

TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA DE SISTEMAS HIDRÁULICOS DE ACI PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y PATÓGENOS

Duhne Ramírez Marcela S.¹, García Hernández Luis E.¹, Oliván López Gustavo A.¹, Valverde Barragán Zaira¹, Velazco Ramírez José M.¹, VandenBrink Jay², Knopke Harry J.²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, Col. Las Campanas, Querétaro, Qro. C.P. 76010

²Aqua Clara Internacional, 242 Howard Avenue, Holland, MI, EUA C.P. 49424

marcela.duhne@uaq.mx

Introducción

En el mundo, la preocupación con respecto a la calidad del agua ha crecido, además han disminuido las fuentes naturales para la obtención de ésta para consumo humano. El agua contaminada y el saneamiento deficiente están relacionados con la transmisión de enfermedades como el cólera, otras diarreas, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis; enfermedades directamente atribuidas a la presencia de patógenos en el agua. Los servicios de agua y saneamiento inexistentes, insuficientes o gestionados de forma inapropiada exponen a la población a riesgos prevenibles para su salud (OMS, 2015). Por lo cual, se ha estudiado métodos de remoción de los mismos mediante el uso de cloro, filtros de cerámica, biofiltros de arena, la combinación de filtración y aplicación de cloro, uso de cloro y floculación, uso de plata coloidal, desinfección solar y membranas con diferentes tamaños de poros (Amin y Han 2009; Lantange *et al.*, 2006; Rangel, 2015). En la presente investigación resulta de mayor interés enfocarse en la remoción de arsénico y su cuantificación en el agua.

Los metales pesados representan un riesgo muy peligroso para la salud y el medio ambiente, ya que causan daños neurológicos y renales. En 2015, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declara que la presencia de metales pesados en los alimentos se debe principalmente a la contaminación del aire, del agua y del suelo. Debido a esta situación, se debe poner mayor atención en la eliminación de estas sustancias químicas del agua.

Uno de los metales que causa mayores daños es el arsénico, enlistado a nivel mundial entre los diez químicos de mayor preocupación a la salud pública (OMS, 2011). Asimismo, este es considerado cancerígeno para los humanos. En ciertas regiones, existe evidencia epidemiológica de alteraciones a la salud ante el consumo prolongado de aguas arsenicales. El Arsénico además afecta a los sistemas respiratorio, gastrointestinal, cardiovascular y nervioso (Campos, 2003).

De acuerdo a datos obtenidos por la OMS (2011) el arsénico inorgánico está naturalmente presente en altos niveles en las aguas subterráneas de diversos países, entre ellos Argentina, Bangladesh, Chile, China, India, México y los Estados Unidos de América (EUA) (Chowdhury *et al.*, 2000; Bundschuh *et al.*, 2012). Particularmente, México es uno de los países donde la afectación por arsénico en el agua está presente, algunos estados de donde se tiene registro sobre concentración de

arsénico son Nayarit, Chihuahua, Veracruz, Puebla, San Luis Potosí, Hidalgo y Nuevo León (Cebrian *et al.*, 1983; Rico-Rodríguez *et al.*, 2013). Lamentablemente, como indica Francisca y Carro (2014), en muchos lugares la única fuente de agua para bebida contiene arsénico (As) en solución, por lo que resulta necesario estudiar mecanismos de remoción.

Existen varios métodos utilizados para la remoción y disminución de los niveles de arsénico basados en procesos químicos aplicados solos, simultáneamente o de manera secuencial. Entre ellos se encuentran: oxidación-reducción, coagulación-filtración, coagulación-floculación, precipitación, electrocoagulación, adsorción, intercambio iónico, separación de fase líquida y sólida, exclusión física, tecnologías de membrana y procesos biológicos (Francisca y Carro, 2014; Litter *et al.*, 2010a; 2010b; Parga *et al.*, 2005). Estos métodos se han desarrollado y aplicado en diferentes localidades y circunstancias, lamentablemente, aquellas que se han aplicado y evaluado en campo se encuentran en poblaciones rurales o urbanas con un sistema de abastecimiento de agua centralizado.

En los países de América Latina, entre ellos México, parte de sus habitantes dependen de agua que contiene arsénico en niveles tóxicos, estas comunidades generalmente se localizan en zonas rurales o periurbanas. En estas poblaciones el grado de marginación es alto o muy alto, además de presentar dispersión entre sus miembros. Bundschuh *et al.* (2010) y Litter *et al.* (2011) han trabajado con soluciones de coagulación-floculación, adsorción, e intercambio iónico en laboratorio. Concluyendo, en sus respectivas investigaciones, que la fiabilidad de la tecnología y los análisis en laboratorio son mandatorios, previo a la aplicación en campo.

La contaminación de arsénico en México y Querétaro ha sido documentado por (Armienta *et al.*, 2007). Se cree que algunos mantos acuíferos del estado están contaminados de manera natural y antropogénica (minas), pero futuras investigaciones se requieren para determinar lo anterior. Por lo cual, se vuelve imperativo el implementar sistemas locales de potabilización que permitan a la población el acceso a agua para beber y cocinar de un costo menor al comercial.

El propósito de este proyecto fue la instalación de sistemas desarrollados por Aqua Clara Internacional (ACI), un Organismo No Gubernamental (ONG) de EUA que no requieren de fuentes externas de energía para purificar el agua removiendo, principalmente, arsénico y patógenos presentes en el agua. Este trabajo, presenta los resultados de cuatro de

las cinco instalaciones realizadas en el municipio de Pinal de Amoles, Querétaro durante el 2016.

En este trabajo se describe la tecnología a implementar, al equipo de trabajo que hizo posible esta labor, y los resultados obtenidos mediante análisis de agua cruda y purificada. Asimismo, se hizo uso de un equipo para medición de arsénico en campo y se muestra el comparativo contra los resultados obtenidos en campo.

Metodología.

Zona de estudio

El estado de Querétaro (Figura 1) cuenta con 18 municipios, con 2 038 372 habitantes, de los cuales 70% corresponden a la zona urbana y 30% a la rural. El 51% de la superficie del estado presenta clima seco y semiseco localizado en la región centro; el 24.3% presenta clima cálido subhúmedo en la región de la Sierra Madre Oriental; el 23% presenta clima templado subhúmedo localizado en la región sur, centro y noreste; el 1% presenta clima cálido húmedo hacia el noreste y el restante 0.7% presenta clima templado húmedo al noreste de estado. (INEGI, 2015).

El Estado de Querétaro se encuentra en el puesto número 16 en niveles de marginación. Esto representa a 17,601 personas que viven en 215 comunidades. La mayoría de estas comunidades tiene problemas de escasez de agua potable, debido al asilamiento que se tienen entre éstas y las ciudades en desarrollo, en éstas ciudades al problema de la falta del recurso, se suma el de la contaminación hídrica.

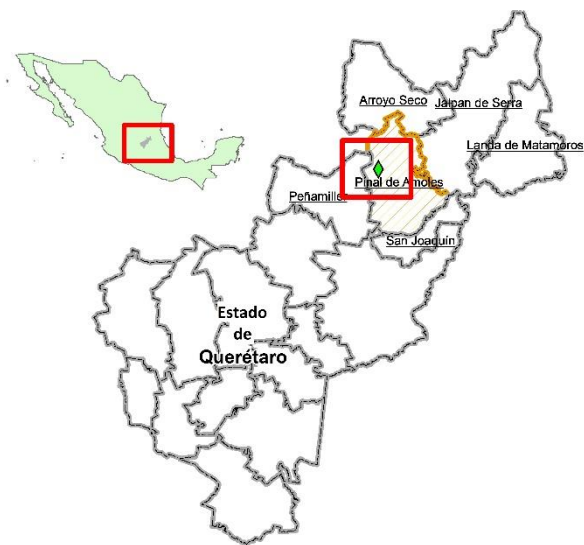


Figura 1. Ubicación de localidades en Pinal de Amoles, Querétaro.

Algunas comunidades recibieron transferencia de tecnología de ACI, todas ellas pertenecen al municipio de Pinal de Amoles (Figura 1). Dicho municipio forma parte de la región conocida como la Sierra Gorda. Éste se encuentra a 153 kilómetros de la capital estatal, al Norte del Estado, en una zona accidentada con pendientes pronunciadas, planicies pequeñas y mesetas. Tiene una extensión de 705.3698 km² que representan el 6.04% de la superficie estatal.

Tecnología de Aqua Clara Internacional (ACI)

La Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y Aqua Clara Internacional (ACI) con su base de operaciones en Holland,

Michigan, EUA, tienen un convenio que promueve la transferencia de tecnologías de ACI a la UAQ para que sus miembros: profesores, personal técnico y estudiantes, tengan la posibilidad de proveer de agua potable a los habitantes del estado de Querétaro.

Con el fin de que remediar las posibles afecciones debido a la ingesta de arsénico en la población, miembros de la Facultad de Ingeniería de la UAQ optaron por promover los sistemas hidráulicos de remoción de arsénico y patógenos de ACI. Esta tecnología fue probada en laboratorio y en campo en casas-habitación en Nicaragua (Álvarez *et al.*, 2013) y en escuelas en Nalbari región de Assam, India (Bhuyan, 2013). En Nalbari se encontraron concentraciones iniciales de arsénico de aproximadamente 45ppb (Nicaragua) y hasta 150ppb (India), después del tratamiento se llegó a resultados entre 0-1ppb.

Los filtros de remoción de arsénico y patógenos utilizados durante esta investigación, se conforman por tres etapas: la primera etapa es el pretratamiento, donde por medio de un pre filtro se retiene a las partículas gruesas y parásitos, además de reducir la turbidez. Debido a la calidad de la fuente de agua de entrada, éste sólo requirió instalar en una de las localidades. La segunda etapa consta de la remoción de patógenos, por lo cual el agua pasa por un filtro de desbaste de 75micras y procede a dos filtros de membrana hueca de 0.1micras y 250 mm de alto que retiene los microorganismos (ver Figura 2). Éstos tienen un diámetro de poro menor al tamaño típico de las bacterias que es de 1-3micras, arrojando una eficiencia de remoción del 99.9999% de bacterias.



Figura 2. Primera etapa de sistema de purificación ACI.

En la tercera etapa, el agua pasa a través de un volumen de 0.02 o 0.04m³ de un medio adsorbente, que consiste en nano partículas de dióxido de titanio (TiO₂), soportadas en dióxido de silicio (ver Figura 3). El TiO₂ atrapa el arsénico o cualquier metal pesado y lo retiene mientras el agua pasa por el medio. Cabe destacar que este compuesto también se utiliza para desinfectar y si bien podría remover bacterias, se busca enfocar su uso en la remoción de arsénico. Finalmente, el agua es llevada por gravedad a un tanque de almacenamiento que tiene una llave en la parte inferior para el llenado de recipientes limpios y secos.

La cantidad de arena que se coloca en el sistema depende de la concentración de arsénico en el agua. Este sistema ha demostrado que puede remover cantidades de arsénico de

hasta 1000 ppb mediante pruebas de laboratorio realizadas por ACI, Michigan State University y Oakland Energy.



Figura 3. Filtro de remoción de arsénico.

El medio filtrante está calibrado para tener una vida útil de dos años. Al final de este periodo el medio se puede reemplazar y no lixiviará el arsénico. Una vez usado, se puede colocar en rellenos sanitarios e incluso usar como arena en mezcla asfáltica.

Además de personal y estudiantes de la Facultad de Ingeniería y científicos de Aqua Clara Internacional, en este proyecto se sumaron esfuerzos de personal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) que fungieron como testigos de las instalaciones y la Secretaría de Salud del Estado de Querétaro, quienes fueron los responsables del primer contacto con la población y seguimiento posterior a los sistemas en Pinal de Amoles, Querétaro.

Resultados

Los cuatro sistemas se instalaron en localidades de Pinal de Amoles de 500 habitantes o menos, instalando dos sistemas por visita en mayo y octubre de 2016 (ver Tabla 1). Por confidencialidad de datos, los nombres de las localidades no se presentan en el presente artículo.

Tabla 1. Fechas de instalación de sistemas y habitantes por localidad.

Localidad	Instalación	Hab.
A	Mayo 2016	185
B	Mayo 2016	280
C	Octubre 2016	180
D	Octubre 2016	500

En estas localidades se tiene identificadas fuentes alternas de agua disponibles, sin embargo, comenta la población que estas fuentes son intermitentes o debido a la dispersión de las casas no es viable abastecer a todas las casas con las mismas.

Una vez instalados cada uno de los sistemas. Se tomaron muestras de agua antes y después del tratamiento. En campo se utilizó el *Quick Rapid Arsenic Test Kit* o kit de prueba rápida de arsénico para obtener en 12 minutos resultados. Éste es un kit utilizado ampliamente en campo y es fabricado por Industrial Test Systems, Inc., una empresa estadounidense ubicada en Carolina del Sur. Otra muestra se analizó en el laboratorio acreditando ante la EMA: Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A, de C.V. (INESA) de Querétaro.

La Tabla 2, muestra los resultados obtenidos mediante los dos métodos de análisis. El kit rápido de prueba, tiene una tira que

se colorea y compara contra una tabla de colores Easy-Read donde blanco es 0 y 0.005mg/L es el primer color, por lo cual se llena la tabla con < 0.004mg/L si la tira no se coloreó. Para la localidad B debido a que el color era ligeramente mayor a 0.010mg/L se opta por poner 0.011mg/L. El funcionamiento correcto de la remoción de arsénico en las últimas localidades no se pudo detectar. En C, debido a que el tanque de llenado se encontraba conectado a un manantial alternativo al que se encuentra presuntamente contaminado. Mientras que en D, el agua se almacena en una represa de almacenamiento a cielo abierto y hubo lluvia la semana previa a la instalación.

Tabla 2. Resultados de contaminación con arsénico.

Localidad	Entrada (mg/L)		Salida (mg/L)	
	Kit	Lab	Kit	Lab
A	0.020	0.017	< 0.004	< 0.005
B	0.011	0.012	< 0.004	< 0.005
C	< 0.004	< 0.005	< 0.004	< 0.005
D	< 0.004	< 0.005	< 0.004	< 0.005

Los investigadores de la UAQ encargados de la implementación técnica de los sistemas han desarrollado con su experiencia y a través de la capacitación de ACI una serie de pasos para realizar la implementación, transferencia y adopción de la tecnología de ACI en Querétaro. El listado de los pasos que la componen, los actores involucrados y una breve descripción de los mismos se presenta a continuación.

1. Identificación de las comunidades afectadas.

Acercamiento de los investigadores de la UAQ con la Secretaría de Salud del Estado de Querétaro (SESEQ) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para establecer las comunidades prioritarias a beneficiar con los sistemas.

2. Capacitación.

ACI provee capacitación en la instalación, uso y mantenimiento de los sistemas filtrantes al personal de la UAQ y a las personas beneficiadas dentro de la comunidad. Durante sus visitas semestrales para actualizar el conocimiento.

3. Primera visita a la comunidad.

3.1. Plática introductoria.

Con apoyo de SESEQ se hace el primer acercamiento a la comunidad. Donde se explican los objetivos, beneficio y la forma de trabajo en el proyecto. Solicitando la cooperación de la población para la ubicación y la construcción, de ser necesario, del lugar cerrado para la instalación de los filtros y una línea de conducción de agua.

3.2. Diagnóstico preliminar.

Aquí se busca analizar los niveles de arsénico y patógenos en el agua de consumo diario. En caso de no haber información disponible se procede a utilizar el kit de prueba rápida para medir niveles de arsénico y muestras para analizar en laboratorio.

3.3. Diseño e instalación del sistema.

De acuerdo a la turbidez y la concentración de arsénico que tiene el agua, se elabora el diseño del sistema. Definiendo el tamaño del reactor de arsénico 0.02m³ o 0.04m³. Posteriormente, se hace la instalación de cada una de las partes del sistema; los dos filtros de remoción de patógenos, el tanque con la mezcla de arena y agente removedor de

arsénico, tanque de almacenamiento de agua limpia y todas las conexiones de tubería necesarias para así formar el conjunto con el que se provee de agua de calidad a los habitantes de la comunidad.

3.4. Diagnóstico final.

Para evaluar el correcto funcionamiento, se toman muestras para ser evaluadas con el kit de prueba rápida y en laboratorio para corroborar que los niveles de arsénico han y que se encuentran dentro de la norma establecida por la OMS y la norma mexicana.

3.5. Correcciones.

En caso de que los niveles de arsénico no disminuyan hasta cumplir con la norma internacional, se procede a revisar todas las conexiones, y se verifica que el agua llegue de manera correcta al tanque. Si lo anterior no presenta problemas, se aumenta la cantidad empleada de arena colocando otro tanque en serie al instalado inicialmente.

3.6. Capacitación a la comunidad.

Finalmente, para asegurar la transferencia de la comunidad se capacita a las personas beneficiadas para que aprendan a dar buen uso al sistema y conozcan el correcto mantenimiento, el cual consiste en el retrolavado de la segunda etapa del tratamiento.

4. Evaluación de seguimiento.

Nuevamente, se realizan análisis de agua tras 3, 6 u 8 meses de la instalación de los filtros. Corroborando el funcionamiento del sistema. En caso necesario, se hacen las correcciones correspondientes para asegurar la calidad de agua de consumo.

Conclusiones

Se identifica que la tecnología de ACI se encuentra implementada y correctamente funcionando en el estado de Querétaro, desde la instalación de cada sistema a la fecha. El trabajo realizado depende del equipo de trabajo interinstitucional que permite que las diferentes partes aborden desde su área de experiencia el problema y sean testigos del funcionamiento de los sistemas. De esta manera, es viable tener nuevas fuentes de financiamiento y escalar el impacto al beneficiar aun mayor población con tecnologías de bajo costo y sin necesidad de energía externa.

Agradecimientos

Agradecemos a la Dirección Local Querétaro de la Comisión Nacional del Agua y la Dirección de Protección contra Riesgos Sanitarios de la Secretaría de Salud del Estado de Querétaro por el apoyo logístico y contacto con personal de las localidades y autoridades Municipales. A la Presidencia Municipal de Pinal de Amoles por la recepción de los sistemas instalados y compromisos adquiridos de seguimiento al proyecto.

Los autores de la UAQ agradecen de ACI a Bob McDonald por su visión, a Marcia Buck por su trabajo y apoyo logístico, a Harry Knopke y Jay Van den Brink por su trabajo, capacitación y visitas a Querétaro. Es por ustedes y el financiamiento otorgado por West Foundation que este proyecto ha dado resultados. A la Dra. Hilda Romero y Dr. Eusebio Ventura colaboradores del proyecto en la UAQ.

Marcela S. Duhne agradece al CONACYT por la beca para

realizar sus estudios de Doctorado.

Referencias

- 1.- Amin, M. T. y M.Y. Han (2009). "Roof-harvested rainwater for potable purposes: application of solar disinfection (SODIS) and limitations". *Water Science and Technology*, Vol. 60, No. 2, pp. 419-431.
- 2.- Armienta, M.A., C.R. Rodriguez, L.K. Ongley, H. Brust, F.Morales, A. Aquayo, O. Cruz y N. Cenicerros (2007). "Origin and fate of arsenic in a historic mining area of Mexico". Chapter 18 in Bhattacharya *et al.*, (eds) *Trace metals and other contaminants in the environment*, Vol. 9, pp. 473-498.
- 3.- Bundschuh, J., M. Litter, V.S.T. Ciminelli, M. E. Morada, L. Cornejo, S. Garrido Hoyos, J. Hoinkis, M.T. Alarcón-Herrera, M. A. Arrieta y P. Bhattacharya (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*, Vol. 44, pp. 5828-5845.
- 4.- Bundschuh, J., M.I. Litter, F. Parvez, G. Román-Ross, H.B. Nicolli, J.S. Jean, C.W. Liu, D. López, M.A. Armienta, L.R.G. Guilherme, A. Gómez Cuevas, L. Cornejo, L. Cumbal, R. Toujaguez (2012). "One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries". *Science of the Total Environment*, Vol. 429, pp. 2-35.
- 5.- Campos, V. (2003). "Estudio de un método alternativo para la purificación de arsénico del agua". *Journal of the Mexican Chemical Society*, Vol. 47, No. 3, Julio-Septiembre 2003, pp. 283-286.
- 6.- Cebrian, M.E., A. Albores, M. Aguilar y E. Blakely (1983). "Chronic arsenic poisoning in the north of Mexico". *Human Toxicology*. Vol. 2, pp. 121-133.
- 7.- Chowdhury, U.K., B.K. Biswas, T.R. Chowdhury, G. Samanta, B.K. Mandal, G.C. Basu, C.R. Chandra, D. Lodh, K.C. Saha, S.K. Mukherjee, S. Roy, S. Kabir, Q. Quamruzzaman y D. Chakraborti (2000). "Groundwater arsenic contamination in Bangladesh and West Bengal, India". *Environmental Health Perspectives*. Vol. 108, No. 5, mayo 2000, pp. 393-397.
- 8.- Francisca, F. M. y M. E. Carro Pérez (2014). "Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación". *Revista internacional de contaminación ambiental*, Vol. 30, No. 2, Mayo 2014, pp. 177-190.
- 9.- INEGI (2015). *Cuéntame INEGI*. Obtenido de <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/queret/territorio/clima.aspx?tema=me&e=22>
- 10.- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2016). *Pinal de Amoles*. Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM22queretar/o/municipios/22002a.html>
- 11.- Lantagne, D. S., R. Quick y E. D. Mintz (2006). "Household Water Treatment and Safe Storage Options in Developing Countries: Review of Current Implementation Practices". *Water Stories: Expanding Opportunities in small-scale Water and Sanitation Projects*, M. Parker, A. Williams & C. Youngblood (eds.), Woodrow Wilson International Center

for Scholars. Washington, DC, USA, pp. 17-38.

12.- **Organización Mundial de la Salud** (2011). *Arsenic in drinking water: background document for development of WHO guidelines for drinking water quality*. WHO/SDE/WSH/03.04/75/Rev/1.

13.- **Organización Mundial de la Salud** (2015). *Agua*. Obtenido de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>

14.- **Rangel Hernández, J.G.** (2015). *Proceso de filtración de aguas pluviales a base de plata coloidal* (TESIS). Universidad Tecnológica de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro.

15.- **Parga, J.R., D.L. Cocke, J.L. Valenzuela, J.A. Gomes, M. Kesmez, G. Irwin, H. Moreno y M. Weir** (2005). "Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera Mexico". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 124, pp. 247-254.

16.- **Rico-Rodriguez, M.A., F. Prieto-Garcia, A.D. Roman-Gutierrez, E.M. Otazo-Sanc y O.A. Acevedo-Sandoval** (2013). "Characterization of three soils in Hidalgo and Queretaro, Mexico: availability effects on arsenic in chickpea". *FCA UNCUYO*, Vol. 45, No. 1, pp. 225-246.