghavan, T., & Subramanian, K. S. (2001). Removal of Arsenic in Drinking Water by Iron Oxide-Coated Sand and Ferrihydrite – Batch Studies. *Water Quality Research*, 36: 55–70.
- Wang, Y. & Tsang, D. C. W. (2013). Effects of solution chemistry on arsenic (V) removal by low-cost adsorbents. *Journal of Environmental Sciences*, 25(11): 2291–2298. doi:10.1016/S1001-0742(12)60296-4
- Xu, Y., Nakajima, T. & Ohki, A. (2002). Adsorption and removal of arsenic(V) from drinking water by aluminum-loaded Shirasu-zeolite. *Journal of Hazardous Materials*, 92(3): 275–287. doi:10.1016/S0304-3894(02)00020-1
- Yean, S., Cong, L., Yavuz, C. T., Mayo, J. T., Yu, W. W., Kan, A. T., ... Tomson, M. B. (2005). Effect of magnetite particle size on adsorption and desorption of arsenite and arsenate. *Journal of Materials Research*, 20(12): 3255–3264. doi:10.1557/jmr.2005.0