

ARTICULACION ENTRE INVESTIGACIÓN, EXTENSIÓN Y TRANSFERENCIA: RELATO DE UNA INNOVACIÓN

Berardozzi E.⁽¹⁾, García Eischlang F.⁽¹⁾, Lucino C.⁽²⁾

⁽¹⁾ INIFTA, CONICET. ⁽²⁾ UIDET Hidromecánica, F.I., U.N.L.P –
fgeins@inifta.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se describen los avances obtenidos a lo largo de más de una década en un proyecto para la remoción de arsénico en agua, que comenzó como proyecto de investigación y que en su desarrollo fue articulando este enfoque con la extensión, a través de proyectos acreditados en distintos ámbitos. A su vez, se prevé que próximamente podrá iniciarse la etapa de inserción o transferencia de la tecnología desarrollada en el medio, especialmente en cooperativas de localidades pequeñas.

El arsénico (As) es un metaloide de elevada toxicidad que puede presentarse en aguas subterráneas formando parte tanto de especies orgánicas como inorgánicas. La ingesta crónica de agua con contenidos de As superiores a los recomendados produce graves efectos a la salud. En Argentina, el área afectada por esta problemática cubre aproximadamente 10^6 km² y actualmente se estima que la población que vive en zonas con aguas subterráneas contaminadas con As se eleva a alrededor de 4 millones de personas [1]. En nuestro país el conjunto de patologías ocasionadas por esta causa han sido definidas como Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE). La exposición a este contaminante produce cáncer de riñón, hígado y pulmón, entre otros. Además, se acumula en huesos, músculos, pelos y uñas. En la piel, este contaminante puede producir hipo/hiper pigmentación, queratosis y hasta cáncer [2].

En la mayoría de las grandes áreas urbanas, que en general cuentan con servicios de agua centralizados, el problema de los recursos de agua potable contaminados con As, se ha mitigado mediante la instalación de plantas de tratamiento a gran escala o el aprovechamiento de recursos hídricos alternativos. En contraste, para el caso de pequeñas poblaciones periurbanas o rurales, actualmente no se dispone de tecnologías económicas y sencillas capaces de dar respuesta a este problema [3-4]. Por este motivo, resulta imperioso fomentar desarrollos locales de tecnologías accesibles que permitan aportar soluciones alternativas y a largo plazo para esta importante problemática.

En este contexto las tecnologías basadas en el empleo de hierro cero-valente (ZVI) se presentan como herramientas prometedoras porque han sido probadas con éxito para la eliminación de una amplia variedad de contaminantes y pueden implementarse con relativa facilidad, utilizando materiales simples y ampliamente disponibles. Los mecanismos de eliminación de contaminantes en estos sistemas se basan en procesos físicos y/o químicos que involucran especies de Fe en diferentes estados de oxidación. En particular, se ha demostrado que el mecanismo de eliminación del arsénico implica tanto etapas de oxidación como de co-precipitación/adsorción [5].

METODOLOGÍA

Relato del proceso de innovación. Con el objetivo de desarrollar una tecnología que cumpliera con las características previamente mencionadas, en el año 2006 se iniciaron en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS) del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería investigaciones relacionadas con la remoción de arsénico mediante el empleo de ZVI. En un principio, los estudios preliminares se centraron en el análisis de las cinéticas de corrosión del hierro metálico en sistemas tipo batch. A partir

del año 2012, se comenzó a trabajar en el diseño de prototipos completos, incluyendo todas las operaciones unitarias necesarias en el proceso de purificación del agua contaminada con arsénico. Con este fin, se encararon investigaciones sobre sistemas en modo continuo a través del análisis del efecto de las variables operativas que, en conjunto, permiten evaluar el desempeño de columnas reactivas basadas en el empleo de ZVI. En esta nueva etapa se incorporó a una Ingeniera Química, egresada de nuestra Facultad, para la realización de una tesis doctoral en el marco del proyecto, y además docentes de la UIDET (Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia) Hidromecánica para colaborar en las etapas de escalado y evaluación de estabilidad hidráulica del prototipo. Estas actividades de investigación se desarrollaron en el marco de dos proyectos de investigación acreditados y financiados por la UNLP. Los resultados parciales de estas investigaciones han sido motivo de varias presentaciones a congresos, publicaciones en revistas indexadas y dos capítulos de libro.

Paralelamente, en el año 2013 se iniciaron también distintas actividades de extensión para la realización de pruebas de campo con diferentes actores/grupos sociales y posibles destinatarios de la tecnología desarrollada. Estas actividades fueron realizadas en el marco de un proyecto de extensión acreditado y subsidiado por la Facultad de Ingeniería y de otro proyecto de extensión acreditado por la UNLP.

A continuación se detallan parte de los principales resultados obtenidos tanto en las actividades de investigación como de extensión a lo largo del tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Investigación básica a partir de una idea Estudios en Batch. El conocimiento de los factores que gobiernan los aspectos cinéticos y de equilibrio de la absorción es crítico para el diseño de plantas de tratamiento eficientes. Por este motivo, en las etapas iniciales del proyecto de investigación se llevaron a cabo diferentes ensayos en modo de operación discontinuo (Batch) con el fin de evaluar la eficiencia del adsorbente, las capacidades de adsorción y las cinéticas de adsorción.

Los primeros trabajos se centraron en el análisis de los procesos relacionados con la generación de Fe(III). Los estudios mostraron que la presencia de oxígeno disuelto, la superficie de Fe(0) expuesta y la presencia de sales en la matriz acuosa son las variables que mayor influencia presentan en la cinética de producción del agente precipitante (Fe(III)). Dado que en el rango de valores de pH estudiado la oxidación de Fe(II) a Fe(III) mediada por O_2 disuelto es relativamente rápida, puede considerarse que las dependencias observadas para la velocidad de producción de Fe(III) con la superficie de contacto de Fe(0) y con la conductividad de las aguas sintéticas empleadas está controlada por el proceso heterogéneo inicial de corrosión electroquímica [6].

Posteriormente, los estudios se centraron en el efecto del tipo de ZVI empleado, del pH de las aguas a tratar y del suministro de oxígeno por aireación sobre la cinética de formación de oxo/hidróxidos de hierro (HFO). Los ensayos comparativos realizados con diferentes fuentes de ZVI mostraron que la lana de acero comercial exhibe la mayor eficiencia de producción de oxo/hidróxidos de hierro debido a su gran área de contacto por unidad de masa. Las velocidades de producción de HFO para diferentes caudales de aire y los estudios acerca del perfil de distribución de pO_2 en sistemas sin aireación mostraron que la concentración de oxígeno disuelto en la interfase metal-solución es un parámetro fundamental para un adecuado diseño. Por lo tanto un riguroso control de esta variable tendrá impacto directo sobre la eficiencia global del proceso.

Finalmente se realizaron ensayos de remoción de As(III) y As(V) en presencia de oxo/hidróxidos de hierro coloidal generados por oxidación de ZVI en diferentes valores de pH y concentraciones de contaminante. Los porcentajes de remoción de As(III) y As(V) obtenidos a diferentes valores de pH mostraron variaciones en la afinidad entre las

especies de As y el material adsorbente. Por lo tanto, el cálculo de la concentración de HFO necesaria para lograr una remoción eficiente debe tener en cuenta tanto el pH de las aguas a tratar como distribución de especies de arsénico entre los distintos estados de oxidación. Asimismo, estudios realizados empleando suspensiones partículas de HFO con 3 semanas de maduración mostraron porcentajes de remoción apreciablemente menores que los correspondientes a suspensiones de partículas de HFO frescas [7].

Diseño conceptual de la planta, ingeniería básica. Teniendo en cuenta la mayor tasa de remoción obtenida utilizando partículas de HFO frescas y tanto las dependencias cinéticas como las eficiencias de los procesos observadas en los estudios batch, se encaró el diseño y la construcción de una planta de tratamiento para operación continua con todas las operaciones unitarias necesarias para la obtención de agua libre de arsénico. La misma incluye tres etapas: en primer lugar, el hierro metálico es oxidado a Fe(II) por el oxígeno disuelto en el agua a tratar. Posteriormente, el Fe(II) es oxidado a especies de Fe(III) en una segunda etapa de aireación/contacto. Finalmente, las especies férricas producidas "in situ" forman fases coloidales que son removidas mediante un proceso físico de filtración. El proceso descrito se esquematiza en la Figura 1.

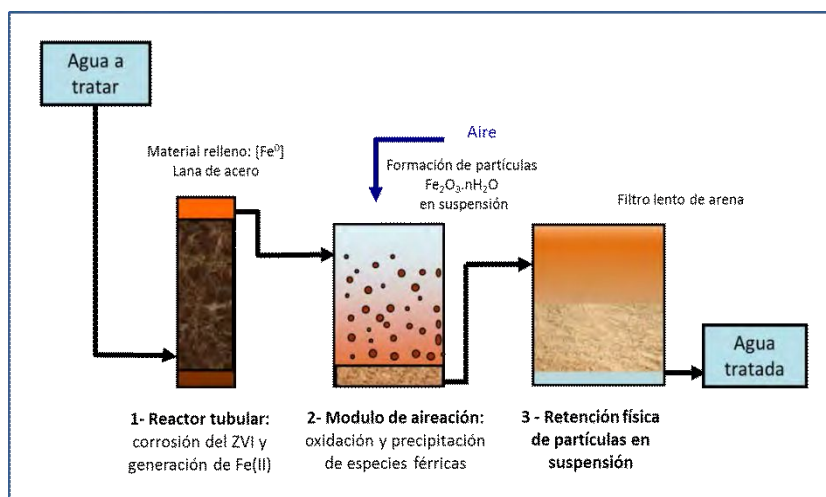


Figura 1. Esquema del proceso de tratamiento continuo basado en el empleo de ZVI.

Los estudios se centraron mayormente en el análisis de la primera etapa mediante ensayos de corta duración con columnas reactivas de pequeña escala (RSSCT). Se evaluó el efecto de las variables independientes, tales como el tiempo de residencia hidráulico (TRH), la carga de ZVI, el pH de entrada y la densidad del lecho, sobre diferentes variables de respuesta (VR). Entre las VR analizadas se incluyeron: las tasas de producción de Fe(II) y de Fe(III), el pH de salida y el consumo de oxígeno. Los resultados mostraron que las variables que más influyen en el desempeño del sistema son el pH de entrada y el tiempo de residencia hidráulico [8].

Diseño, dimensionado y prueba de los componentes de la planta. Una vez optimizado el desempeño de las columnas se realizaron ensayos de laboratorio utilizando plantas piloto completas para escalas de trabajo de 700 a 4000 l/día (Figuras 2 y 3). El objetivo fue verificar la eficacia de todas las etapas del proceso y estudiar las variables más adecuadas para el monitoreo diario de la eficiencia de remoción. Los estudios realizados mostraron que la eficiencia de remoción de As se encuentra directamente relacionada con el contenido de Fe a la salida de la columna, determinación analítica más simple que la determinación de As para el control diario. Por otro lado, también se encontró una muy

buena correlación entre el contenido de As a la salida y el potencial de óxido-reducción (ORP) por lo que la medida "on-line" de esta variable a la salida de la columna también resultaría una herramienta adecuada para el monitoreo y control automático del proceso. Los ensayos realizados permitieron verificar porcentajes de remoción por encima del 90 % y contenidos de As por debajo de 0.01 mg/l (límite OMS).



Figura 2. Fotografías de la planta utilizada en la Facultad (izq: 500 ml/min, der: 1500 ml/min).

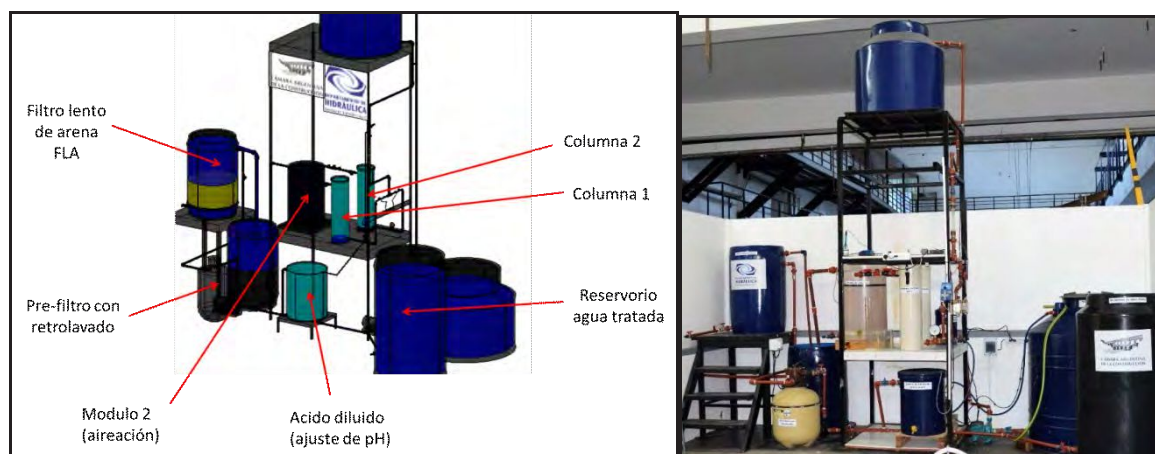


Figura 3. Esquema descriptivo y fotografías de la planta utilizada en la Facultad ($Q_d= 3000$ ml/min).

Una vez verificada la eficiencia en laboratorio es importante la realización de pruebas de campo. Desde el punto de vista de la investigación esto es necesario para optimizar las variables de tratamiento dado que no todas las aguas presentan la misma la composición y la eficiencia en la remoción de As es muy dependiente de matriz a tratar. Por otro lado, cabe destacar que la realización de pruebas de campo en el marco de actividades de extensión nos ha permitido detectar problemas imprevistos, evaluar obstáculos potenciales para la aplicación de la tecnología desarrollada, poner a punto las condiciones operativas y capacitar a potenciales usuarios o destinatarios reales.

Teniendo en cuenta estos aspectos se encararon ensayos de campo en el marco de diferentes actividades de extensión. Las pruebas iniciales fueron realizadas en la localidad de Gral. Rodríguez con una familia de productores tamberos en el año 2014 y en la localidad de Castelli con una cooperativa de servicios en el año 2015.

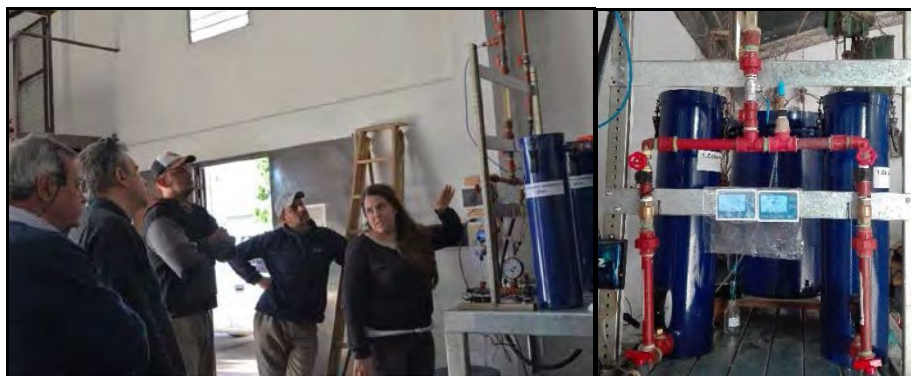


Figura 4. Extensión en Verónica. Planta para el procesamiento de 4000 l/día.

Las pruebas en la localidad de Gral. Rodríguez permitieron detectar, por un lado, la importancia del pH de la matriz acuosa en el proceso de remoción y, por otro, obstáculos para la aplicación del proceso a pequeña escala no relacionados con limitaciones técnicas sino más bien con aspectos socio-culturales. En particular nos encontramos con la negativa de los productores a incorporar un sistema de acondicionamiento del agua a tratar que permitiera una corrección del pH desde 8.6 a 7.0. A partir de esta experiencia, nos planteamos un cambio en la escala y en los destinatarios de los futuros prototipos. En este contexto, se encaró el desarrollo de una planta de mayor caudal destinada a pequeñas cooperativas encargadas del servicio de agua potable. En general las cooperativas cuentan con personal que, con la capacitación correspondiente, puede operar las plantas y realizar las tareas de mantenimiento necesarias. Las pruebas en la cooperativa de Castelli permitieron verificar la eficiencia del proceso para la escala de tratamiento de 700 l/día (500 ml/min). Además, a partir del intercambio de información con el personal encargado de la planta en la cooperativa se realizaron algunas modificaciones al prototipo. En particular se redimensionó el sistema de filtración con el objeto de facilitar las tareas de operación y mantenimiento.

Actualmente se trabaja en conjunto con la cooperativa de provisión de agua de la localidad de Verónica. Las pruebas de campo con la unidad para el tratamiento de 4000 l/día (3000 ml/min) se encuentran en ejecución desde mediados de 2018 (Figura 4). Los ensayos permitieron detectar algunas dificultades en los procesos de floculación y filtración asociados a las características particulares del agua a tratar. El intercambio diario de información y visitas periódicas nos han permitido ajustar los parámetros de diseño de la planta e incorporar nuevas modificaciones para garantizar un buen desempeño.

También en convenio con la cooperativa de Verónica se recibió un subsidio de la Secretaría de Políticas Universitarias para la construcción de una planta para el procesamiento de 20000 l/día de agua. La planta cuenta con 4 columnas en serie operadas mediante bombas peristálticas y un nuevo sistema de pre-filtrado ascendente seguido de filtración lenta. Actualmente esta planta se encuentra en proceso de construcción en instalaciones del Departamento de Hidráulica para la realización de ensayos. Hacia mediados de 2019 podría ya ser trasladada para su instalación en la cooperativa de Verónica.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

A lo largo del proyecto se han ensayado diferentes prototipos completos con el fin de alcanzar caudales del orden de los 4 m³/día. Si bien los resultados obtenidos para estas escalas de tratamiento han sido alentadores, se ha observado que la principal limitación para la inmediata aplicación de estas plantas se encuentra en la rápida saturación de las

etapas finales de filtrado. Asimismo, los prototipos han mostrado tasas de generación de Fe(II) por parte de las columnas muy superiores a las requeridas para eliminar completamente al contaminante, por lo que tanto la eficiencia del proceso como los caudales de tratamiento pueden ser mejorados sustancialmente mediante el estudio y la modificación de ciertos parámetros de diseño como por ejemplo la proporción Fe/As.

Se estima que a corto plazo se podrá ofrecer esta tecnología a localidades pequeñas (de hasta 4000 habitantes), para satisfacer la necesidad de 3 a 5 l/hab por día de agua libre de arsénico para consumo. A partir de la validación de la eficacia y de la sustentabilidad de la tecnología desarrollada a distintas escalas, se espera poder iniciar la etapa de inserción de la misma en el medio a través de proyectos de transferencia y/o extensión con cooperativas de servicios encargadas de la provisión de agua potable.

El sostenimiento y la continuidad de las actividades descritas, gracias a la articulación de proyectos de investigación con proyectos de extensión a lo largo de más de una década, ha resultado fundamental para avanzar en el desarrollo y la materialización de esta tecnología que podrá ofrecerse a través de proyectos de transferencia y extensión como una alternativa de tratamiento frente a otras más costosas y de mayor impacto ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. Bundschuh et al., "One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries," *Sci. Total Environ.*, vol. 429, pp. 2–35, 2012 (y referencias allí citadas).

[2] A. Esteban et al., "Epidemiology of chronic disease related to arsenic in Argentina: A systematic review," *Sci. Total Environ.*, vol. 538, pp. 802–816, 2015.

[3] J. Bundschuh et al., "Emerging mitigation needs and sustainable options for solving the arsenic problems of rural and isolated urban areas in Latin America e A critical analysis," vol. 4, 2010.

[4] M. I. Litter et al., "Small-scale and household methods to remove arsenic from water for drinking purposes in Latin America," *Sci. Total Environ.*, vol. 429, pp. 107–122, 2012.

[5] C. Noubactep, "Processes of contaminant removal in 'Fe⁰ -H₂O' systems revisited: the Importance of co-precipitation," *Environ. Sci.*, pp. 9–13, 2007.

[6] J. M. Triszcz, A. Porta and F. S. García Einschlag*, "Effect of operating conditions on iron corrosion rates in zero-valent iron systems for arsenic removal," *Chemical Engineering Journal*, 150 (2009) 431-439

[7] F. S. G. Einschlag and J. M. Triszcz, "Arsenic removal in continuous systems using zero - valent iron fixed beds," in *Arsenic: Sources, Toxicity and Environmental Impact*, 2008, Chapter 16.

[8] E. Berardozi and F. S. García Einschlag, "Zero-Valent iron based water treatment plant for arsenic removal," in *Arsenic: Risks of Exposure, Behavior in the Environment and Toxicology*, Nova Science Publishers, 2017, Chapter 3.