

Riesgo ambiental por arsénico y boro en las cuencas hidrográficas Sama y Locumba de Perú

Environmental risk due to arsenic and boron in the watersheds Sama y Locumba from Perú

Dr.c. Dante Morales Cabrera, Dr.c. Edgardo Avendaño Cáceres, Dr.c. Daniel Zevallos Ramos, Ing. Julio Fernández Prado e Ing. Zoila Mendoza Rodas.

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Región Tacna-Perú.

RESUMEN

Se efectuó un estudio para estimar el riesgo ambiental sostenible relativo ante concentraciones totales de arsénico y boro en aguas superficiales de las cuencas hidrográficas Sama y Locumba, en Tacna, Perú, a través de muestreos de tipo no probabilístico por conveniencia en puntos referenciales, durante los meses de agosto y noviembre del 2016, así como abril y junio del 2017. Se obtuvo que los valores de arsénico en los respectivos meses fueron 0,0731; 0,29835; 0,287 y 0,711 mg.L⁻¹, lo que superó el límite máximo permisible (0,01 mg.L⁻¹); este incumplimiento fue similar en cuanto al boro, pues se hallaron concentraciones de 8,681 y 4,148 mg.L⁻¹, pero el valor máximo establecido es de 2,4 mg.L⁻¹. Las concentraciones determinadas por meses revelaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$). Se concluyó que las aguas superficiales como recurso natural fueron no sostenibles y representaban un riesgo ambiental y para la salud humana.

Palabras clave: toxicidad, arsénico, boro, agua potable, riesgo ambiental, Perú.

ABSTRACT

A study was carried out to estimate the relative sustainable environmental risk with total concentrations of arsenic and boron in superficial waters of the watersheds Sama and Locumba, in Tacna, Peru, through samplings of non probabilistic type by convenience in reference sites, during the months of August and November of 2016, as well as April and June, 2017. It was obtained that the arsenic values in the respective months were 0,0731; 0,29835; 0,287 and 0,711 mg.L⁻¹, which overcame the permissible maximum limit (0,01 mg.L⁻¹); this unfulfillment was similar as for the boron, because concentrations of 8,681 and 4,148 mg.L⁻¹ were found, but the established maximum value is 2,4 mg.L⁻¹. Concentrations determined per months revealed statistically significant differences ($p \leq 0,05$). It was concluded that the superficial waters as natural resource were not sustainable and they represented an environmental risk and for the human health.

Key words: toxicity, arsenic, boron, drinking water, environmental risk, Peru.

INTRODUCCIÓN

Los actuales enfoques sobre el análisis y la predicción de riesgo ambiental en los sistemas acuáticos deben realizarse en forma anticipada y su propósito será proporcionar información útil sobre el estado futuro del ecosistema. Diversos agentes químicos que se introducen en los reservorios acuáticos, como los metales, pueden degradar diferentes componentes (agua, sedimentos y/o biota) y, por ende, dañar la optimización sobre determinado recurso utilizado como servicio ecosistémico, con la afectación de su disponibilidad.¹⁻³

Referente a lo anterior, el arsénico (As) es un metaloide que está ampliamente distribuido en el ambiente natural y puede llegar a los cuerpos de aguas desde las rocas debido a su meteorización. La toxicidad del arsénico, incluso en bajas concentraciones, es carcinogénica y puede causar deformaciones por mutaciones.^{4,5}

En los seres humanos y otros mamíferos ha ocasionado trastornos neurológicos, enfermedades hepáticas y renales, cáncer, complicaciones gastrointestinales, así como otros problemas de salud.⁶

Respecto al boro, es un microelemento esencial para las plantas y los animales, aunque en la actualidad, continúa siendo un tema de interés y debate su efecto perjudicial.⁷

El propósito de este estudio fue estimar el costo ambiental sostenible relativo ante concentraciones totales de arsénico y boro en aguas superficiales de las cuencas hidrográficas Sama y Locumba, de Tacna, Perú.

MÉTODOS

Durante agosto y noviembre del 2016, así como abril y junio del 2017, se realizaron muestreos no probabilísticos por conveniencia en los reservorios de agua potable correspondientes a las cuencas hidrográficas Sama Bocatoma-Tranca (estación 1: Norte-8036481, Este-343562, altitud-590; estación 2: Norte-8036483, Este-343554, altitud-581; estación 3: Norte-8033077, Este-340986, altitud-584; estación 4: Norte-8033018, Este-340770, altitud-578) y Locumba (estación 1: Norte-8024163, Este-291851, altitud-174; estación 2: Norte-8024268, Este-291865, altitud-191).

El muestreo de las aguas se efectuó a la capa superficial de la columna, por duplicado, y luego se mezcló para su análisis como una muestra compuesta (proporción 1:1:1). El volumen de selección para la cuantificación de arsénico total fue de 1.0 litro.

- Determinación de arsénico total

El arsénico total fue determinado por el *Environmental Testing Laboratory S.A.C.*, que es de tipo ambiental y fue acreditado ante la Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad (INACAL-DA), así como el *International Accreditation Service* bajo la Norma NTP ISO/IEC 17025. La cuantificación del arsénico fue referida mediante la técnica de espectrometría de emisión atómica por plasma inductivamente acoplado (ICP-AES), siguiendo el método comunicado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos: EPA, 200.7; Rev. 4.4. (1994).

- Determinación de boro total

El boro total fue analizado mediante el método SM4500 B *Standard method for the examination of water and waste water* APHA-AWWA, 2012, por el Laboratorio Analítico JYR S.A.C, que es de tipo ambiental y está acreditado bajo la Norma NTP ISO/IEC 17025 ante la Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad. La cuantificación del arsénico se realizó igualmente mediante una espectrometría de emisión atómica por plasma inductivamente acoplado.

Para la evaluación de la calidad del agua por disposición de concentraciones halladas de arsénico y boro, se utilizó lo reglamentado en el Decreto Supremo No. 015-2015-MINAM en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, del Ministerio del Ambiente, República del Perú.

- Costo ambiental sostenible relativo

Debido a la inexistencia de determinada expresión matemática referida al análisis de metales como parámetros físico-químicos de calidad ambiental, que indique posible costo ambiental sostenible, se sugirió la siguiente fórmula:⁸

$$RESCO = COA / \frac{\sum_{i=1}^n \text{CONP}_i}{\sum_{i=1}^n \text{COA}_i}$$

Donde se expresa lo siguiente:

- RESCO = costo ambiental sostenible relativo
- COA = costo de evaluación (condición sobre cumplimiento de parámetros físico-químicos y metales seleccionados)
- CONP = costo de prevención normativo (número de parámetros físico-químicos y metales medidos)
- i) observación inicial y n) observación final

Mediante la fórmula se determina la sostenibilidad del recurso agua de acuerdo al cumplimiento de parámetros (COA), con lo cual se obtiene un cociente, según el tipo de categorías (cuadro).

Cuadro. Criterio de puntuación/costo ambiental sostenible relativo

| Criterio | Puntuación |
|---|-------------|
| - Cumple el valor establecido por la norma regulatoria utilizada | 1 |
| - No cumple el valor establecido por la norma regulatoria utilizada | 0 |
| Categoría de sostenibilidad relativa | Intervalo |
| - Recurso sostenible relativo | 1,0 |
| - Recurso moderadamente sostenible relativo | 0,85 – 0,99 |
| - Recurso ligeramente sostenible relativo | 0,6 – 0,84 |
| - Recurso poco sostenible relativo | 0,41 – 0,59 |
| - Recurso no sostenible relativo | 0,0 – 0,4 |

Leyenda: I) cumplimiento total sobre los parámetros de calidad ambiental seleccionados; II) cumplimiento referido a 80 % sobre el total de los parámetros de calidad ambiental seleccionados; III) cumplimiento referido a 60 % sobre el total de los parámetros de calidad ambiental seleccionados; IV) cumplimiento referido a 40 % sobre el total de los parámetros de calidad ambiental seleccionados; y V) incumplimiento total o casi total sobre los parámetros de calidad ambiental seleccionados.

- Análisis estadístico de los resultados

Se aplicó como método estadístico el análisis de la varianza, con réplicas para definir las fuentes de variación significativas, la prueba de rangos múltiples, para determinar las magnitudes individuales de las diferencias que resulten significativas, y además de la prueba de la t de Student para examinar las diferencias entre dos muestras independientes que presentaron distribución normal y homogeneidad en sus varianzas.⁹

Asimismo, para determinar cuáles valores promedios fueron significativamente diferentes de otros, se empleó el procedimiento de diferencia mínima significativa de Fisher (prueba de contraste múltiple de rangos).

Todos los cálculos se realizaron utilizando el software profesional *Statgraphics Centurion XVI* versión 5.1, donde los resultados se consideraron significativos a un nivel de confianza de 95 % ($p < 0,05$).

RESULTADOS

Según los valores de la tabla 1, las concentraciones promedio de arsénico total en cada mes superaron el valor de referencia permisible ($0,01 \text{ mg.L}^{-1}$). Además se muestra el resultado del análisis de la varianza para el arsénico total, donde el valor-P de la prueba-F fue menor que 0,05; por lo cual existió una diferencia estadísticamente significativa entre los valores promedios, con un nivel de confianza de 95,0 %.

Tabla 1. Concentraciones de As total por meses

| | Agosto 0,0731 | Noviembre 0,29835 | Abril 0,287 | Junio 0,711 | |
|---------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|---------------|
| Referencia | 0,01 mg.L^{-1} | | | | |
| Fuente de variación | Suma de cuadrados | g.L | Cuadrado medio | Razón-F | Valor-P |
| Entre grupos | 1,28039 | 3 | 0,426796 | 1061628,81 | 0,0000 |
| Intragrupos | 0,0000080404 | 20 | 4,0202E-7 | | |
| Total (Corr.) | 1,2804 | 23 | | | |
| Mes | Casos | Media | Grupos homogéneos | Contraste | Significación |
| Agosto | | 0,0731 | X | agosto - noviembre | * |
| Abril | 6 | 0,287 | X | agosto - abril | * |
| Noviembre | | 0,29835 | X | agosto - junio | * |
| Junio | | 0,711 | X | noviembre - abril | * |
| | | | | noviembre - junio | * |
| | | | | abril - junio | * |

* Indica una diferencia significativa

La tabla 2 muestra los resultados de boro en agosto y noviembre, comparados con la referencia ambiental, donde se aprecia que las determinaciones analíticas superaron el valor permisible recomendado por la norma. Del mismo modo, se indica el resumen estadístico y la comparación entre las determinaciones de boro. Como el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada se encontraron en el rango establecido (-2 a +2), entonces existieron desviaciones significativas dentro de la normalidad, y dado que al comparar las medias mediante la prueba de la t de Student, el intervalo no contenía el

valor 0, existió una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de boro para los dos meses, con un nivel de confianza de 95,0 %.

Tabla 2. Concentraciones de boro total por meses

| | Agosto | Noviembre |
|---|--------------|--------------|
| Promedio | 8,681 | 4,148 |
| Referencia (2,4 mg.L ⁻¹) | | |
| Desviación estándar | | 0,000866025 |
| Coefficiente de variación | 0,0099761 % | 0,0208781 % |
| Sesgo estandarizado | -4,84471E-12 | -2,42226E-12 |
| Curtosis estandarizada | | -1,04978 |
| <u>Comparación de medias</u> | | |
| Intervalos de confianza de 95,0 % para la diferencia de medias, suponiendo varianzas iguales: 4,533 +/- 0,00086545 [4,53213; 4,53387] | | |
| <u>Prueba de la t de Student para comparar medias</u> | | |
| Suponiendo varianzas iguales: t = 11103,5; valor -P = 0,0 | | |

El cálculo sobre la estimación del costo ambiental sostenible relativo, según las concentraciones de arsénico y boro en los meses revelaron lo siguiente:

- RESCO = metales [0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0] / 6
- RESCO = [0]/6
- RESCO = 0,0

Dado el valor 0,0 calculado, la categoría correspondiente según la tabla 2 fue de recurso no sostenible relativo.

DISCUSIÓN

La medición de elementos químicos representa una medida de vigilancia y control ambiental. Cuando las concentraciones de arsénico son expuestas sobre las aguas superficiales, uno de los primeros efectos no deseados se produce en las poblaciones menos desarrolladas, como las de macroinvertebrados; por ende, se comienza a afectar el equilibrio de toda la cadena trófica.

Al respecto, en un estudio¹⁰ sobre los efectos de la contaminación por arsénico en comunidades de macroinvertebrados, realizado en el río Xieshui, se encontró que el arsénico trivalente, arsénico pentavalente y arsénico inorgánico total influyeron considerablemente no solo en la densidad de dicha población, sino además en la apariencia de las especies, expresada sobre su relación trófica y reproductiva. Se determinaron concentraciones de 28,29 ± 17,66 mg.L⁻¹, que resultaron más altas que las concentraciones semiletales, y se señaló que pocas especies sobrevivieron en la estación de muestreo seleccionada, donde fue menor el número de especies, densidad, biomasa y la propia biodiversidad, en comparación con otras estaciones. Algunas especies, incluidos los macroinvertebrados, que fisiológicamente eran más sensibles, murieron ante las concentraciones halladas de arsénico.

Las concentraciones de arsénico disponibles en los cuerpos de aguas pueden ser proporcionales de acuerdo al tamaño de los individuos. En esta investigación las concentraciones determinadas en cada mes sobre el arsénico total en las aguas superficiales superaron el valor de 0,01 mg.L⁻¹, como límite permisible establecido en la norma de regulación utilizada. Asimismo, se encontró que el contenido de arsénico en los

cuerpos macroinvertebrados fue directamente proporcional a las concentraciones de arsénico en el agua y sustrato, por lo que en organismos superiores, como los peces, es probable que las concentraciones de arsénico sean mayores, lo que puede ocasionar un riesgo inmediato a la población humana que los consume.¹¹ Si bien es cierto que el As puede ser transferido a través de toda la cadena trófica, se ha observado que no han existido procesos de biomagnificación.¹²

En cualquier estudio sobre determinación de As en ambientes acuáticos que evidencien actividad de pesca, es necesario realizar evaluaciones en todas aquellas especies que son consumidas como dieta animal, ya que existen peces herbívoros en los que se concentra más arsénico que en las especies carnívoras, de modo que pueden ser más nocivos. En una publicación¹³ se refiere acerca de la exposición humana a los metales traza y arsénico, a través del consumo de peces del río Chenab, en Pakistán, y los riesgos en la salud humana, donde los niveles de oligoelementos encontrados en diferentes especies de peces fueron comparados con datos similares en todo el mundo y con los estándares internacionales de consumo, y se obtuvo que el arsénico superó lo recomendado.

Se ha señalado que los contenidos de arsénico, en ambientes acuáticos, superiores a los criterios de concentración continua, poseen toxicidad aguda sobre los organismos acuáticos, mientras que los contenidos superiores a los criterios de concentración máxima causan toxicidad crónica.¹⁴ En esta investigación las concentraciones halladas no solo fueron persistentes o continuas, sino que alcanzaron valores superiores a lo permisible, lo que puede ocasionar efectos a corto y largo plazo.

Las determinaciones de boro en este estudio también superaron el valor permisible por la norma ambiental utilizada, de manera que existe un riesgo para su valor de uso. A pesar de que el boro puede ser tratado en agua potable mediante técnicas convencionales, como procesos de membranas, coagulación, electrocoagulación, adsorción e intercambio iónico,¹⁵ no existen informes sobre alguna de estas tecnologías para eliminar la contaminación por boro en las aguas superficiales de las principales cuencas hidrográficas en la Región de Tacna.

Igualmente las tecnologías convencionales mencionadas pueden remover hasta 90 % del boro en aguas residuales y, del mismo modo, logran que se garanticen los estándares de calidad que se exigen en cualquier normativa.¹⁶

Cuando las concentraciones de boro en agua potable son bajas, las técnicas convencionales, además de ser costosas e insostenibles, producen residuos secundarios durante la purificación.¹⁷ No obstante, teniendo en cuenta que las concentraciones encontradas fueron elevadas, lo que representa un riesgo en seres humanos por la exposición y el consumo permanente de estas, se pudiera implementar alguna de estas técnicas.

Aunque no se determinó la forma química del boro en el agua potable, algunas pruebas *in-vitro* han demostrado que el ácido bórico, ácido fenilborónico y fructoborato de calcio incluyen propiedades proliferativas en las líneas celulares del cáncer de mama y de próstata.¹⁸

En un estudio toxicológico experimental se refiere que el boro produce efectos negativos sobre la reproducción masculina, pues se ha encontrado un bajo número y tamaño reducido de los espermatozoides.¹⁹ Otros autores²⁰ informan que en dosis bajas, la mayor sensibilidad está en el sistema reproductor masculino y donde existen exposiciones altas al boro, la mayor progenie no estaría para los hombres, puesto que el

cromosoma Y es el más afectado. La estimación del costo ambiental sostenible relativo indicó que las aguas de los reservorios superficiales no son adecuadas, puesto que las concentraciones totales determinadas de arsénico y boro durante los meses de estudio, superaron los valores permisibles según lo recomendado, por cuanto fue considerada como recurso natural no sostenible.

Las concentraciones halladas en esta investigación fueron descritas en la matriz agua, de modo que fue necesario correlacionarlas con sedimentos y la biota local. Asimismo, resultó relevante establecer muestreos puntuales incorporando la determinación de parámetros físico-químicos de calidad, con la finalidad de precisar la disponibilidad química del arsénico y el boro, además de considerar las evaluaciones en biomarcadores de exposición como efecto y su posible extrapolación alométrica hacia humanos. Finalmente, la exposición del arsénico y el boro en las aguas podría repercutir en la economía local debido a las actividades agrícolas que se desarrollan en las comunidades regionales, pues el agua como recurso natural no sostenible representa una variable de vulnerabilidad en el riesgo ambiental y, por tanto, en la salud humana.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann del Departamento de Tacna, en Perú, por el financiamiento con los recursos del canon minero a esta investigación (proyecto Análisis y modulación de tecnologías de aguas modernas para la remoción de arsénico y boro en las cuencas de la región de Tacna), así como al Dr. George Argota Pérez, director general del Centro de Investigaciones Avanzadas y Formación Superior en Educación, Salud y Medio Ambiente, por su asesoramiento metodológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mouquet N, Lagadeuc Y, Devictor V, Doyen L, Duputié A, Eveillard D, et al. Predictive ecology in a changing world. *J Appl Ecol.* 2015; 52(5): 1293–310.
2. Maltby L. Ecosystem services and the protection, restoration and management of ecosystems exposed to chemical stressors. *Environ Toxicol Chem.* 2013; 32(5): 974–83.
3. Brown AR, Whale G, Jackson M, Marshall S, Hamer M, Solga A, et al. Towards the definition of specific protection goals for the environmental risk assessment of chemicals: lessons learned from a review of wider environmental legislation. *Integr Environ Assess Manag.* 2017; 13(1): 17–37.
4. Londoño Franco LF, Londoño Muñoz PT, Muñoz García FG. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Rev Bio Agro.* 2016 [citado 17 de Nov 2017]; 14(2): 145.
5. Gall JE, Boyd RS, Rajakaruna N. Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review. *Environ Monit Assess.* 2015; 187(4):201.
6. Subhani M, Mustafa I, Alamdar A, Katsoyiannis IA, Ali N, Huang Q, et al. Ecotoxicology and Environmental Safety Arsenic levels from different land-use settings in Pakistan: Bio-accumulation and estimation of potential human health risk via dust exposure. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2015; 115: 187-94.

7. Kabu M, Sirri-Akosman M. Biological effects of boron. *Reviews of environmental contamination and toxicology*. 2013; 225: 57-75.
8. Argota Pérez G, Argota Coello H, Iannacone J. Costo ambiental sostenible relativo a la variabilidad físico-química de las aguas sobre la disponibilidad de metales en el ecosistema San Juan, Santiago de Cuba-Cuba. *The Biologist (Lima)*. 2016 [citado 17 de Nov 2017]; 14(2): 219-32.
9. Sánchez Turcios RA. t-Student. Usos y abusos. *Rev Mex Cardiol*. 2015 [citado 17 de Nov 2017]; 26(1): 59–61.
10. Shiyun C, Juxiang H, Jinxiu Z, Fangyong D. Study on the effects of arsenic pollution on the communities of macro-invertebrate in Xieshui River. *Acta Ecol Sinica*. 2017; 37(1): 1-9.
11. Rhea TD, Harper DD, Farag MA, Brumbaugh GW. Biomonitoring in the Boulder River Watershed, Montana, USA: Metal concentrations in biofilm and macroinvertebrates, and relations with macroinvertebrates assemblage. *Environ Monit Assess*. 2006; 115(1-3): 381–93.
12. Telford K, Maher AW, Krikowa AF, Foster S, Ellwood M, Ashley PM, et al. Bioaccumulation of antimony and arsenic in a highly contaminated stream adjacent to the Hillgrove Mine, NSW, Australia. *Environ Chem*. 2009; 6: 133-43.
13. Alamdar A, Ali S, Akber M, Eqani S, Hanif N, Maria Ali S, et al. Human exposure to trace metals and arsenic via consumption of fish from river Chenab, Pakistan and associated health risks. *Chemosphere*. 2017; 168: 1004-12.
14. Wang T, Lu Y, He G, Wang T, Zhou Y, Bi C, et al. Determination of water environment standards based on water quality criteria in China: Limitations and feasibilities. *J Environ Sciences*. 2017; 56: 127-36.
15. Hilal N, Kim G, Somerfield C. Boron removal from saline water: A comprehensive review. *Desalination*. 2011; 273(1): 23-35.
16. Wolska J, Bryjak M. Methods for boron removal from aqueous solutions—A review. *Desalination*. 2013; 310: 18-24.
17. Can-Türker O, Türe C, Bökük H, Yakar A. Phyto-management of boron mine effluent using native macrophytes in mono-culture and poly-culture constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 2016; 94: 65-74.
18. Bradke T, Hall C, Carper S, Plopper G. Phenylboronic acid selectively inhibits human prostate and breast cancer cell migration and decreases viability. *Cell Adh Migr*. 2008, 2(3):153–60.
19. Malin-Igra A, Harari F, Lu Y, Casimiro E, Vahter M. Boron exposure through drinking water during pregnancy and birth size. *Environ Int*. 2016; 95: 54-60.

20. Tarasenko N, Kasparov AA, Strongina OM. Effect of boric acid on the sexual function in males. Gig Tr Prof Zabol. 1972; 16(11): 13–6.

Recibido: 4 de diciembre de 2017.

Aprobado: 6 de marzo de 2018.

Dante Morales Cabrera. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Ciudad Universitaria, Avenida Miraflores s/n, Tacna, Perú. Correo electrónico: moralesdante@hotmail.com