

## DISTRIBUTION OF GEOGENIC ARSENIC IN SUPERFICIAL AND UNDERGROUND WATER IN CENTRAL BOLIVIAN HIGHLANDS<sup>‡</sup>

Mauricio Ormachea Muñoz\*, Jorge Quintanilla Aguirre

Department of Chemistry, Instituto de Investigaciones Químicas IIQ, Laboratorio de Hidroquímica, Universidad Mayor de San Andrés UMSA, P.O. Box 303, Tel. 59122795878, La Paz, Bolivia

**Keywords:** Arsenic, Geogenic, Physicochemical Characterization, Trace Elements, Water Quality.

### ABSTRACT

The study assessed the extent of contamination of naturally occurring arsenic in surface- and ground-water in the Poopó Lake basin. In this area water from rivers is mainly used for irrigation and in some occasions for consumption while water from wells is mainly used as drinking water, by the other hand, water from thermal springs is used mainly for recreational purposes and in few occasions also for consumption. Main results show pH values fluctuating in a range between 6.0 to 8.5 and temperature fluctuating between 6 to 20°C with the exception of thermal water samples which vary in a range from 40 to 78°C. Electrical conductivity is relatively high due to the elevated concentrations of dissolved minerals.

Physicochemical characterization of the different water bodies shows mainly Na-Cl and Na-Cl-HCO<sub>3</sub> water types. Results in all water samples also showed low concentrations of trace elements being in general below the recommended values for drinking water. The World Health Organization recommends arsenic concentrations for drinking water below 10 µg/L, but in the studied area, arsenic occur in a wide range of concentrations, higher than the recommended value. Rivers show concentrations up to 87 µg/L while water from thermal springs show up to 65 µg/L. The major concern is the high arsenic content in water samples collected from drinking water wells which results show arsenic concentrations up to 256 µg/L, which poses the population in a high health risk due to the continuously exposition to the toxic element. *\*Original Spanish title: Distribución de arsénico geogénico en agua superficial y subterránea en el altiplano central boliviano*

\*Corresponding author: [maurormache@gmail.com](mailto:maurormache@gmail.com)

### RESUMEN

El presente estudio ha permitido evaluar el grado de contaminación por la presencia de arsénico de origen natural en el agua superficial y subterránea de la cuenca del lago Poopó. En esta zona, el agua de los ríos es empleada mayormente para el riego y en ciertas ocasiones para el consumo mientras que el agua de los pozos es primordialmente empleada para el consumo humano, por otro lado el agua termal es utilizada recreacionalmente en piscinas y en ocasiones también para el consumo. Los resultados más importantes muestran que los valores de pH varían en un rango de 6,0 a 8,5 y la temperatura entre 6 y 20°C excepto en las muestras termales que varían entre 40 y 70 °C. La conductividad eléctrica es relativamente alta por la presencia de elevadas concentraciones de sales disueltas. La caracterización fisicoquímica de los diferentes cuerpos de agua dio como resultado principalmente agua tipo Na-Cl y Na-Cl-HCO<sub>3</sub>. Elementos traza presentes en las muestras de agua no mostraron concentraciones significativas, estando por lo general por debajo de los valores recomendados para el agua de consumo. La Organización Mundial para la Salud recomienda 10 µg/L de arsénico como valor máximo para el agua de consumo, sin embargo en la zona estudiada el arsénico está presente en un amplio rango de concentraciones y muy por encima del valor máximo recomendado. Los ríos presentan concentraciones de hasta 87 µg/L mientras que las aguas termales presentan concentraciones de hasta 65 µg/L. Lo más preocupante son los altos contenidos de arsénico en las muestras de agua extraídas de los pozos, fuente principal de agua de consumo, cuyos resultados muestran concentraciones de arsénico de hasta 256 µg/L, lo cual supone un alto riesgo a la salud de la población al estar estos expuestos continuamente a este tóxico elemento.



## INTRODUCCION

En la actualidad, la presencia de arsénico en el agua empleada para el consumo humano es uno de los más graves problemas de salud pública a nivel mundial debido a la elevada toxicidad y alto riesgo de causar enfermedades cardiovasculares y diferentes tipos de cáncer de entre los cuales el cáncer de piel y de vejiga son los más comunes [1]. Se ha estimado que la salud de más de 200 millones de personas en todo el mundo está en riesgo debido a la exposición al agua de consumo humano contaminada con elevadas concentraciones de arsénico [2].

La presencia del arsénico en cuerpos de agua, en especial en el agua subterránea es atribuida a diferentes procesos geoquímicos naturales pero también a diversas actividades humanas como la minería y otros procesos industriales [3]. La Organización Mundial de la Salud (OMS), ha definido un valor guía donde recomienda que el agua potable no debe exceder el valor referencial de 10  $\mu\text{g/L}$  de arsénico [4], sin embargo, en países como la India, Bangladesh, China, Vietnam, Taiwán, España, Portugal y Hungría [3, 5, 6] y también en varios países de Latinoamérica como México, Nicaragua, Ecuador, Chile, Argentina, Perú, Brasil y Uruguay [7, 8] se han reportado concentraciones de arsénico de origen geológico natural (geogénico) que están muy por encima del valor máximo recomendado.

En el Altiplano Boliviano, la intensa actividad industrial ha causado la contaminación de los ríos, aguas subterráneas y suelos, varios estudios han logrado determinar elevadas concentraciones de arsénico y de metales pesados en aguas superficiales y subterráneas sobre todo en áreas afectadas por actividad minera [9, 10, 11, 12, 13, 14]. Pero por otro lado, Quitanilla et al. (1995) [15] y Banks et al. (2004) [16] lograron cuantificar elevadas concentraciones de arsénico geogénico en aguas superficiales donde las principales fuentes naturales son las rocas volcánicas y minerales sulfurados que liberan arsénico a través de la erosión y los procesos naturales de meteorización, también identificaron de alta importancia el efecto de las manifestaciones geotermales.

El Proyecto Piloto Oruro [10] fue una de las primeras investigaciones que reportó elevadas concentraciones de arsénico en el agua de consumo proveniente de pozos excavados y poco profundos ubicados al sur y al oeste del lago Poopó, las concentraciones de arsénico variaron en un rango de entre 33 y 299  $\mu\text{g/L}$  con un promedio de 181  $\mu\text{g/L}$  ( $n=5$ ) en las poblaciones de Quillacas y Sevaruyo, mientras que en Toledo, las concentraciones variaron en un rango de 121-957  $\mu\text{g/L}$  con un promedio de 463  $\mu\text{g/L}$  ( $n=5$ ), el mismo reporte también indica que la presencia de arsénico en el agua subterránea es debido al elevado "background" geológico de la región y recomienda realizar estudios más concluyentes para determinar su origen y el efecto sobre la salud de la población. Ocho años después, recién se iniciaron nuevas investigaciones para evaluar la calidad del agua de consumo en la región de la cuenca del lago Poopó, es así que Hermansson & Karlsson (2004) [17] evaluaron la calidad fisicoquímica del agua de consumo extraídas de pozos en poblaciones ubicadas alrededor del lago Poopó, los resultados mostraron concentraciones de arsénico que variaron desde 1,5  $\mu\text{g/L}$  hasta 245  $\mu\text{g/L}$  (media 47  $\mu\text{g/L}$ ,  $n=23$ ), posteriormente, Van Den Bergh et al. (2010) [18] reportaron concentraciones de arsénico de hasta 964  $\mu\text{g/L}$  en el agua extraída de pozos de consumo ubicados en la parte norte de la cuenca del lago Poopó. Estos pocos estudios han logrado mostrar la presencia de arsénico geogénico en cuerpos de agua y el alto impacto sobre el agua subterránea, sin embargo aún se requieren estudios más detallados para comprender y determinar la extensión y el grado de contaminación por presencia de arsénico geogénico en la región y además determinar el grado de exposición de la población al tóxico elemento.

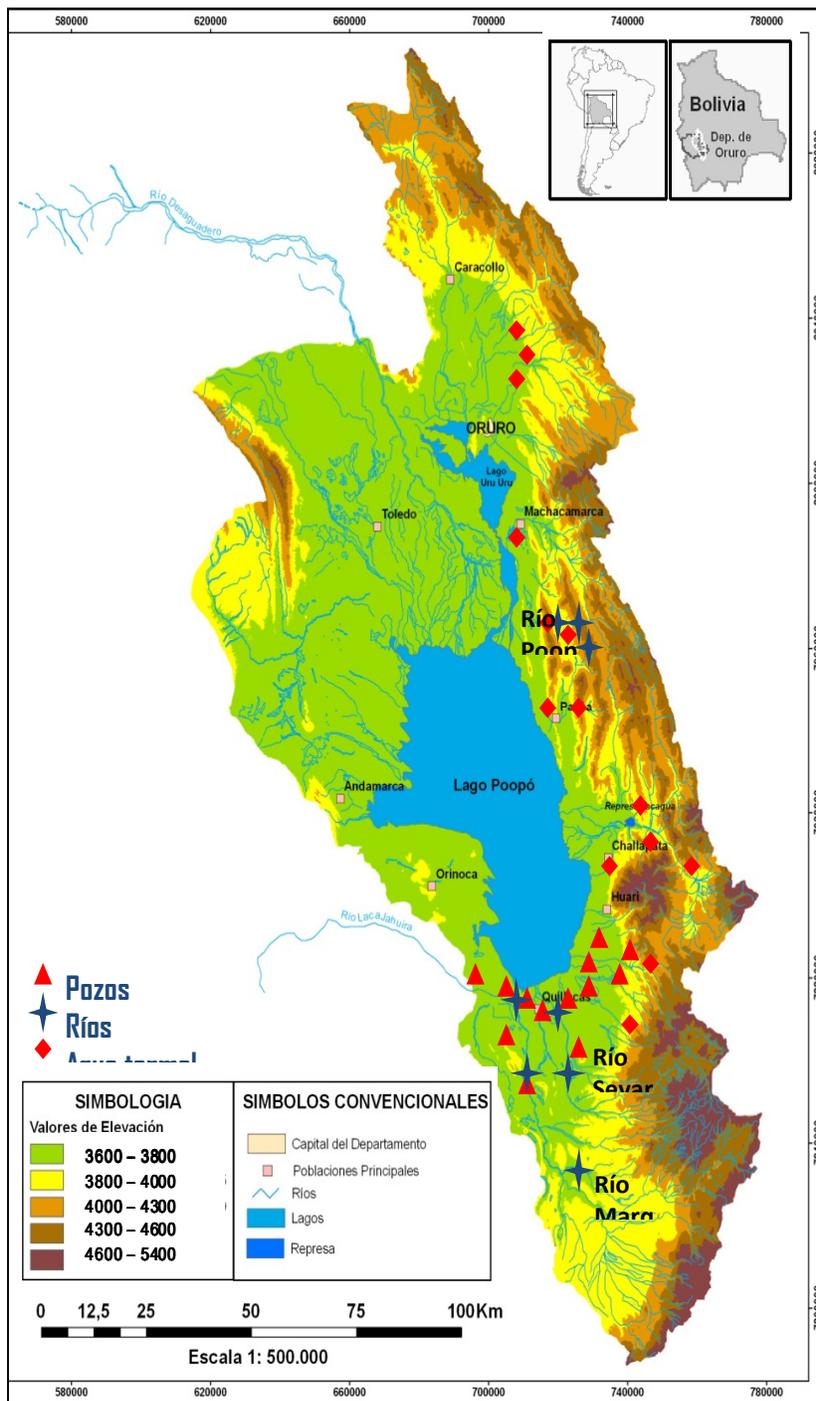
En este sentido, el presente trabajo tiene como principal objetivo evaluar el grado de contaminación por arsénico geogénico en muestras de aguas naturales (ríos, pozos y vertientes termales), determinar su distribución espacial dentro de la cuenca del lago Poopó y determinar características fisicoquímicas generales para evaluar la calidad del agua de consumo.

## SECCION EXPERIMENTAL

### Área de Estudio

El lago Poopó se encuentra ubicado en la parte central del Altiplano Boliviano, a una altitud de 3686 metros sobre el nivel del mar, el clima alrededor del lago es característico de una zona semi-árida, con un promedio anual de precipitación de 300-400 mm, el periodo de lluvias se extiende desde noviembre hasta abril y el periodo seco desde mayo hasta octubre. La temperatura promedio anual es de 7°C, con variaciones diarias significativas desde -10 hasta 20°C [19] (Fig. 1). El área de la cuenca del lago Poopó es de 24013  $\text{km}^2$ , contiene veintidós sub-cuencas y la presencia efímera de arroyos y ríos, cuyo caudal se ve afectado según la época estacional, muchos arroyos desaparecen en época seca, entre los ríos más importantes está el río Desaguadero ubicado al norte de la cuenca y al sur el río Marques y el río Sevaruyo [20] (Fig. 1). El agua subterránea es de vital importancia para los pobladores del

área rural del Altiplano Boliviano, en especial para los pobladores de las diferentes comunidades asentadas alrededor del lago Poopó puesto que es la principal fuente de agua de consumo y es extraída de pozos excavados poco profundos ubicados al interior de las viviendas o en la plaza central de las diferentes comunidades. Por otro lado, se han identificado manifestaciones geotérmicas en forma de fumarolas, géiseres y manantiales termales a lo largo de la Cordillera Oriental y Occidental [19], las manifestaciones termales dentro de la cuenca del lago Poopó se dan en forma de manantiales termales y son utilizados para baños y piscinas mientras que otros simplemente fluyen a través de la planicie altiplánica.



## Muestreo y análisis

El muestreo se realizó siguiendo protocolos estandarizados para la toma de muestras, incluyendo la filtración (poro  $\phi=0,45 \mu\text{m}$ ) y la obtención de una porción de muestra para la determinación de aniones y otra porción de muestra para la determinación de cationes y elementos traza, esta última preservada con ácido nítrico. Ambas porciones se refrigeraron a  $4^\circ\text{C}$  hasta el análisis de laboratorio. El pH, la conductividad eléctrica, la temperatura y el potencial de óxido reducción fueron determinados durante el trabajo de campo empleando para ello un equipo HACH multiparámetro. La alcalinidad también fue determinada en el campo, mediante titulación con HCl hasta alcanzar el punto equivalente. Los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  fueron determinados mediante cromatografía iónica, mientras que los cationes mayoritarios  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y los elementos traza incluyendo al arsénico fueron determinados mediante técnicas espectroscópicas ICP – OES en los laboratorios del departamento de Recursos Naturales del Royal Institute of Technology, (KTH) en Estocolmo, Suecia.

Un total de cuarenta y cinco muestras de agua fueron colectadas incluyendo muestras provenientes de pozos de consumo, ríos y manantiales termales. La ubicación geográfica de los puntos de muestreo fue registrada empleando sistema de posicionamiento global, (GarminGPSmap60Csx) que posteriormente fue trasladado a un mapa (Fig. 1).

## RESULTADOS, DISCUSION

### Manantiales termales

Las aguas termales se encuentran ubicadas en la parte oriental de la cuenca del lago Poopó, se tomaron muestras de 16 manantiales termales justo en el sitio donde emergen a la superficie de la tierra, tanto en lugares privados como piscinas, públicos y naturales (Fig. 1).

Los valores de pH varían desde 6,3 hasta 8,3 con un promedio de 7,0, mientras que el potencial de óxido reducción varía desde +106 hasta +172 mV. La temperatura varía en un amplio rango que va desde los  $40^\circ\text{C}$  hasta los  $75^\circ\text{C}$  con un promedio de  $56^\circ\text{C}$  y la conductividad eléctrica varía en un rango desde 1,8 hasta 75 mS/cm, lo que indica la presencia de elevadas cantidades de sales disueltas. Los iones mayoritarios predominantes son el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Cl}^-$  (Fig. 2) con una distribución porcentual de 43,8% tipo Na-Cl y 31,2% tipo Na-Cl- $\text{HCO}_3^-$ . Entre los elementos trazas más importantes el litio y el silicio presentaron elevadas concentraciones con valores de concentración de hasta 15,4 mg/L y 4,3 mg/L respectivamente. La presencia de arsénico en las muestras de aguas termales es significativa aunque no muy elevada, los valores de concentración variaron desde 7,8  $\mu\text{g/L}$  hasta 65,3  $\mu\text{g/L}$  (Fig. 2).

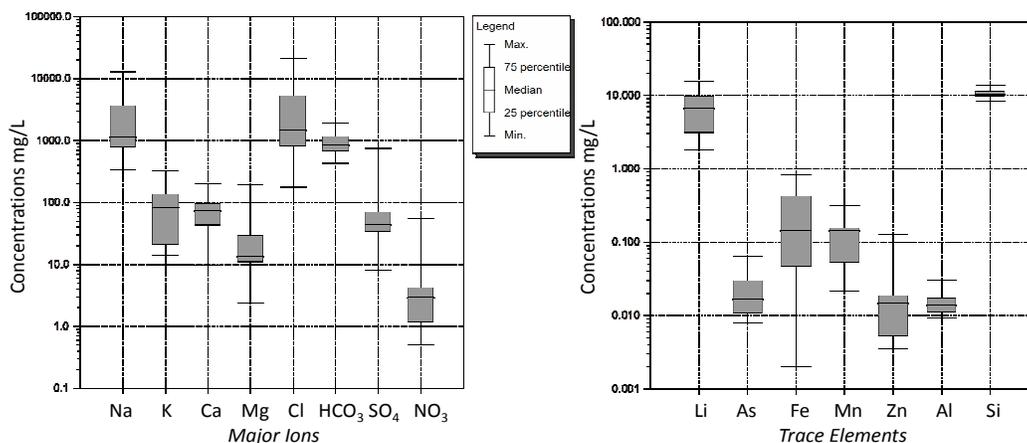


Figura 2. Distribución de iones mayoritarios y elementos traza presentes en aguas termales.

### Aguas superficiales (Ríos)

Se colectaron en total 8 muestras provenientes de tres ríos, tres muestras sobre el curso del río Poopó ubicado en la parte oriental de la cuenca, dos muestras sobre el curso del río Sevaruyo y tres muestras sobre el curso del río Marques, estos dos últimos ríos ubicados en la parte sur de la cuenca del lago Poopó. Es importante hacer notar que las muestras obtenidas sobre el curso del río Poopó fueron obtenidas desde el nacimiento hasta antes del inicio de las

actividades mineras, es decir en el curso natural del río. Los otros dos ríos el Marques y el Sevaruyo pueden verse afectados en menor medida por actividades agrícolas o ganaderas (Fig. 1).

Se encontraron valores de pH en un rango de 7,6 – 8,4 y temperaturas que van desde los 17 hasta los 23 °C. Los iones mayoritarios predominantes son  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  (Fig. 3), la clasificación de las aguas superficiales muestran aguas tipo Na–Cl– $\text{HCO}_3$ . Los elementos traza en los tres ríos en su mayoría, muestran bajos niveles de concentración (Fig. 3), lo que indica que las muestras obtenidas en la parte alta del río Poopó aún no están afectadas por las actividades mineras que se desarrollan con gran intensidad aguas abajo. Los valores de concentración de arsénico varían de entre 5,0  $\mu\text{g/L}$  hasta 87  $\mu\text{g/L}$ , el río Poopó contiene concentraciones relativamente bajas desde 5,0  $\mu\text{g/L}$  hasta un máximo de 12  $\mu\text{g/L}$ , mientras que los ríos ubicados al sur de la cuenca son los más afectados por la presencia de arsénico geogénico, encontrándose concentraciones con valores de hasta 87  $\mu\text{g/L}$  (Fig. 3).

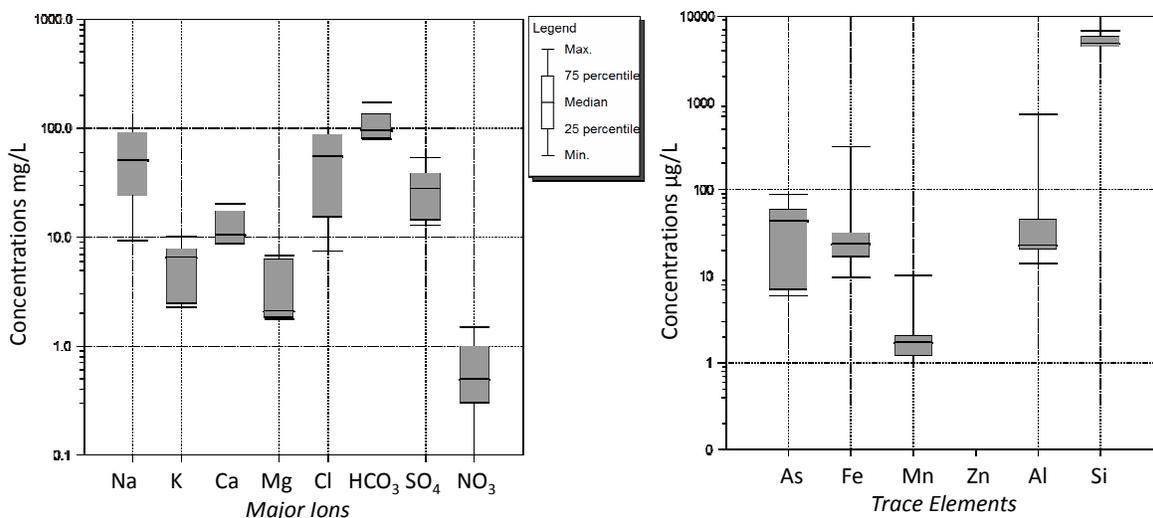


Figura 3. Distribución de Iones mayoritarios y elementos traza presentes en aguas superficiales.

#### Aguas subterráneas (pozos)

Un total de veintinueve pozos fueron muestreados en comunidades ubicadas en la parte sur de la cuenca del lago Poopó por ser esta zona la más afectada con la presencia de arsénico geogénico. El agua de los pozos se utiliza fundamentalmente para beber, cocinar y lavar, algunos de los pozos además se los emplea para el riego de pequeñas parcelas al interior de las viviendas (Fig. 1).

Los resultados más importantes muestran valores de pH que varían desde 6,6 hasta 7,9. Los iones mayoritarios son el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  (Fig. 4) dando la clasificación de aguas tipo Na–Cl– $\text{HCO}_3$ . Entre los elementos trazas más importantes el boro y el litio presentaron elevadas concentraciones con valores de entre 507-4359  $\mu\text{g/L}$  para el boro y de 56-4372  $\mu\text{g/L}$  para el litio (Fig. 4). La presencia de arsénico en las muestras tomadas de los pozos de consumo es significativa y muy elevada, los valores de concentración van desde los 8  $\mu\text{g/L}$  hasta 256  $\mu\text{g/L}$  con un promedio de 72  $\mu\text{g/L}$  (Fig. 4). Todos los pozos de consumo excepto uno exceden los límites máximos establecidos por la OMS, lo que es alarmante por el riesgo a la salud a la que están expuestos los pobladores de la zona rural del Altiplano Boliviano.

## CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica de las aguas naturales, tanto superficiales como subterráneas en la cuenca del lago Poopó, muestran valores de pH que están cerca a la neutralidad y en algunos casos es ligeramente alcalino. La conductividad eléctrica en la mayoría de los cuerpos de agua estudiados es elevada, esta característica es típica en cuerpos de agua de zonas áridas y cuencas endorreicas debido a la rápida evaporación que deja atrás minerales tipo evaporitas que le dan un carácter salino a las fases acuosas. Las aguas termales sin embargo son las más salinas, ya que en su paso a través de las fracturas, el largo tiempo residencia y de contacto con la roca madre además de la elevada temperatura, le permite disolver mayor cantidad de minerales lo cual le da un carácter aún más salino. Los

principales iones mayoritarios de los cuerpos de agua estudiados son  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ , lo que permite clasificar a los cuerpos de agua primordialmente como aguas tipo Na-Cl y tipo Na-Cl- $\text{HCO}_3$ .

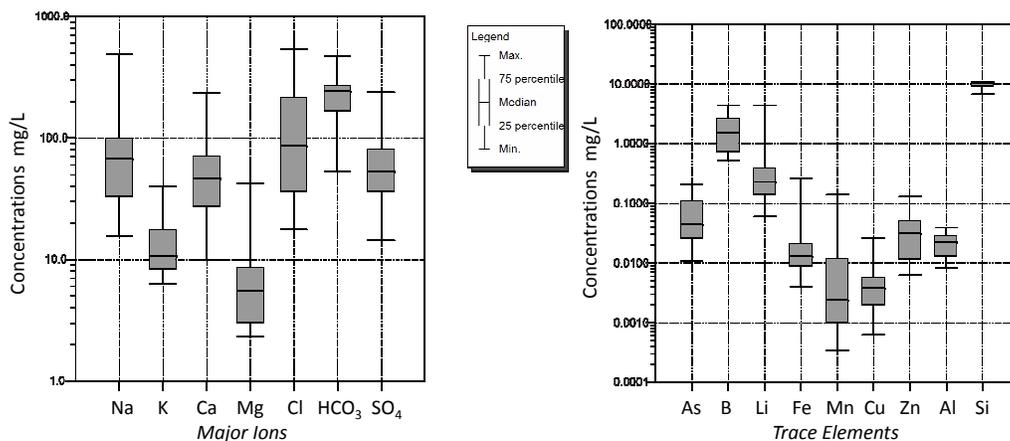


Figura 4. Distribución de iones mayoritarios y elementos traza presentes en el agua de pozos.

Respecto a los elementos traza se pudo evidenciar que los metales como el hierro, manganeso, cobre y zinc están en niveles de concentración muy bajas, típicos de las aguas naturales, lo que permite corroborar que los cuerpos de agua estudiados no están afectados por actividades antropogénicas, sobre todo por actividades mineras cuyas principales características son la presencia de elevadas concentraciones de metales.

Respecto a algunos elementos traza como el boro, el litio y el silicio, se ha podido encontrar que en algunas de las muestras estudiadas, sobre todo en aguas subterráneas hay elevadas concentraciones de estos elementos, la presencia de estos elementos es típica en zonas áridas y volcánicas. El boro y el litio son elementos que pueden causar ciertos problemas a la salud si es que es ingerido por medio del consumo de agua contaminada.

En lo que respecta al arsénico, este está presente en elevadas concentraciones en todos los cuerpos de agua estudiados, la distribución del arsénico en el área estudiada es heterogénea y muy variable, aunque es posible evidenciar que el mayor impacto se encuentra la parte sur de la cuenca del lago Poopó. Las aguas termales y los ríos tienen relativamente más baja concentración de arsénico comparada con el agua proveniente de los pozos. En las cabeceras de montaña y los nacientes, los ríos ya transportan consigo concentraciones de arsénico relativamente altas, lo que indica que existe una fuente geológica natural en las fajas geológicas superficiales de la cordillera oriental. La presencia de elevadas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas sobre todo en el agua extraída de pozos de consumo es una indicación de que el arsénico es liberado de fuentes geológicas superficiales y subterráneas por el contacto del agua subterránea en su trayecto desde las montañas hacia la planicie de la cuenca del lago Poopó. La infiltración, el largo tiempo residencia y diferentes procesos geoquímicos permiten liberar el arsénico de la roca y disolverse en el acuífero subterráneo.

Lamentablemente la población rural del Altiplano Boliviano, en especial las personas de comunidades asentadas alrededor del lago Poopó, están en alto riesgo de contraer enfermedades causadas por la exposición al agua de consumo que se ha evidenciado que tiene elevadas concentraciones de arsénico con valores muy por encima del valor recomendado por la OMS, sin embargo los pobladores están más preocupados por la falta de agua, las sequías o por el gusto salobre del agua que por los elevados contenidos de arsénico o la baja calidad del agua de consumo.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo. Swedish International Development Cooperation Agency (SIDA Contribution: 7500707606).

## REFERENCIAS

1. Centeno, J.A., 2000. Arsenic-Induced Lesions. Armed Forces Institute of Pathology, Washington DC, 48 pp.
2. Bundschuh, P., Bhattacharya, P. 2012. About the book series. In: Ng, Noller, Naidu, Bundschuh & Bhattacharya (eds.)



- "Understanding the Geological and Medical Interface of Arsenic, As2012". Interdisciplinary Book Series: "Arsenic in the Environment—Proceedings". Series Editors: Jochen Bundschuh and Prosun Bhattacharya, CRC Press/Taylor & Francis, (ISBN 978-0- 415-63763-3), pp. v-vi.
3. Smedley, P., Kinniburgh, D., 2002. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17 517-568.
  4. OMS, 2011. Organización Mundial para la Salud, Guías para la calidad del agua potable (Tercera edición).
  5. Bhattacharya, P., Frisbie, S.H., Smith, E., Naidu, R., Jacks, G., Sarkar, B. 2002a. Arsenic in the environment: A global Perspective. In: B. Sarkar (Ed.) *Handbook of Heavy Metals in the Environment*. Marcell Dekker Inc., New York, pp. 145-215.
  6. Bhattacharya, P., Jacks, G., Ahmed, K.M., Routh, J., Khan, A.A., 2002b. Arsenic in groundwater of the Bengal delta plain aquifers in Bangladesh. *Bull. Environ. Cont. Toxicol.* 69: 538-545.
  7. Jochen Bundschuh, Alejo Pérez Carrera Marta Litter. Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana. Editado por CYTED Impreso en Argentina, Octubre 2008.
  8. One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. Jochen Bundschuh, Marta I. Litter, Faruque Parvez, Gabriela Román-Ross, Hugo B. Nicolli, Jiin-Shuh Jean, Chen-Wuing Liu, Dina López, María A. Armienta, Luiz R.G. Guilherme, Alina Gomez Cuevas, Lorena Cornejo, Luis Cumbal, Regla Toujaguez. *Science of the Total Environment* 429 (2012) 2-35.
  9. Proyecto Piloto Oruro (PPO) (1992) Metal contents in Lake Sediments, Totora and Myriophyllum (PPO-013). Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Secretaria de Medio Ambiente, Swedish Geological AB, La Paz, Bolivia, 47 p.
  10. Proyecto Piloto Oruro (PPO) (1996a) Impact of the mining and industrial contamination in groundwater, (Impacto de la contaminación minera e industrial sobre aguas subterráneas). R-BOE-9.45-9702-PPO 9616. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Secretaria de Medio Ambiente, Swedish Geological AB, La Paz, Bolivia.
  11. Proyecto Piloto Oruro (PPO) (1996b) Mining impact and the mineral processing in rivers and lakes (Impacto de la minera y el procesamiento de minerales en cursos de aguas y lagos). R-BOE-9.45-9703-PPO 9612. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Secretaria de Medio Ambiente, Swedish Geological AB, La Paz, Bolivia.
  12. Proyecto Piloto Oruro (PPO) (1996c) Environmental issue of the metals and non metals in the Desaguadero hydrologic system, (Aspectos ambientales de los metales y metaloides en el sistema hidrológico del Desaguadero) (PPO-010). Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Secretaria de Medio Ambiente, Swedish Geological AB, La Paz, Bolivia, 97 p.
  13. García Moreno M.E. Transport of arsenic and heavy metals to Lake Poopó – Bolivia, natural leakage and anthropogenic effects. 2006. Doctoral thesis, Lund University.
  14. Tapia, J., Audry, S., Townley, B., Duprey, J.L. 2012. Geochemical background, baseline and origin of contaminants from sediments in the mining-impacted Altiplano and Eastern Cordillera of Oruro, Bolivia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 12 3 -20.
  15. Quintanilla, J., Coudrain-Ribsten, A., Martinez, J., Camacho, V., 1995. Hidroquímica de las aguas del Altiplano de Bolivia (Hydrochemistry of the waters of the Bolivian Altiplano; in spanish). In Ribstein, P., Francou, B., Coudrain-Ribsten, A., Mourguiart, P. (Eds.). "Eaux, Glaciers et Changements Climatiques dans les Andes Tropicales". *Bull. de l' Institut Français d' Études Andines*, vol 24/3, pp. 461 - 471.
  16. Banks, D., Markland, H., Smith, P.V., Mendez, C., Rodriguez, J., Huerta, A., Sæther, O.M. 2004. Distribution, salinity and pH dependence of elements in surface waters of the catchment areas of the Salars of Coipasa and Uyuni, Bolivian Altiplano, *Journal of Geochemical Exploration* 84 141-166.
  17. Hermansson E, Karlsson L. Occurrence and distribution of heavy metals in the groundwater of Poopó basin, Bolivian Altiplano. 2004. MSc. Thesis, Lund University.
  18. Van Den Bergh, K., Du Laing, G., Montoya, J.C., De Deckere, E., Tack, F.M.G. (2010) Arsenic in drinking water wells on the Bolivian high plain: Field monitoring and effect of salinity on removal efficiency of iron-oxides containing filters. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 45:13, 1741-1749.
  19. Huaranca Olivera, W.R., Neumann-Redlin, C., 2000. Thematic maps of mineral resources of Bolivia. *Uncia Quadrangle*. Hydrogeological map, sheet SE-19-12 UNCIA with Explanatory note, Sergeotecmin.
  20. Calizaya A., 2009. Water resources management efforts for best water allocation in the lake Poopó basin, Bolivia, Report 1048, Lund University. Lund, Sweden.