



## EVALUACIÓN HIDROQUÍMICA PRELIMINAR DE RESERVORIOS DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO PRÓXIMOS A ACTIVIDADES MINERAS EN LA MICROCUENCA HAMPATURI EN LA PAZ, BOLIVIA

Received 08 03 2022

Accepted 12 15 2022

Published 12 30 2022

Vol. 39, No.5, pp. 164-174, Nov./Dic.2022

Revista Boliviana de Química

39(5), 164-174, Nov./Dec. 2022

Bolivian Journal of Chemistry

DOI: 10.34098/2078-3949.39.5.2



Full original article

Peer-reviewed

Romel Emil Aruquipa Buitre\*, María Isabel Chambi Tapia, Israel Quino Lima, Oswaldo Eduardo Ramos Ramos

Hydrochemistry Laboratory, Instituto de Investigaciones Químicas IIQ, Chemical Sciences Department, Facultad de Ciencias Puras y Naturales FCPN, Universidad Mayor de San Andrés UMSA, P.O. Box 303, Calle Andrés Bello s/n, Ciudad Universitaria Cota Cota, phone +59122792238, La Paz, Bolivia, <https://iiq-umsa-bo>, <http://cienciasquimicas.umsa.bo/>

**Keywords:** Hampaturi, Drinking water, Water reservoirs, Mining activities, Hydrochemistry

**Palabras clave:** Hampaturi, Agua de consumo, Reservorios de agua, Actividad minera, Hidroquímica

### ABSTRACT

**Preliminary hydro chemical evaluation of water reservoirs close to mining activities in the Hampaturi micro-basin in La Paz, Bolivia.** The preliminary hydrochemical evaluation of the water reservoirs for human consumption close to mining activities in the Hampaturi micro-basin in La Paz, Bolivia, administered by the Public Social Water and Sanitation Company (EPSAS in Spanish) was carried out. The results of the physicochemical field and laboratory analyses show two kinds of water. Meltwater from elevated Andean glaciers with a neutral to slightly alkaline pH, low electrical conductivity (EC) values and

low total dissolved solids (STD) values with high dissolved oxygen saturation (DO) values. and low concentrations of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , classifying them according to the WHO as demineralized waters. The second class of water from sampling points outside the dam system and corresponding to the Hampaturi River, shows evidence of mining tributaries that provide high concentrations of the aforementioned analytical parameters. Therefore, according to the Regulation on Water Contamination of Law No. 1333, they are classified as unfit for human consumption..



\*Correspondent autor:

[raruquipab@fcpn.edu.bo](mailto:raruquipab@fcpn.edu.bo)

## RESUMEN

Se realizó la evaluación hidroquímica preliminar de los reservorios de agua para consumo humano próximo a actividades mineras en la microcuenca Hampaturi en La Paz, Bolivia, administrado por la Empresa Pública Social de Aguas y Saneamiento (EPSAS). Los resultados del análisis fisicoquímico de campo y de laboratorio muestran dos clases de aguas. El agua de deshielo de glaciares cordilleranos elevados con un pH neutro a ligeramente alcalino, bajos

valores de conductividad eléctrica (CE) y bajos valores de sólidos totales disueltos (STD), con altos valores en saturación de oxígeno disuelto (OD). y bajas concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , clasificándolas según la OMS como aguas desmineralizadas. La segunda clase de agua procedente de puntos de muestreo fuera del sistema de represas y correspondientes al río Hampaturi, muestran evidencias de afluentes mineros que aportan altas concentraciones de los mencionados parámetros analíticos. Por lo tanto, según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la LeyN°1333, son clasificadas como no aptas para consumo humano.

## INTRODUCCIÓN

Las ciudades de La Paz y El Alto se abastecen de agua potable de las microcuencas de Tuní Condoriri, Huayna Potosí (Este y Oeste), Milluni, Choqueyapu, Incachaca y Hampaturi [1]. Las microcuencas Incachaca y Hampaturi constituyen las dos fuentes de abastecimiento del sistema Pampahasi en la ciudad de La Paz [2]. La microcuenca Hampaturi presenta un sistema de embalses constituido por cuatro represas (Figura 1): Ajuan Khota, Serkhe Khota, Kunka Huikhara y Mikhaya [3]. La naciente de las aguas superficiales de la microcuenca Hampaturi desemboca a la subcuenca de Irpavi, cuyas aguas constituyen, a su vez, parte de la cuenca del río La Paz juntamente con subcuencas: Choqueyapu, Orkojahuirá, Achumani y Huañajahuira [4].

La zona de Hampaturi es un patrimonio natural y cultural que empieza a desarrollar una dinámica como área de gran potencial para el turismo nacional e internacional [4]. La misma microcuenca se encuentra al borde de la Cordillera Real o Cordillera Oriental de los Andes compuesta por rocas sedimentarias terciaria y cuaternaria. Cuenta con yacimientos de plomo, plata y zinc, extraídas anteriormente por la empresa minera “La Solución” [5]. En la actualidad, existen numerosas concesiones mineras [6]. Debido a las actividades mineras, continúa la generación de drenajes ácidos de mina (DAM). Los DAM son soluciones altamente reactivas, que pueden disolver la mayoría de minerales, de modo que ocasiona drenaje ácido de roca (DAR) [7]. La mina La Solución se encuentra al sur de los reservorios de agua (Figura 1 y 2). El acceso restringido a personal no autorizado, no permite corroborar los detalles de las labores de interior de mina y la información sobre la localización de las galerías. A priori, se puede indicar que dichas labores no tienen incidencia en los embalses de agua [5]. Se puede evidenciar que las aguas provenientes de la mina son conducidas mediante tuberías, fuera de los sistemas y cuerpos de agua de las represas. Empero, por el cambio climático y el movimiento de tierras por la actividad minera, se desconoce la infiltración de las DAM y DAR hacia los reservorios de agua [6].

La planta de tratamiento de agua Pampahasi recibe aguas de los embalses de Hampaturi, Incachaca y del río Palcoma [8]. Esta planta tiene una capacidad de tratamiento de 705 L/s y almacenamiento de 7500 m<sup>3</sup>. El tratamiento consta de los siguientes procesos: disipación de energía, dosificación de reactivos, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y almacenamiento [8].

Los problemas actuales de la zona son: *i*) El patrón de asentamiento de las comunidades, sus áreas de pastoreo o cultivo que están ligadas a la disponibilidad de fuentes de agua, *ii*) Las características de las riberas, con grandes pendientes y zonas inestables. Las comunidades se encuentran bajo el riesgo de riadas y deslizamientos que afectan sus viviendas y sus áreas de producción, *iii*) En la zona alta (por encima de los 4300 m s.n.m.), el estado de conservación de los cuerpos de agua es relativamente bueno. Sin embargo, el principal problema radica en la contaminación de las aguas por la actividad minera. Por otro lado, en la zona colindante con el área urbana, existe una fuerte presión por la explotación de áridos que genera a su vez problemas de inestabilidad en los taludes y liberación de sedimentos que incrementan el factor de riesgo aguas abajo [9].

El presente artículo es parte de una serie de investigaciones de nuestro grupo y responde a necesidades críticas ambientales de las comunidades humanas de la zona en estudio y de los grandes centros urbanos paceños consumidores de agua. Contempla análisis fisicoquímicos y análisis cuantitativos de aniones y cationes mayoritarios, además de oligoelementos como zinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn) y elementos traza (ET) de As y Cu de muestras de los reservorios de agua y del curso natural de la microcuenca Hampaturi. Este estudio pretende además,



aportar al conocimiento del comportamiento hidroquímico de las aguas superficiales en esta región. Para esto, se analizaron los factores que influyen en la variabilidad espacial de los contenidos de minerales y su posible relación con factores hidrogeológicos y antropogénicos. Todo esto, con el objetivo de obtener una caracterización inicial de la aptitud de los cuerpos de agua en el área de estudio, clasificando los puntos de muestreo como aguas aptas para consumo humano según la normativa NB 512 y la ley N°1333.

## EXPERIMENTAL

### Área de estudio

La microcuenca Hampaturi está ubicada en el distrito rural 22 Hampaturi del Municipio de La Paz, a 30 km del centro de la ciudad. En la Figura 1 se muestra la ubicación de los asentamientos mineros. La ruta de acceso a la zona de estudio es por Pampahasi, pasando luego por las comunidades de la microcuenca Hampaturi hasta llegar a Jachapacheta Sector Mikhaya [9].

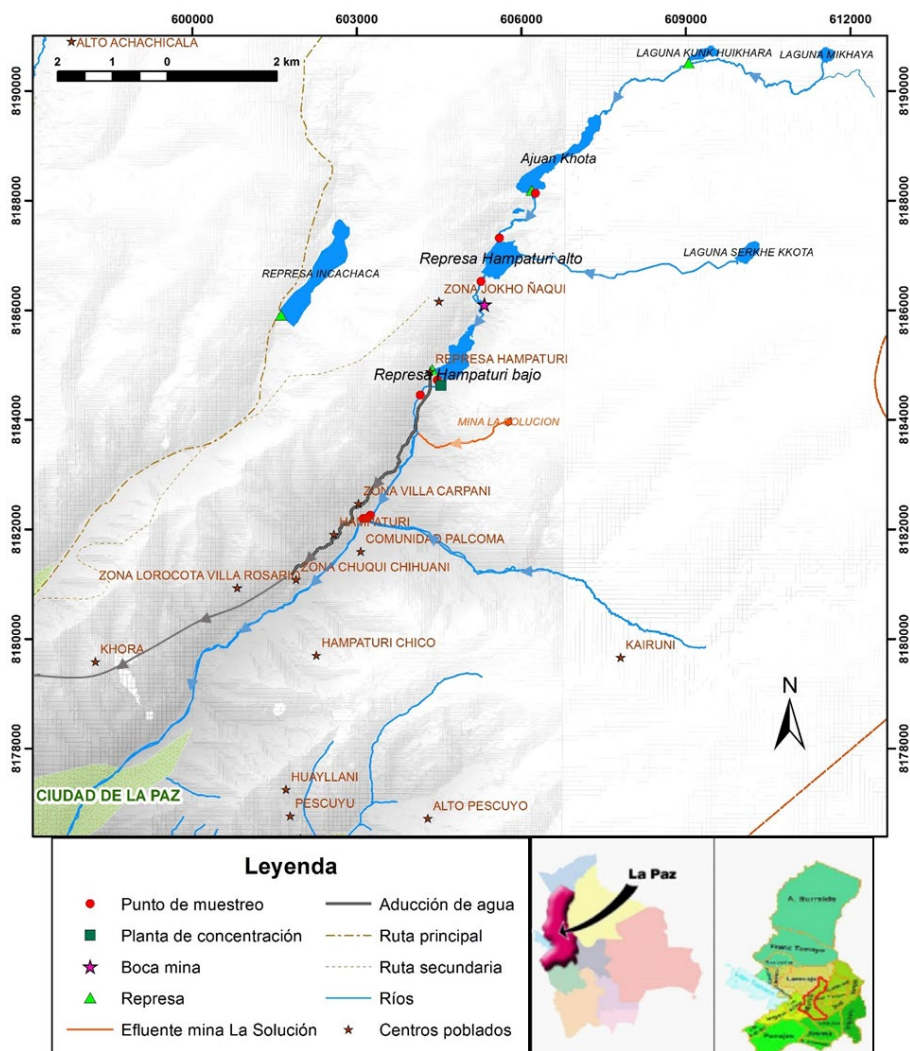


Figura 1. Ubicación del área de estudio cercana a la ciudad de La Paz, 4 represas a lo largo del río Hampaturi.

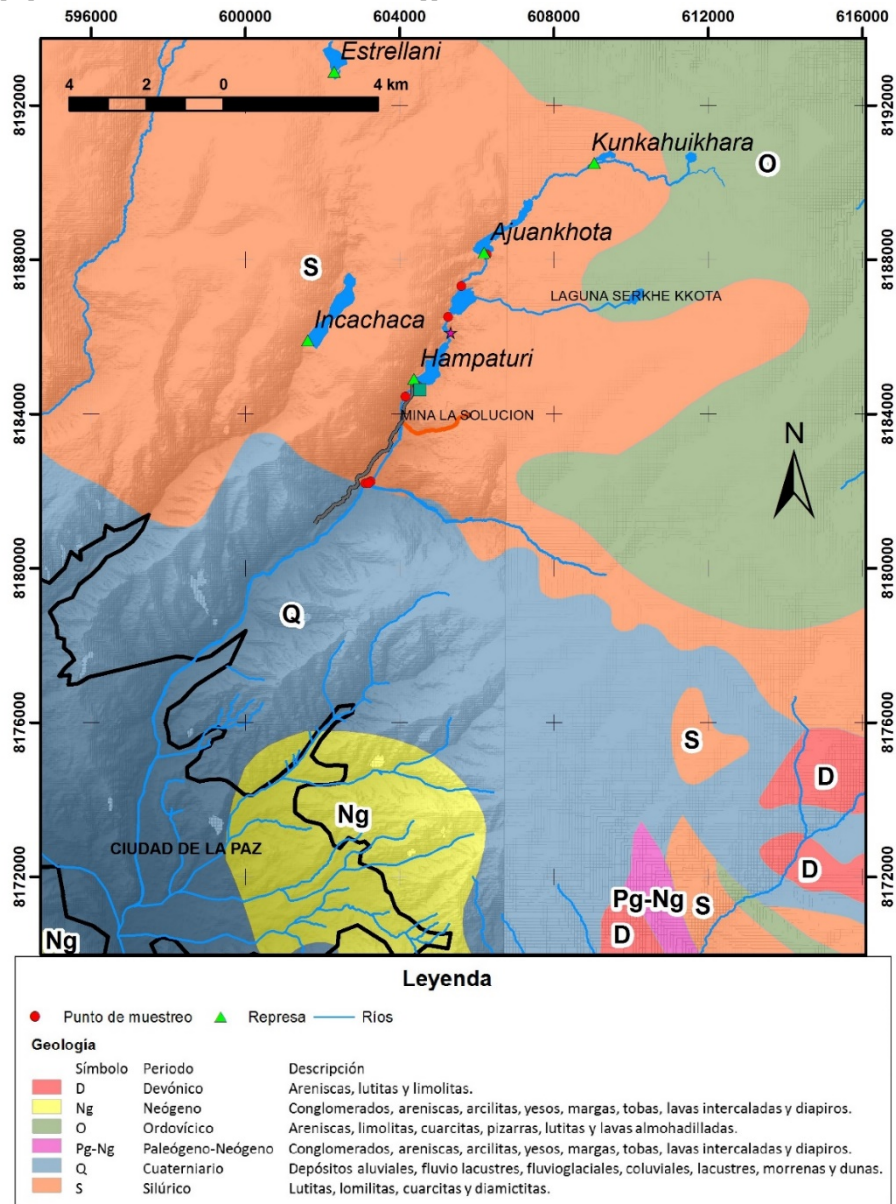


Figura 2. Descripción geológica del área de estudio y de la microcuenca Hampaturi, ubicación de la mina La Solución

Dentro del contexto geológico regional, la zona de estudio está dominada por materiales de la edad Paleozoica, mayoritariamente del Ordovícico y del Silúrico formado por una sucesión de pizarras limolíticas oscuras [5]. En la microcuenca Hampaturi, ubicada sobre esta parte de la cordillera Real o Cordillera Oriental de los Andes, se encuentran formaciones terciarias y cuaternarias, al igual que en la ciudad de La Paz. Las características para cada descripción geológica se muestran en la figura 2. La vegetación está compuesta por variedades endémicas como las retamas, paja brava (*Stipa ichu*) y thola (*Baccharis dracunculifolia*). En los bofedales de Hampaturi se registró la presencia de Pacopaco (*Aciachne pulvinata*) una especie nativa de laderas y planicies secas que está colonizando agresivamente los cojines dominantes del bofedal [9].

### Toma de muestras

Las muestras se colectaron de corrientes de aguas superficiales de la microcuenca y de aguas de desborde de las represas. Los puntos de muestreo se seleccionaron en base los siguientes criterios: el entorno y las características del flujo de agua; la identificación de actividades antropogénicas cerca de los cuerpos de agua; y la accesibilidad a los





puntos de muestreo. La ubicación de los puntos de muestreo fue realizada por el Global Positioning System (GPS) o sistema de posicionamiento global (Garmin modelo GPSmap 60CSx) y su distribución se presenta en la figura 3.

Las muestras de aguas superficiales fueron colectadas en época seca en abril de 2018; fueron filtradas al vacío a través de una membrana Sartorius de 0.45  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro y transvasadas en envases de plástico de 100 mL con tapa rosca. La muestra fue dividida y colocada en dos envases para el análisis correspondiente; el primer envase fue destinado para la determinación de cationes mayoritarios y metales, preservando la muestra con la adición de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) concentrado hasta alcanzar un pH aproximado a 2.0. El segundo envase es destinado para la determinación de aniones mayoritarios. Ambos envases se llenaron hasta el tope, evitando la presencia de burbujas de aire. Posteriormente, las muestras fueron refrigeradas a 4°C para el análisis en laboratorio. La Tabla 1 muestra el detalle de los puntos de muestreo del presente estudio.

**Tabla 1.** Coordenadas de los puntos de muestreo (grados decimales).

N <sup>ro</sup> .	LUGAR	CÓDIGO	COORDENADAS UTM				DESCRIPCIÓN
			LATITUD	LONGITUD	ZONA	ALTURA [m s.n.m.]	
1	Represa Ajuankhota	RAK	606256	8188130	19K	4425	Muestra de desborde de la represa
2	Entrada Represa Hampaturi Alto (Nueva represa)	RHI-1	605600	8187315	19K	4366	Curso natural del río antes del ingreso a la represa
3	Salida Represa Hampaturi Alto (Nueva represa)	RHS-1	605264	8186518	19K	4308	Muestra de la salida de la represa nueva
4	Salida Represa Hampaturi Bajo	RH-2	604466	8184723	19K	4206	Muestra de la salida de la represa, forma el curso natural del río
5	Río Hampaturi	RH-3	604160	8184445	19K	4113	Mezcla de rebalse de represa y aguas de mina
6	Río Hampaturi,	RH-4	603251	8182250	19K	3923	Curso natural del río, morrena terminal
7	Río Hampaturi	RH-5	603121	8182198	19K	3917	Curso natural del río, morrena terminal
8	Afluente al Río Hampaturi	ARH	603190	8182202	19K	3913	Río Hampaturi, mezcla de ambos ríos en morrena terminal

### Determinación de parámetros de campo

Se realizó la medición de diferentes parámetros de campo empleando un equipo portátil marca HANNA Instruments, modelo 98185. Los parámetros de campo determinados con este equipo fueron: Potencial de Hidrogeno (pH); Potencial Óxido-Reducción (Eh); Conductividad eléctrica (CE); Sólidos Totales Disueltos (STD); Temperatura (T) y Oxígeno Disuelto (OD) [10]. La alcalinidad total se determinó mediante valoración en campo con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 0.1 N hasta el cambio de color con un indicador ácido-base mixto, cuyo viraje de color ocurre a pH cerca de 4 [11]. La medición de los caudales del curso natural del río Hampaturi en los puntos de muestreo se realizó por



aforo directo, dividiendo el ancho del río en secciones y midiendo la velocidad de la corriente dentro de las mismas con un molinete [12]. El molinete utilizado es de la marca Skywatch Flowwatch JDC Electronics.

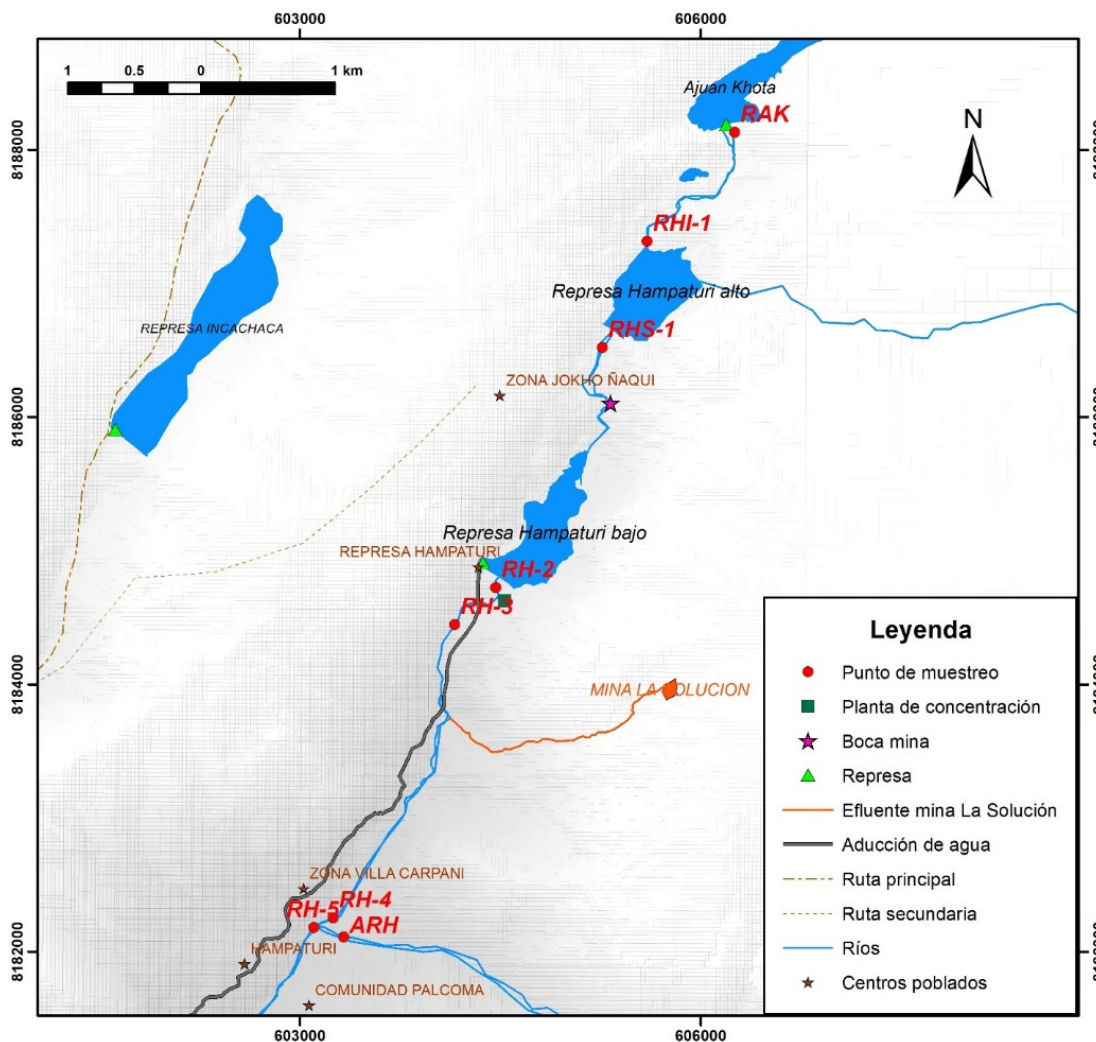


Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo sobre el curso natural y entre las represas de la microcuenca Hampaturi

### Determinación de parámetros de laboratorio

Los análisis de las muestras de aguas se realizaron en el Laboratorio de Hidroquímica del Instituto de Investigaciones Químicas (IIQ) de la Carrera de Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Puras y Naturales de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). El análisis de los cationes mayoritarios, sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), además de los oligoelementos hierro (Fe), zinc (Zn), y manganeso (Mn), se determinaron en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica (Perkin Elmer AAnalyst 200) con la técnica de Llama. El análisis de elementos traza (ET) de Cu y As se realizó en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica (Perkin Elmer AAnalyst 100, acoplado a un Horno de Grafito (HG 800) [13]. El control de calidad de los resultados fue verificado empleando el Material de Referencia Estándar SRM 1640a – (Oligoelementos en agua natural). Además, se realizó el análisis por triplicado de las muestras y el ajuste instrumental con blancos de control.

En el análisis de aniones mayoritarios, cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), y fluoruros ( $\text{F}^-$ ), se determinaron con un Cromatógrafo de iones (DIONEX, modelo ICS-1100).

### Software para el análisis estadístico e hidroquímico



Para el tratamiento estadístico de los datos se utilizaron varios programas estadísticos. Minitab (versión 17.0) fue utilizado para determinar los valores mínimos, máximos y medios. IBM SPSS (versión 22) fue utilizado para la correlación de Pearson. Finalmente, para la descripción e interpretación de la hidroquímica, se utilizó el software Aquachem (versión 4.0264) como base de datos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Interpretación hidroquímica

El curso natural de las aguas superficiales se inicia en la represa Ajuan khota (Figura 1, 2 y 3), lugar donde se encuentra el primer punto de muestreo (RAK). El aforo de los ríos modela un régimen fluvial con relación a los caudales del río Hampaturi (Figura 4). La cantidad de agua que sale de la represa en el punto RAK tiene un caudal de 1.27 m<sup>3</sup>/s, tomando una dirección de norte a suroeste, de mayor a menor altitud con dirección hacia la ciudad de La Paz (Figura 3). Del punto de muestreo RAK hacia el punto RHI-1 presenta una ligera escorrentía, ya que disminuye el caudal del curso natural del río. En el punto RHS-1, el caudal es controlado por la estructura de la nueva represa Hampaturi. El punto de RH-2, ubicado después de la represa de Hampaturi Bajo, presenta un caudal de 0.73 m<sup>3</sup>/s con una escorrentía de 0.54 m<sup>3</sup>/s al punto RH-3. La escorrentía subterránea, superficial y subsuperficial de las aguas naturales y los afluentes de mina son evacuadas en el punto RH-4; por esta razón, incrementa el caudal en este punto. El último punto RH-5, reúne el caudal de todos los puntos del curso natural del río, al que se suma el caudal del punto ARH (afluente del río Hampaturi).

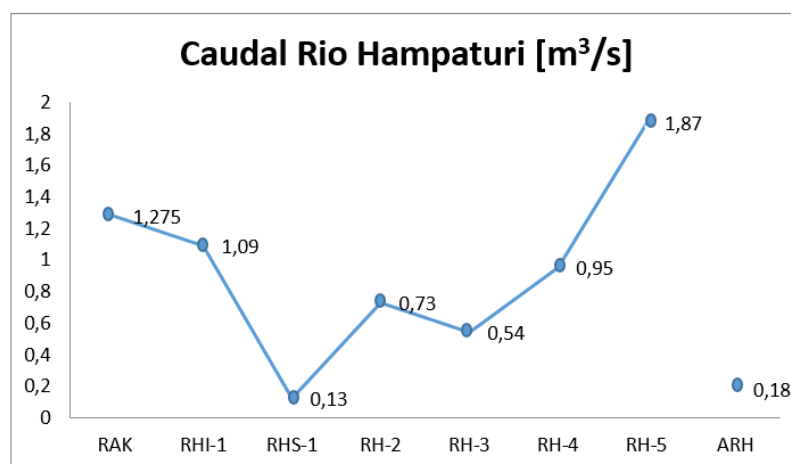


Figura 4. Régimen fluvial del río Hampaturi, muestra diferentes caudales de los puntos de muestreo.

Las características fisicoquímicas y las concentraciones de los iones de las muestras de las aguas superficiales de la microcuenca Hampaturi se presentan en la tabla 2, y se comparan con el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) y la Norma Boliviana de agua de consumo (NB 512). Los resultados de las mediciones muestran un pH dentro del rango de 7.2 a 8.1 para todas las muestras analizadas. Debido a la baja meteorización física, existen bajas concentraciones de los analitos analizados en laboratorio (Tabla 3). La baja concentración de bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) presente en las muestras de agua superficiales de RAK, RHI-1 y RHS-1 se debe a la solubilización del CO<sub>2</sub>, y a una baja disolución de carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) de la calcita provenientes de los suelos y el entorno geológico [14]. La calidad hídrica de la microcuenca Hampaturi, de acuerdo a los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos (Tabla 2), y en comparación con los límites establecidos bajo la normativa RMCH y NB 512 [15], indican que las aguas superficiales están catalogadas como aptas para consumo humano.

La tabla 3 muestra los parámetros físicos y químicos de las aguas superficiales de cada punto de muestreo. Los valores de estos parámetros fueron comparados con los límites permisibles establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la ley N°1333. Este reglamento clasifica el uso adecuado de las aguas superficiales puntuales [16]. La clasificación de los puntos de muestreo RAK, RHI-1, RHS-1, RHS-2, RH-5 y ARH muestran características aptas para todo uso y consumo (Clase A). Note que los puntos RH-5 y ARH se encuentran fuera del sistema de las represas que alimentan la planta de tratamiento de Pampahasi.



**Tabla 2.** Resumen de los parámetros fisicoquímicos del área de estudio evaluados como aguas de consumo

Parámetros	Unidad	Microcuenca Hampaturi			Limite permisible NB 512	Ley N° 1333 RMCH (Clase A)
		Mínimo	Máximo	Media		
pH		7.2	8.1	7.8	6.5 – 9.0	6.0 - 8.5
Temperatura	°C	10.2	13.4	12.0	-	12±3°C
Conductividad Específica (CE)	µS/cm	39.7	186.9	95.9	1500	NA
Oxígeno Disuelto (OD)	%	6.1	6.6	6.4	-	<80% sat
Sólidos Totales Disueltos (TDS)	mg/L	35.1	156.83	82.2	-	1000
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	mg/L	1.4	22.2	6.8	200	200
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	mg/L	1.3	11.3	5.2	150	100
Sodio (Na <sup>+</sup> )	mg/L	1.1	9.0	3.9	200	200
Potasio (K <sup>+</sup> )	mg/L	0.3	3.3	1.1	-	NA
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	9.0	33.9	15.7	370	NA
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	6.4	73.3	36.6	400	300
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	*<LD	6.31	2.3	45.0	20
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	0.3	1.5	0.8	250	250
Hierro Fe	mg/L	*<LD	0.10	0.03	0.3	0.3
Manganeso Mn	mg/L	0.01	0.85	0.3	0.05	0.5
Zinc Zn	mg/L	0.01	3.4	0.8	5.0	0,2
Cobre Cu	mg/L	0.00083	0.316	0.079	1.0	0.05
Arsénico As	µg/L	*<LD	*<LD	*<LD	10	50

(\* Los límites de detección de Fe: 0,03mg/L As: 1,5µg/L; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 0,005mg/L

(NA) No Aplica al Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica "RMCH" de la Ley N°1333.

Las aguas superficiales en los puntos de muestreo RH-3 y RH-4 muestran un incremento de los valores de CE, de cationes y aniones mayoritarios. En base a estos resultados, se recomienda tratamientos específicos para su consumo ya que estas aguas entran dentro de la clasificación de Clase C. Considerando la figura 3, la clasificación de estos dos últimos puntos de muestreo se debe a la cercanía de las actividades mineras, con un aporte de Zn, Cu, Mn y CE de las aguas DAM de la mina "La Solución", que está sobre el río Hampaturi [8,9]. El problema de salud en la población general es la ingesta deficiente en Zn y Cu más que su toxicidad [17], sin embargo, se hace énfasis en la contaminación a partir de la generación de DAM.

De acuerdo a la correlación de Pearson de los compuestos mayoritarios en los cuerpos de agua observados a lo largo del río Hampaturi (Tabla 4), se puede agrupar los cationes y aniones en (Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), (Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), (K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y por último (Mn, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>). Se tomaron en cuenta como correlaciones aceptables las correlaciones entre metales con valores mayores al 70%. La correlación de la tabla 4, se realizó con los analitos cuyas concentraciones son mayores al límite de detección y cuantificación.

El análisis de Clusters (HCA: Hierarchical Cluster Analysis) de la figura 5, permite realizar un análisis de conglomerados de los resultados de la tabla 3. El dendrograma categoriza los parámetros de los puntos de muestreo y los conglo meros o agrupa. La similitud entre los datos correlaciona los puntos de muestreo y los divide en dos grupos según sus concentraciones. El grupo A, reúne los puntos de muestreo de RAK, RHI-1, RHS-1 y RH-2. Las muestras de agua superficial del ingreso y de la salida de las represas se caracterizan por tener bajas concentraciones de los analitos estudiados. El grupo B, conglo meros a los puntos de muestreo RH-3, RH-4, RH-5 y ARH, mostrando una mayor concentración de los analitos, por el impacto de los DAR y DAM al río Hampaturi. Con el propósito de obtener una clasificación de las aguas superficiales de la microcuenca Hampaturi y poder relacionar la solubilidad de los metales del entorno geológico y la hidrología de la zona [19], se elaboraron los diagramas de Piper y los diagramas de Box y Whisker de los grupos A y B clasificados en las figuras 6 y 7 respectivamente. Para el análisis hidroquímico, se consideraron los cationes mayoritarios principales Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>, y los aniones mayoritarios: Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Debido a las bajas concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, no se consideró este anión para la evaluación. Los diagramas construidos en las Figuras 6 y 7 muestran tendencias características del análisis de conglomerados descritas en la figura 5.





**Tabla 3.** Parámetros Fisicoquímicos de los cuerpos de agua por puntos de muestreo y su clasificación a cuerpos receptores por el RMCH de la Ley N°1333

Parámetros	Unidad	Puntos de muestreo							
		RAK	RHI-1	RHS-1	RHS-2	RH-3	RH-4	RH-5	ARH
<b>Parámetros básicos</b>									
Conductividad Eléctrica	µS/cm	38.7	42.1	59.6	72.4	151.2	186.9	82.5	133.1
Oxígeno disuelto (c/O <sub>2</sub> ) saturación)	%	98.2	101.9	100.5	98.1	97.1	95.2	93.4	97.5
pH		8.4	8.2	8.0	7.7	7.17	7.32	7.87	8.1
Temperatura	°C	10.2	12.7	11.2	11.1	11.4	13.2	13.1	13.4
<b>Constituyentes inorgánicos metálicos</b>									
Calcio (c/Ca)	mg/L	1.4	1.6	2.2	2.6	6.01	9.4	22.2	9.1
Cobre (c/Cu)	mg/L	0.002	0.002	0.0008	0.009	0.3	0.3	0.002	0.002
Hierro Soluble (c/Fe)	mg/L	0.1	0.03	0.006	*0.015	0.069	0.003	*0.015	*0.015
Magnesio (c/Mg)	mg/L	1.3	1.3	1.8	2.4	5.35	8.6	9.8	11.3
Manganeso (c/Mn)	mg/L	0.04	*0.01	0.05	0.09	0.8	0.7	0.5	0.02
Sodio (c/Na)	mg/L	1.6	1.1	1.4	2.4	3.4	5.6	6.6	8.9
Zinc (c/Zn)	mg/L	0.02	0.006	0.007	0.3	3.4	1.3	1.2	0.02
Arsénico (c/Zn)	µg/L	*0.75	*0.75	*0.75	*0.75	*0.75	*0.75	*0.75	*0.75
<b>Constituyentes inorgánicos no metálicos</b>									
Cloruros (c/Cl <sup>-</sup> )	mg/L	0.4	0.3	0.3	0.3	1.4	1.4	0.6	1.3
Fluoruros (c/F <sup>-</sup> )	mg/L	*0.0035	*0.0005	*0.0005	*0.0005	*0.0005	*0.0005	*0.0005	*0.0005
Nitrato (c/NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	0.6	*0.0005	0.07	*0.0005	6.3	3.8	2.6	5.0
Sulfatos (c/SO <sub>4</sub> )	mg/L	6.4	6.5	13.8	17.4	54.3	73.3	54.1	67.3
<b>Constituyentes que no están en el RMCH</b>									
Potasio (c/K)	mg/L	0.4	0.3	0.4	0.5	3.3	0.7	0.7	2.7
Bicarbonatos (c/HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	9.9	9.9	11.1	12	9	18	33.9	21.9
<b>**Clasificación RMCH</b>		A	A	A	A	C	C	A	A

(\*) Las concentraciones de analitos por debajo del límite de detección (LD), son reportados como la mitad del valor LD [18].

(\*\*) Según la Ley N°1333, Clase A, apta para todo uso y consumo. Clase C, aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección

El diagrama de Piper de los puntos de muestreo del grupo A (Figura 6a)-muestran valores de cationes y aniones con concentraciones bajas. Estos puntos de muestreo se ubican en la parte media mostrando que no hay una predominancia importante de ninguno de los analitos. El punto RAK y RH-1 muestra una ligera tendencia asociada a sales de bicarbonato. Sin embargo, los puntos RHS-1 y RH-2 muestran un comportamiento de sales mixtas entre sulfatos y bicarbonatos [20]. El diagrama de Box y Whisker (Figura 6b), nos permite visualizar y comparar la distribución y la tendencia central de las concentraciones de cationes y aniones mayoritarios de las aguas superficiales del grupo A. Las figuras 6a y 6b presentan aguas con contenidos de 57% de aguas sulfato de calcio y magnesio (Mg-Ca-SO<sub>4</sub>), ligeramente bicarbonatadas y la figura 7 igual indica baja presencia de la concentración de cloruros. Con respecto a las bajas concentraciones de sales en las aguas superficiales de los puntos de muestreo del grupo A, la OMS las identifica o clasifica como aguas desmineralizadas o aguas desalinadas [21]. La ingesta de agua desmineralizada es responsable de una mayor eliminación de minerales del organismo [22].

Esto indica que las bajas concentraciones de iones presentes en el agua, pueden presentar un riesgo a la salud si es consumida directamente. El uso de agua desmineralizada y/o desalada debe abordarse con cautela, y preferiblemente solo después de que se haya realizado un estudio cuidadoso de la ingesta total de minerales de los habitantes locales [23].

El diagrama de Piper del grupo B (Figura 7a), muestra una ligera predominancia de Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup> sobre la presencia de Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>. El principal tipo de agua es 83% sulfato cálcicas (Ca-SO<sub>4</sub>), seguido de sulfato cálcicas – magnésicas (Ca-Mg-SO<sub>4</sub>), además de presentar bajas concentraciones de cloruros. Esto se puede corroborar con el diagrama de Box y Whisker (Figura 7b), donde existe una mayor concentración de sulfatos seguida de carbonatos,



mostrando una probable oxidación de sulfuros. Además, de acuerdo al leve incremento de pH en estos puntos de muestreo, se estima que se estaría produciendo DAM características.

Tabla 4. Correlación de Pearson para las especies presentes en los puntos de muestreo en la microcuenca Hampaturi

	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Fe	Mn	Zn
Ca	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	0.80*	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	0.73*	0.98**	1	-	-	-	-	-	-	-	-
K	0.16	0.51	0.51	1	-	-	-	-	-	-	-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.95**	0.80*	0.77*	0.03	1	-	-	-	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0.67	0.93**	0.87**	0.60	0.58	1	-	-	-	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.42	0.73*	0.68	0.89**	0.26	0.86**	1	-	-	-	-
Cl <sup>-</sup>	0.32	0.70	0.65	0.77*	0.18	0.89**	0.95**	1	-	-	-
Fe	-0.48	-0.55	-0.54	0.10	-0.60	-0.45	-0.04	-0.10	1	-	-
Mn	0.43	0.40	0.25	0.46	0.16	0.65	0.71	0.72*	0.04	1	-
Zn	0.30	0.27	0.14	0.63	0.01	0.51	0.72*	0.65	0.22	0.94**	1

\*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

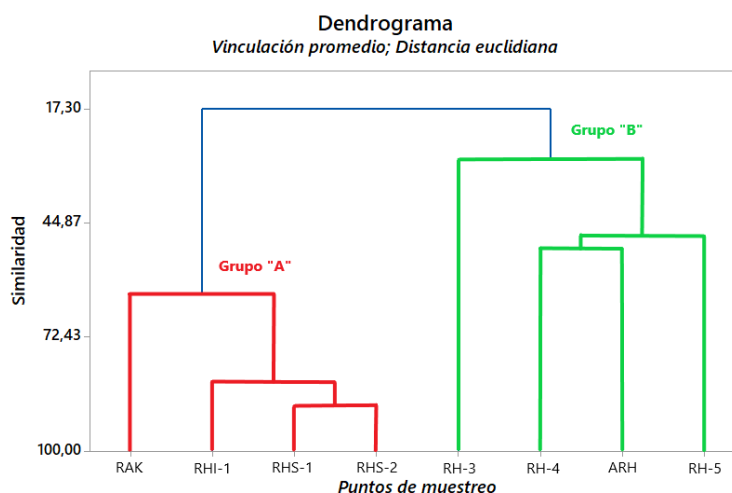


Figura 5. Dendrograma de correlación característica de los puntos de muestreos de la microcuenca Hampaturi, considerando la concentración de cationes Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>, y los aniones: Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Por otra parte, los puntos de muestreos RH-3 y RH-4 (Grupo B), ubicados en las cercanías en la desembocadura del DAM y DAR de las actividades mineras, contienen altos valores de CE. Estos cuerpos de agua, son clasificados como no aptos para consumo humano. Según la RMCH, estas aguas representan un riesgo a la salud si son consumidos de forma directa sin algún proceso de tratamiento. La calidad de agua en los puntos RH-5 y ARH, puede ser clasificada como apta para consumo humano (Tabla 3). Sin embargo, no es recomendable su consumo debido a que existe una intensa actividad de extractores de arena [5], actividad agrícola y actividad ganadera.

## CONCLUSIONES

La importancia del presente trabajo de investigación es que aporta a la deficiente información de la microcuenca Hampaturi. Este estudio también ofrece una evaluación preliminar de la hidroquímica de las aguas superficiales de la microcuenca Hampaturi, situada afuera de la Ciudad de La Paz, y clasifica las aguas en dos tipos de agua según su calidad. En la cabecera de la microcuenca, los cuatro puntos de muestreo correspondientes a RAK, RHI-1, RHS-1 y RH-2, tienen bajos contenidos de sales disueltas comparadas a los valores límites de la NB 512 y se identifican como cuerpos de agua desmineralizadas o desalinizadas.



Las aguas superficiales de la cabecera de la microcuenca y que pertenecen al sistema de represas que abastecen agua potable a la ciudad de La Paz, presentan bajos porcentajes de procesos geoquímicos (procesos de: oxidación-reducción, intercambio iónico, ácido-base, mineralización de silicatos, disolución de carbonatos) y una baja interacción agua y minerales (intercambio entre los cuerpos de agua con el entorno geológico). El RMCH de la Ley N° 1333, clasifica las aguas de estos puntos de muestreo como cuerpos de agua aptos para todo consumo (Clase A). Por otro lado, los puntos de muestreo RH-3, RH-4, RH-5 y ARH muestran indicios de estar impactados por los afluentes de DAM y DAR que son diluidos en el curso natural de la microcuenca con aportes de las aguas de escorrentía sub-superficial y agua subterránea. Comparando los resultados de los análisis con el RMCH, se puede concluir que los cuerpos de agua son de Clase C, y estas aguas requieren un tratamiento para un uso y consumo. No obstante, es necesario aclarar que estas aguas no forman parte de un sistema de agua de consumo. Por los resultados y el análisis de las concentraciones reportados en el presente estudio, se recomienda, mantener bajo nivel de actividades antropogénicas que contaminen la microcuenca Hampaturi, además de adoptar controles estrictos que aseguren una clasificación A de los cuerpos de agua. También, se sugiere un control y tratamiento de los afluentes de las actividades mineras para mitigar infiltraciones a las represas en la microcuenca Hampaturi.

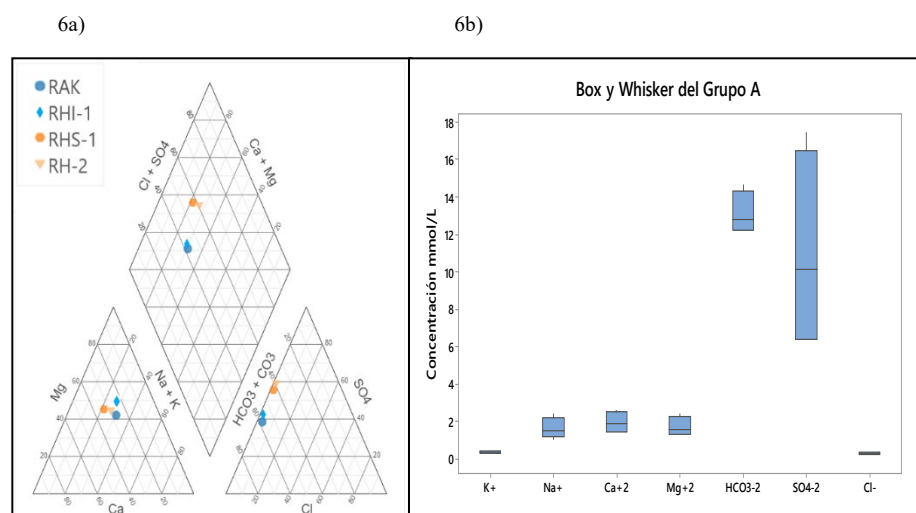


Figura 7. Diagrama de Piper (6a) y diagrama de Box y Whisker (6b) de los puntos RAK, RHI-1, RHS-1 y RHS-2

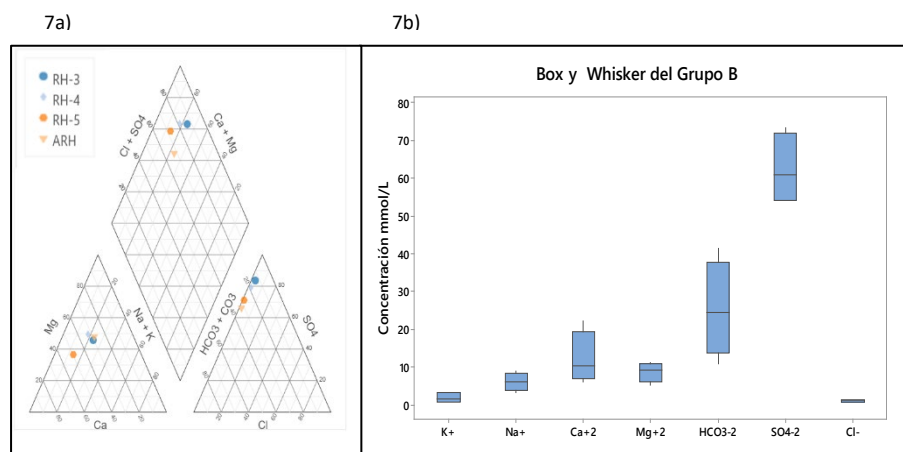


Figura 6. Diagrama de Piper (7a) y diagrama de Box Whisker (7b) de los puntos de muestreo de RH-3, RH-4, RH-5 y ARH.

## RECONOCIMIENTOS



Los autores expresan su agradecimiento a Rolando Chuquimia Ninahuanca, Rafael Juan Tornero Jiménez y Jorge Quintanilla, Carrera de Ciencias Químicas UMSA, por su involucro voluntario en el trabajo de investigación y consejería. Al programa ASDI- Suecia Proyecto Polución Acuática y Hidroquímica & Biogeoquímica Agua/Suelo, por el soporte financiero.

## REFERENCIAS

1. Del Granado, S., Andersen, L.E. **2015**, Flujos físicos y monetarios relacionados a los recursos hídricos en las ciudades de La Paz y El Alto (No. 04/2015). Development Research Working Paper Series.
2. Hardy, S. **2009**, Ruptura del abastecimiento de agua potable. Sistema Hampaturi-Pampahasi, La Paz, enero-febrero de 2008, *Bulletin de l'Institut français d'Études Andines*, 38(3), 545-560. DOI: <https://doi.org/10.4000/bifea.2339>
3. EPSAS. **2018**, Plan de Desarrollo Quinquenal EPSAS S.A.2018-2022, La Paz, Bolivia.
4. GAMLP. **2018**, Plan Territorial de Desarrollo Integral GAMLP 2016-2020, secretaria Municipal de Planificación para el Desarrollo, La Paz – Bolivia.
5. EPSAS. **2015**, Informe Geológico-geotécnico, Servicios de consultoría de supervisión para el proyecto: Construcción de la represa de La Paz (Hampaturi Alto). La Paz, Bolivia.
6. Plan integral de gestión para la conservación de la biodiversidad y los recursos hídricos macrodistrito de Hampaturi. mayo 2013; revisado diciembre 2022. <http://sitservicios.lapaz.bo/biodiversidad/pgi-hampaturi/>
7. Nordstrom, D.K., Alpers, C.N. *Geochemistry of acid mine waters*. In: *The environmental geochemistry of mineral deposits*, ed by G.S.Plumlee and M.J. Logsdon, **1999**, *Rev Econ. Geol.* V 6A, 133-160.
8. Blanco B., **2015**, Estrategias de desarrollo turístico en el distrito rural 22 Hampaturi – Jachapacheta sector Micaya del municipio de La Paz, (BSc Tesis), Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, recuperado de <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/13866>
9. Moya, M.I., Meneses, R.I., Sarmiento, J. Historia natural del valle de La Paz, Ediciones del Museo Nacional de Historia Natural, 3ª Edición. **2017**, La Paz, Bolivia.
10. Huallpara Lliully, L., Ormachea Muñoz, M., García Moreno, M.E. **2017**, Evaluación de la calidad de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de las aguas residuales de la ciudad de La Paz, Bolivia, *Revista Boliviana de Química*, 34(4), 104-111.
11. Quino Lima, I., Ormachea Muñoz, M., Ramos Ramos, O.E., Bhattacharya, P., Quispe Choque, R., Quintanilla Aguirre, J. y Sracek, O. **2019**, Hydrochemical assessment with respect to arsenic and other trace elements in the Lower Katari Basin, Bolivian Altiplano, *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 281-293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.11.013>
12. Alberro, N., Bedregal, P., Crubellati, R., Stegen, S., Manual de protocolos armonizados y evaluados para la toma de muestra y el análisis de agua y sedimentos para la región de América Latina y el Caribe., Proyecto ARCAL RLA/1/010, **20**, pp 26-29.
13. Cáceres Choque, L.F. **2005**, Análisis de aguas, una aproximación químico estadística en ensayos de intercomparación, *Revista Boliviana de Química*, 22(1), 55-63.
14. Langmuir, D. Aqueous environmental geochemistry (No. 551.48 L3.). Edition **1997**, New Jersey, U.S.A., pp 197-200 y 290-298.
15. Reglamento Nacional, Norma Boliviana 512, Reglamento Nacional para el Control de la Calidad del Agua para el Consumo Humano, **2005**.
16. Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, Ley de Medio Ambiente N° 1333, **1995**, Bolivia.
17. Radojevic, M., Bashkin, V. Practical Environmental Analysis, Royal Society of Chemistry, 2.ª ed., **2007**, London, U.K., pp. 365-366.
18. Farnham, I.M., Singh, A.K., Stetzenbach, K.J., Johannesson, K.H., 2002. Treatment of no detects in multivariate analysis of groundwater geochemistry data, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 60(1-2), 265-281. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(01\)00201-5](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00201-5)
19. Stumm, W., Morgan, J.J.. Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters. John Wiley & Sons, **2012**, Hoboken, New Jersey, U.S; pp 776.
20. Custodio, E., Llamas, M.R. Hidrología subterránea, Tomo I., Omega, 2da Edición, **1976**, Barcelona, pp. 1037-1062.
21. World Health Organization. **1979**, Health effects of the removal of substances occurring naturally in drinking-water, with special reference to demineralized and desalinated water, Report on a working group on Health significance of chemicals occurring naturally in drinking water, Brussels, pp 20-23.
22. Kozisek, F. *Health risks from drinking demineralized water*, In: *Nutrients in Drinking Water*, **2005**, World Health Organization, Geneva, C.H., pp. 148-163.
23. Robbins, D.J., Sly, M.R., du Bruyn, D.B. **1981**, Serum zinc and demineralized water, *The American journal of clinical nutrition*, 34(5), 962-963. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajcn/34.5.962>.