

CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA DE INFLUENCIA DE UNA CANTERA DE YESO EN EL PERÚ

Christ Jesus Barriga Paria^a, Elvis Felix Figueroa Condori^a, Braynner Jheyson Chavez Quispe^a, Jesenia Medalit Flores Arias^a, Gina Sarai Flores Bautista^a, Eladio Eugenio Mamani^a, Iván Anthony Cabana Bautista^a, Ruben Freddy Quispe Quispe^a

RESUMEN

El presente artículo muestra un estudio de los parámetros fisicoquímicos para determinar la calidad del agua subterránea y superficial en la zona de influencia de una cantera de yeso en el Perú. La evaluación se realizó en base a los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para agua aprobados mediante Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, específicamente para la Categoría 3 – D1 (riego de vegetales) y para la Categoría 3 – D2 (bebida de animales). Para el análisis de la calidad de agua subterránea se muestreó 1 punto correspondiente a un pozo artesanal ubicado en la zona de La Alameda. Para el análisis de agua superficial la red de muestreo se realizó en manantiales, flujo superficial y estancamiento de agua, que se encontraron en dos zonas, dentro de la concesión en estudio y alrededores. Para determinar la fiabilidad del análisis químico, se realizó un balance iónico de los principales cationes y aniones disueltos. Además, para caracterizar las aguas superficiales, se utilizaron el Diagrama de Piper y el Diagrama de Stiff, resultando la predominancia de aguas sulfatadas cálcicas. Las aguas subterráneas resultaron ser ligeramente ácidas y las aguas superficiales ligeramente alcalinas con valores significativos de concentración de sulfatos.

Palabras claves: Parámetros físico – químicos, Calidad de aguas, Aguas superficiales, Aguas subterráneas, Cantera de yeso, ECAs.

^a Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua, Prolongación Calle Áncash s/n, Moquegua, Perú.
cbarrigap@unam.edu.pe

QUALITY OF SURFACE AND UNDERGROUND WATER IN THE AREA OF INFLUENCE OF A GYPSUM QUARRY IN PERU

ABSTRACT

This paper shows a study of the physicochemical parameters to determine the quality of groundwater and surface water in the area of influence of a gypsum quarry in Peru. The evaluation was carried out based on the Environmental Quality Standards (ECAs) for water approved by Supreme Decree No. 004-2017-MINAM, specifically for Category 3 – D1 (vegetable irrigation) and for Category 3 – D2 (animal drink). For the analysis of groundwater quality, 1 point corresponding to an artisanal well located in the area of La Alameda was sampled. For the analysis of surface water, the sampling network was carried out in springs, surface flow and water stagnation, which were found in two areas, within the concession under study and surroundings. To determine the reliability of the chemical analysis, an ionic balance of the main cations and dissolved anions was performed. In addition, to characterize the surface waters, the Piper Diagram and the Stiff Diagram were used, resulting in the predominance of calcium sulfated waters. Groundwater turned out to be slightly acidic and surface water slightly alkaline with significant sulphate concentration values.

Keywords: Physical-chemical parameters, water quality, surface water, groundwater, gypsum quarry, ECAs.

INTRODUCCIÓN

En la normativa peruana se tienen dos parámetros importantes para establecer la calidad del agua, los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP). El DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM establece al ECA como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente¹. Se debe tener presente que para este estudio solo se han analizado los ECAs, en su condición de cuerpo receptor.

En el DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM, específicamente en la Categoría 3: Riego de vegetal y bebida de animales, están los parámetros que serán aplicados para determinar la calidad del agua en la zona de influencia de la cantera de yeso. La estratificación del yeso en la cantera está rodeada por depósitos morrénicos, depósitos aluviales, depósitos de coluvios y depósitos deyectivos, en donde no es evidente la presencia de materiales sulfurados. De cuerpos cuya mena o ganga contenga sulfuros de hierro (pirita en particular), las probabilidades de poner en contacto estos minerales con agua en condiciones aeróbicas, es muy alta y luego de un lapso de tiempo no muy prolongado se estará evacuando agua con valores de pH inferiores a 4².

La probabilidad de obtener presencia de metales pesados en el agua es muy baja, sin embargo, hay otros parámetros que deben considerarse que contempla la Categoría 3 para determinar

la calidad del agua en la zona de influencia de la cantera, como lo son los parámetros físico-químicos. Por ejemplo, estudios ambientales en las áreas mineras del departamento de Oruro han establecido la calidad de las aguas superficiales a partir de una caracterización físico-química de muestras de aguas superficiales³.

PARTE EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo el estudio se han analizado los Estándares de Calidad Ambiental. Junto con otros dispositivos legales forman parte obligada de la gestión ambiental en minería, y hacen posible el desarrollo de proyectos mineros sostenibles⁴. El análisis hidroquímico de aguas superficiales y subterráneas se desarrolló en base a la normativa peruana (DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM), teniendo en cuenta que no hay una normativa específica para la calidad de aguas subterráneas. Para el levantamiento de data de campo se han empleado instrumentos para realizar medidas in situ de pH (pHmetro), conductividad eléctrica (conductivímetro) y temperatura (termómetro), todos de la marca EXTECH. El total de sólidos disueltos, la salinidad y demás elementos químicos se enviaron a un laboratorio de calidad acreditado denominado ENVIROLAB – PERÚ S.A.C. Para el análisis de la calidad de agua subterránea se muestreó 1 punto correspondiente al pozo artesanal ubicado en la zona de La Alameda, entre el Río Chillón y el poblado (Ver Figura 1), teniendo en cuenta que solo sirve para caracterizar el agua en ese punto y no a todo el acuífero. Para el análisis de agua superficial la red de muestreo se realizó en manantiales, flujo superficial y estancamiento de agua, que se encontraron en dos zonas, dentro de la concesión en estudio y alrededores (Ver Figura 1). Estos puntos fueron seleccionados, buscando capturar la variación espacial de la calidad del agua dentro del área de estudio.

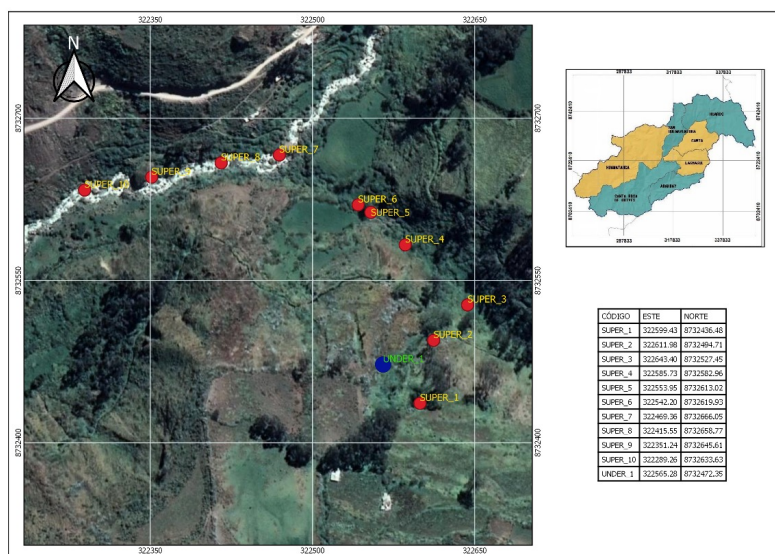


Figura 1. Estaciones de muestreo de agua subterránea (UNDER_1) y agua superficial (SUPER_1 a SUPER_10) en la provincia de Canta.

Los estudios de hidrogeoquímica sirven para determinar el origen de la composición química del agua y la relación entre el agua y la constitución química de las rocas, el método gráfico más utilizado es el diagrama triangular de Piper y Durov⁵. Para el estudio en mención, se representó los resultados del análisis de aguas mediante los diagramas de Piper y Stiff, haciendo uso del software RockWorks 2022. El diagrama Piper (1944), es una de las técnicas de visualización más utilizadas para la exploración gráfica de los datos químicos del agua subterránea. La combinación de un diagrama ternario de la composición catiónica principal (Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} y Mg^{2+}) y un diagrama ternario de la composición aniónica principal (Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} y NO_3^{-}) en un diamante central, lo convierten en una herramienta invaluable para identificar grupos o facies hidroquímicas e interpretar algunos procesos químicos que representa el conjunto de datos por analizar⁶. Por otro lado, en el diagrama de Stiff (1951) el contenido de iones es presentado por un polígono cuyo lado izquierdo describe el contenido de cationes mayores y en el lado derecho el contenido de aniones mayores. La distancia desde el eje central es proporcional a las concentraciones en (meq/L) de iones individuales. La ventaja de este patrón es que el agua de composición química similar tiene geometría y forma semejantes⁶.

2.1. Muestras en blanco (QA/QC)

Durante las campañas se han preparado dos muestras en blanco (B1 y B2) con agua destilada pura; se les ha agregado los mismos preservantes, se ha usado los mismos procedimientos de preparación y al final han sido analizadas en el laboratorio junto con las otras muestras. Esto provee un mecanismo de QA/QC que ayuda a evaluar lo siguiente: el error instrumental (ruido analítico y desplazamiento de fondo) y la presencia de contaminantes en los frascos, filtros y preservantes utilizados. La garantía de calidad y el control de calidad (QA/QC) son dos componentes principales de cualquier sistema de gestión de datos de calidad⁷.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En seguida, se realiza la comparación de los resultados de los parámetros físico-químicos de las distintas muestras extraídas de la zona de estudio con los Estándares de Calidad Ambiental para agua de la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, Subcategoría D1: Riego de vegetales y Subcategoría D2: Bebida de animales (del DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM), para evaluar la situación actual del recurso, enfatizado en la individualización de los principales factores que afectan en la calidad del agua.

3.1. Resultados y discusión de las aguas subterráneas

Los valores obtenidos en campo para cada uno de los parámetros se detallan en la Tabla 1. No se han considerado parámetros orgánicos, debido a que las aguas influenciadas por la minería presentan mayor preocupación por la presencia de metales pesados (inorgánicos), sin embargo, en un análisis completo se debería tener presente dichos parámetros.

3.1.1. Conductividad eléctrica (C. E.)

El valor obtenido en campo para este parámetro es de 903,00 $\mu\text{s}/\text{cm}$ correspondiente a la estación UNDER_01 tomada del pozo artesanal ubicado en la zona de La Alameda, cuyo valor es menor comparado al ECA de conductividad eléctrica para la Cat 3-D1 (2500 $\mu\text{s}/\text{cm}$) y para la Cat 3-D2 (5000 $\mu\text{s}/\text{cm}$). En base al valor del parámetro analizado se infiere que la composición química del agua está dominada por iones disueltos. Es decir, procesos geoquímicos que controlan la calidad y composición química del agua⁶.

3.1.2. pH

De la estación en campo para este parámetro, se ha obtenido un valor de 6,40 (ligeramente ácido), ubicada en el pozo artesanal correspondiente al código UNDER_01. El efecto del yeso para modificar es relativamente modesto en comparación con otros factores relacionados en la conformación de las propiedades fisicoquímicas del agua⁸. En base a los ECA de la Cat 3-D1 y de la Cat 3-D2, el valor está fuera del rango permisible para ambos casos.

3.1.3. Total de sólidos disueltos (TSD)

De la estación en campo para este parámetro, se ha obtenido un valor de 730,00 ppm ubicada en el pozo artesanal correspondiente al código UNDER_01. Para la zona de estudio se establece que el total de sólidos disueltos es la suma de todos los minerales, metales y sales disueltos en el agua. Las actividades de la cantera desarrollada en esta zona alteran la calidad del agua⁹.

3.1.4. Salinidad

El valor para este parámetro es de 523,00 ppm correspondiente a la estación UNDER_01 del pozo artesanal, ubicada entre el Río Chillón y el poblado, por lo tanto, las aguas son óptimas para cultivos tolerables. Se debe tener en cuenta que los cultivos tolerantes al sodio dependerán también de la planta, el clima, las condiciones del suelo y de las técnicas agronómicas utilizadas¹⁰.

3.1.5. Temperatura

El valor para este parámetro es de 12,50 °C correspondiente a la estación UNDER_01 del pozo artesanal. Dicho valor es aceptable para la sobrevivencia de las especies de la zona.

Tabla 1. Resumen de los parámetros de la estación subterránea.

Estación	Parámetros	Valor promedio*	Desviación estándar	% coeficiente de variación
UNDER_1	Conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	903,00	38,20	4,23 %
	pH	6,40	0,08	1,25 %
	TSD (ppm)	730,00	33,20	4,55 %
	Salinidad (ppm)	523,00	30,00	5,74 %
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	12,00	1,15	9,58 %

*: El valor promedio se determinó en base a 4 muestreos, las fechas de muestreo fueron: 9/10/2021, 16/10/2021, 23/10/2021 y 30/10/2021.

3.2. Resultados y Discusión de las aguas superficiales

No se han considerado parámetros orgánicos, debido a que las aguas influenciadas por la minería presentan mayor preocupación por la presencia de metales pesados (inorgánicos), sin embargo, en un análisis completo se debería tener presente dichos parámetros. Los valores promedios a mostrar fueron determinados en base a 4 muestreos, las fechas de muestreo fueron: 9/10/2021, 16/10/2021, 23/10/2021 y 30/10/2021.

3.2.1. Conductividad eléctrica (C. E.)

La conductividad del agua está relacionada con la concentración de las sales en disolución, cuya disociación genera iones capaces de transportar la corriente eléctrica. La solubilidad de las sales en el agua depende de la temperatura, por lo que la conductividad varía en conformidad con la temperatura del agua¹¹. Dicho esto, las mediciones in situ de la conductividad se tomaron bajo temperaturas inferiores a los $14,40^{\circ}\text{C}$ dentro de la concesión en estudio y en los alrededores; se obtuvo un valor mínimo de $163,10 \mu\text{s}/\text{cm}$ correspondiente a la estación SUPER_09 obtenida aguas arriba del río Chillón y un valor máximo de $2270,00 \mu\text{s}/\text{cm}$ en la estación SUPER_02, tomada de una filtración de las paredes del tajo de la cantera; ver Figura 2. Al realizarse la comparación con los ECA de la Cat 3-D1 y Cat 3-D2, ninguna estación sobrepasa el estándar.

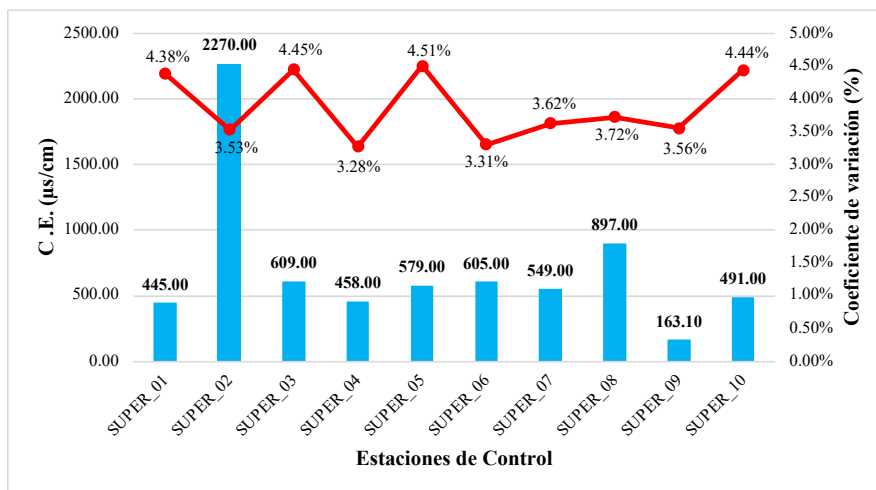


Figura 2. Valores promedio de conductividad eléctrica en las estaciones de control.

3.2.2. pH

De las estaciones analizadas en campo, los parámetros medidos mostraron valores de pH ligeramente alcalinos. Se obtuvo un valor mínimo de 8,35 correspondiente a la estación SUPER_05 y un valor máximo de 9,55 para la estación SUPER_07; ver Figura 3. Para cumplir con la normativa vigente, se compararon los resultados con los ECA de la Cat 3-D1 y Cat 3-D2. El rango establecido para la Cat 3-D1 es de 6,50 a 8,50; es por ello que todas las muestras están fuera del rango a excepción de la muestra SUPER_05 y la muestra SUPER_08. El rango establecido para la Cat 3-D2 es de 6,50 a 8,40; es por ello que todas las muestras están fuera del rango a excepción de la muestra SUPER_05.

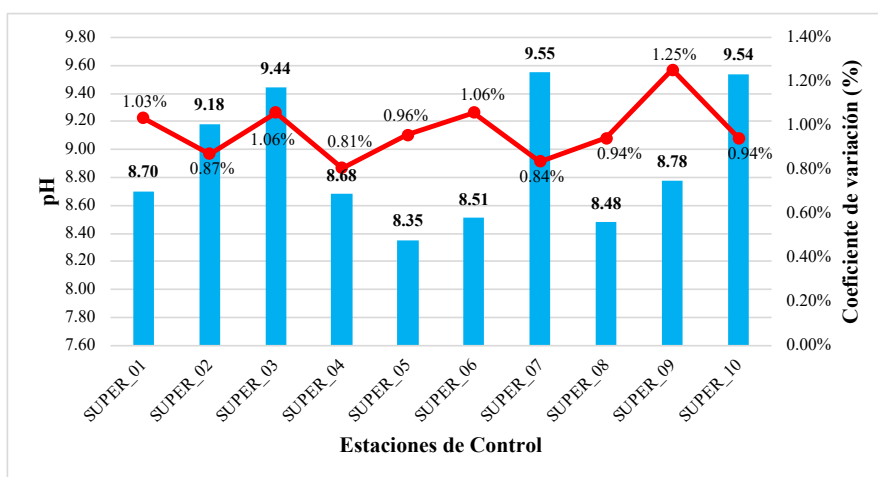


Figura 3. Valores promedio de pH en las estaciones de control.

3.2.3. Total de sólidos disueltos (TSD)

De los resultados de las estaciones analizadas, se obtuvo un valor mínimo de 114,30 ppm correspondiente a la estación SUPER_09 y un máximo de 1580,00 ppm obtenido en la estación SUPER_02; ver Figura 4. Se deben controlar los valores de sólidos disueltos, ya que pueden aportar contenidos de algunos elementos mayoritarios y metales¹².

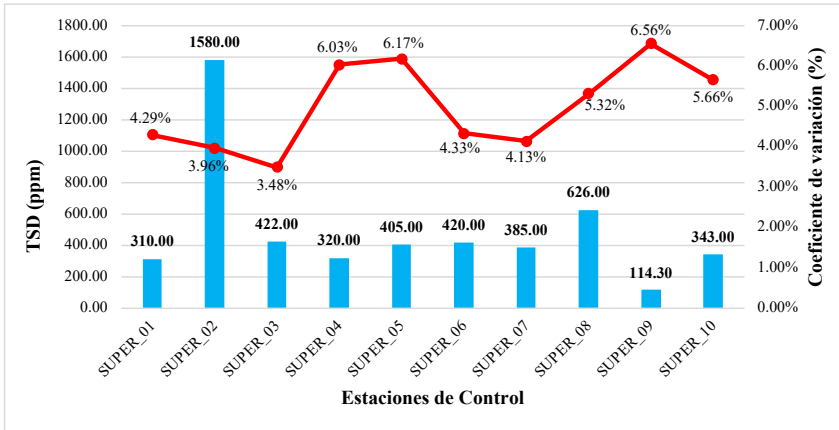


Figura 4. Valores promedio del total de sólidos disueltos en las estaciones de control.

3.2.4. Salinidad

Para el presente parámetro se obtuvo un valor mínimo de 81,20 ppm correspondiente a la estación SUPER_09, mientras que el máximo valor es de 1120,00 ppm obtenido de la estación SUPER_02; ver Figura 5. La salinidad se evalúa mediante los índices de conductividad eléctrica, y en algunas ocasiones se emplean índices de salinidad efectiva y salinidad potencia¹⁵.

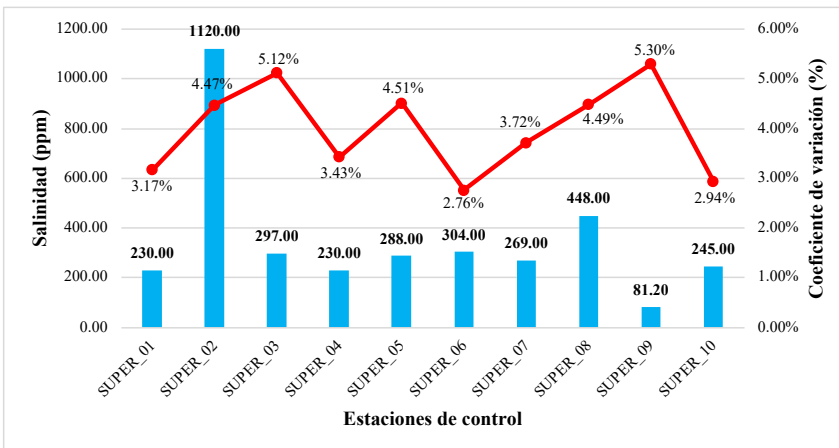


Figura 5. Valores promedio de salinidad en las estaciones de control.

3.2.5. Temperatura

Los resultados de la temperatura muestreada varían desde 2,60 °C tomada en la estación SUPER_02 a 14,40 °C correspondiente a la estación SUPER_10; ver Figura 6.

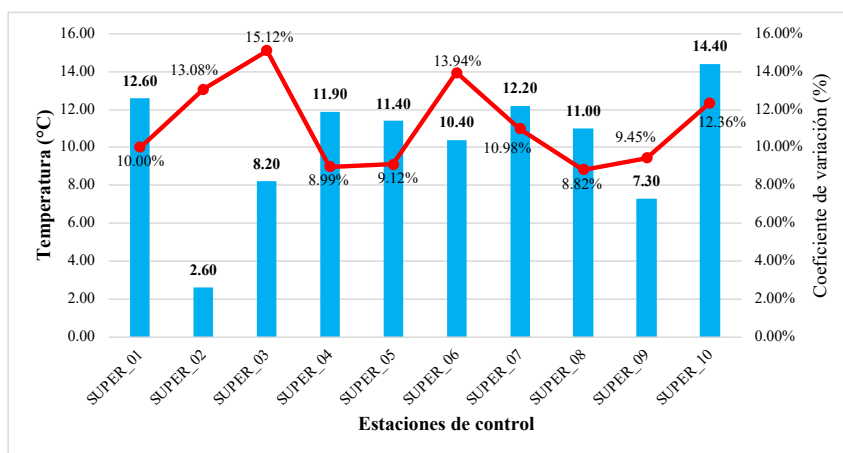


Figura 6. Valores promedio de temperatura en las estaciones de control.

3.3. Balance iónico

El balance iónico es el cálculo que permite definir la fiabilidad de un análisis químico (ver Tabla 2). En un análisis bien realizado la suma de equivalentes de los cationes ha de ser igual a la suma de los equivalentes de los aniones. Con dicha premisa puede establecerse el error de un análisis químico. Se establece la siguiente fórmula¹³:

$$\text{Error (\%)} = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} \times 100$$

Esto debido a que teóricamente el agua debe ser eléctricamente neutra. El porcentaje de error debe oscilar entre un $\pm 5\%$, llegando a aceptar como máximo un 10% ¹⁴. Un análisis con un error de 0% debe, en principio, considerarse como poco fiable; se establece que los errores superiores al 5% se deben a la presencia de iones minoritarios que no han sido evaluados en un análisis sistémico¹³.

Fritz (1994) como autor de un estudio que determinó un $3,99\%$ de error promedio en los análisis químicos a través del balance de cargas de iones, adiciona también que la mayoría de los errores de medición ocurren en los cationes debido a la alcalinidad (los iones precipitan en los envases donde se recolectan las muestras y no son recuperados totalmente en el laboratorio)¹⁵. Sin embargo, la variable de los componentes minoritarios introduce a la conductividad eléctrica como un factor capaz de variar el error¹⁶. Para la estación SUPER_02, el error no es aceptable, pero no se debe a un análisis químico deficiente, sino a la presencia de elementos minoritarios y a la falta de concentraciones de los bicarbonatos (HCO_3^-).

Tabla 2. Balance iónico.

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Peso Molecular	40,08	24,31	22,99	39,10	61,02	96,06	35,45
SUPER_01 (mg/L)	58,07	16,76	5,91	0,76	0,00	142,1	1,00
mmol/l	1,45	0,69	0,26	0,02	0,00	1,48	0,03
meq/l	2,90	1,38	0,26	0,02	0,00	2,96	0,03
Σ meq/l			4,55			2,99	
Error (%)				-20,77			
SUPER_02 (mg/L)	454,30	48,87	4,94	0,39	0,00	1537,00	2,00
mmol/l	11,33	2,01	0,21	0,01	0,00	16,00	0,06
meq/l	22,67	4,02	0,21	0,01	0,00	32,00	0,06
Σ meq/l			26,92			32,06	
Error (%)				-8,72			
SUPER_03 (mg/L)	78,71	13,79	5,11	0,79	0,00	242,4	1,00
mmol/l	1,96	0,57	0,22	0,02	0,00	2,52	0,03
meq/l	3,93	1,13	0,22	0,02	0,00	5,05	0,03
Σ meq/l			5,30			5,08	
Error (%)				2,21			

3.4. Diagrama de Piper

Para poder analizar los resultados de las tres estaciones de agua superficial, se ha empleado el diagrama de Piper, el cual está formado por dos triángulos equiláteros donde se representan la composición aniónica (HCO₃⁻+CO₃²⁻; SO₄²⁻; Cl+NO₃) y catiónica (Na⁺+K⁺; Ca²⁺; Mg²⁺) del agua y un campo central romboidal que muestra la composición del agua deducida a partir de los iones¹⁷.

Como se puede apreciar en la Figura 7 las estaciones caen en la parte superior del campo romboidal, por ende, son clasificadas como aguas sulfatadas cálcicas (ver Figura 8), lo cual concuerda con las concentraciones de la Tabla 4. La estación SUPER_02 presenta cantidades de sulfatos fuera del límite, es por ello que debería de tener un tratamiento antes de su uso para el riego de vegetales y bebida de animales. El método de humedal aeróbico es el método más eficaz a aplicar en las aguas sulfatadas de origen superficial para la remoción de sulfato¹⁸.

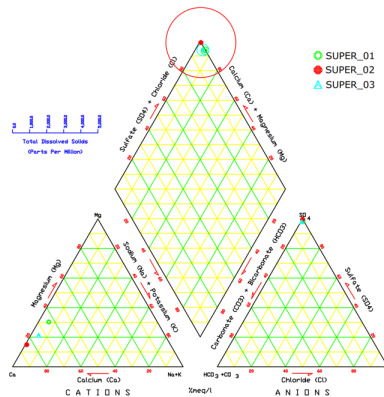


Figura 7. Ubicación de las aguas superficiales en el Diagrama de Piper.



Figura 8. Clasificación de las aguas superficiales con el Diagrama de Piper.

Fuente. Adaptado de Falcón¹⁹ et al.

Además, según un estudio de Schumann, las tres estaciones de agua superficial han sido influenciadas por yeso y/o anhidrita (ver Tabla 3), en donde el SO_4^{2-} es el anión dominante y Ca^{2+} el catión dominante, lo cual concuerda con los datos de la Tabla 4 y, en efecto, la cantera es de yeso, es así que se comprueba la calidad del análisis químico.

Tabla 3. Influencia litológica sobre la composición de aguas subterráneas.

Roca	Composición de las aguas subterráneas
Arenisca	Baja salinidad (300-500 mg/l); HCO_3^- anión dominante; Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} en concentraciones similares; buen sabor.
Caliza	Baja salinidad (500-800 mg/l); HCO_3^- anión dominante; Ca^{2+} catión dominante; buen sabor.
Dolomita	Baja salinidad (500-800 mg/l); HCO_3^- anión dominante; Mg^{2+} igual a Ca^{2+} ; buen sabor.
Granito	Muy baja salinidad (300 mg/l); HCO_3^- anión dominante; Ca^{2+} y Na^+ , cationes dominantes, muy buen sabor.
Basalto	Baja salinidad (400 mg/l); HCO_3^- anión dominante; Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} igualmente importante, buen sabor.
Esquisto	Baja salinidad (300 mg/l); HCO_3^- anión dominante; Ca^{2+} , Na^+ , cationes dominantes, buen sabor.
Marga	Media salinidad (1200 mg/l); HCO_3^- y Cl^- anión dominante; Na^+ , Ca^{2+} , pobre sabor, pero potable.
Arcilla y Cieno	Contiene frecuentemente sal y yeso de roca. Alta salinidad (900-2000 mg/l); Cl^- anión dominante, seguido por SO_4^{2-} ; Na^+ catión dominante; pobre sabor, a veces no potable.
Yeso / Anhidrita	Alta salinidad (2000-4000 mg/l); SO_4^{2-} anión dominante, Ca^{2+} catión dominante, seguido por Mg^{2+} o Na^+ ; no potable.

Fuente: Schumann²⁰.

3.5. Diagrama de Stiff

En los diagramas de Stiff o poligonales se representan la concentración de aniones y cationes en semirrectas paralelas, uniendo los extremos y formando un polígono. Dos características sobresalen en este tipo de diagrama: por un lado, permite visualizar claramente diferentes tipos de agua, cada una con diferentes concentraciones en sus iones, y en forma simultánea permite dar idea del grado de mineralización a través del ancho de la gráfica²¹. En la Figura 9, la estación SUPER_02 es la que presenta mayor cantidad de cationes y aniones, es por ello que sobrepasa el ECA de sulfatos que establece el DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM. La muestra SUPER_02 fue tomada de una filtración de las paredes del tajo de la cantera de yeso.

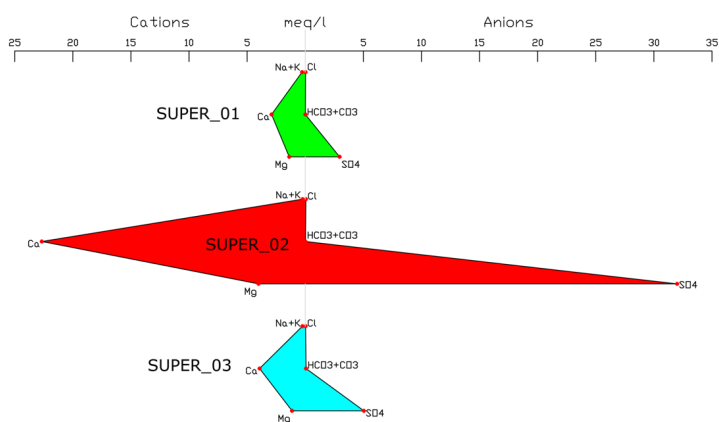


Figura 9. Diagrama de Stiff para las aguas superficiales.

3.6. Resumen del análisis químico

Dentro de los parámetros físicos-químicos, las tres estaciones de agua superficial superan los ECA de pH de la Cat 3-D1 y Cat 3-D2 (ver Tabla 4).

Dentro de los parámetros físicos-químicos, la estación SUPER_02 supera el ECA de sulfatos tanto para la Cat 3-D1 (1000 mg/L) como para la Cat 3-D2 (1000 mg/L) con un valor de 1537,00 mg/L (ver Tabla 4).

Como se ha mencionado anteriormente, no se han considerado parámetros orgánicos, debido a que las aguas influenciadas por la minería presentan mayor preocupación por la presencia de metales pesados (inorgánicos), sin embargo, en un análisis completo se debería tener presente dichos parámetros.

Tabla 4. Cuadro resumen del análisis químico.

Parámetros	Unidad de Medida	D1: Riego de vegetales		D2:	Muestras de Agua Superficial		
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales	SUPER_01	SUPER_02	SUPER_03
FÍSICOS - QUÍMICOS							
Cloruros	mg/L	500,00		**	1,00	2,00	1,00
Color (b)	Pt/ Co	100,00 (a)		100,00 (a)	-	-	-
Conductividad	(µS/cm)	2500,00		5000,00	445,00	2270,00	609,00
Nitratos (NO ₃ - N)							
+	mg/L	100,00		100,00	0,44	0,47	0,36
Nitritos (NO ₂ - N)							
Potencial de Hidrógeno (pH)	unidad de pH	6,50 - 8,50		6,50 - 8,40	8,70	9,18	9,44
Sulfatos	mg/L	1000,00		1000,00	142,10	1537,00	242,40
Temperatura	°C	Δ 3,00		Δ 3,00	12,60	2,60	8,20
INORGÁNICOS							
Bario	mg/L	0,70		**	0,024	0,009	0,038
Berilio	mg/L	0,10		0,10	-	-	-
Boro	mg/L	1,00		5,00	0,05	0,09	0,10
Hierro	mg/L	5,00		-	-	0,013	0,054
Litio	mg/L	2,50		2,50	-	-	-
Magnesio	mg/L	**		250,00	16,76	48,87	13,79
Manganeso	mg/L	0,20		0,20	-	0,006	0,007
Zinc	mg/L	2,00		24,00	0,009	0,012	0,018
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO							
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1000,00	2000,00	1000,00	<1,80	<1,80	<1,80
Escherichia coli	NMP/100ml	1000,00	**	**	-	-	-
Huevos de Helminfos	Huevo/L	1,00	1,00	**	-	-	-

(a): Para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural). (b): Después de filtración simple. (c): Para el riego de parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales, sólo aplican los parámetros microbiológicos y parasitológicos del tipo de riego no restringido. Δ 3,00: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada. El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría. Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Fuente: Adaptado de MINAM¹.

CONCLUSIONES

La estación UNDER_01 está fuera del ECA que establece el pH tanto para la Cat 3-D1 (6,50 – 8,50) como para la Cat 3-D2 (6,50 – 8,40) con un valor de 6,40. Dicha estación corresponde al pozo artesanal (agua subterránea) ubicado en la zona de La Alameda, entre el Río Chillón y el poblado. Las aguas subterráneas de esa zona según el DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM deberían ser tratadas antes de su uso para el riego de vegetales y/o bebida de animales. Se podría aplicar una neutralización con Cal viva (CaO) y/o Cal apagada (CaOH₂). Por otro lado, la conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos, salinidad y temperatura de estas aguas están acorde a la legislación vigente, sin embargo, para asegurar la calidad total y su uso posterior efectivo se debe hacer un análisis de todos los parámetros contemplados en la norma.

Las aguas superficiales en la zona de influencia de la cantera de yeso son ligeramente alcalinas. El rango de pH establecido para la Cat 3-D1 es de 6,50 a 8,50; es por ello que todas las estaciones están fuera del rango a excepción de la estación SUPER_05 y la estación SUPER_08. Asimismo, el rango establecido para la Cat 3-D2 es de 6,50 a 8,40; es por ello que todas las estaciones están fuera del rango a excepción de la estación SUPER_05. A diferencias de las aguas subterráneas, estas deben tener un tratamiento ácido para poder neutralizar el pH y así ser utilizada para el riego de vegetales y/o bebida de animales. La conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos, salinidad y temperatura de estas aguas están acorde a la legislación vigente, sin embargo, para asegurar la calidad total y su uso posterior efectivo se debe hacer un análisis de todos los parámetros contemplados en la norma.

El balance iónico realizado para poder determinar la fiabilidad de los análisis químicos son los siguientes: para la estación SUPER_01 el error es de -20,77 %, para la estación SUPER_02 el error es de -8,72 % y para la estación SUPER_03 el error es de 2,21 %. Las dos últimas estaciones están dentro del rango de ± 10 % establecido por Zekâi, la estación SUPER_01 está fuera del rango, pero no indica un análisis químico inadecuado, sino la presencia de iones minoritarios.

De acuerdo con el diagrama de Piper, las aguas superficiales las podemos clasificar como aguas sulfatadas cálcicas. Específicamente la estación SUPER_02 presenta una concentración de sulfatos que supera el ECA tanto para la Cat 3-D1 (riego de vegetales) como para la Cat 3-D2 (bebida de animales). La estación SUPER_02 ha sido tomada de una filtración de las paredes del tajo de la cantera de yeso. Es así que antes de su uso para el riego de vegetales y/o bebida de animales debería aplicarse un tratamiento, Campos y Ulloa proponen el método de humedal aeróbico para tratar aguas sulfatadas.

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento al titular de la concesión minera por permitir realizar un nuevo análisis de las aguas superficiales y subterráneas en la zona de influencia de su cantera y a la Universidad Nacional de Moquegua por permitir mejorar las bases teóricas para conseguir fundamentar los resultados de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. El Peruano. 2017 Junio 7: 10-19.
2. Sanchez JE, Ferreira JP. Drenajes ácidos de Mina Alternativas de tratamiento. Rev Mamym. 2016;(1): 20-33.
3. Zamora G, Bosia C, Casiot C, Gardon J, Vallejos P. Calidad de las aguas subterráneas en las áreas mineras del departamento de Oruro -Bolivia. Rev Mamym. 2017;(2): 25-35.
4. Aduvire O. Dimensionado de sistemas de tratamiento de aguas ácidas de mina. Rev Mamym. 2018;(5): 1-11.
5. Mancilla OR, Anzaldo BN, Guevara RD, Hernández O, Palomera C, Figueroa Y, et al. Calidad del agua subterránea para uso agrícola en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, México. Terra Latinoam. 2021; 39: 1-12.
6. Malagón JP, Piña A, Argüello S, David DL. Análisis hidrogeoquímico-multivariado del agua subterránea del sistema acuífero del Valle Medio del Magdalena, Colombia: Estudio a escala regional. Bol Soc Geol Mex. 2021; 73(3): 1-26.
7. Gan S, Birrell L, Robbertze D, Zhao B, van Niekerk E, Ncubi L. Quality control in tailings resource exploration at Havelock Mine, Eswatini. J S Afr Inst Min Metall. 2022; 122(7): 347-362.
8. Burgos H, Gárfias J, Martel R, Salas J. Caracterización espacio-temporal de la distribución del arsénico en un acuífero kárstico en el sur del Estado de México. Bol Soc Geol Mex. 2021; 73(1): p. 1-31.
9. Zamora G, Tórrez JA. Economía circular en el procesamiento mineral: uso de aguas residuales urbanas tratadas en procesos de flotación de minerales sulfurados. Rev Mamym. 2021; 6(2): p. 54-66.
10. Rodríguez S, Jaramillo SA, Zurita LD, Valdiviezo AG, Choloquina CA. Evaluación de la Calidad del Agua de Riego Proveniente de la Acequia Tilipulo Enríquez-Cotopaxi Mediante la Relación de Absorción de Sodio (RAS). Rev Politéc. 2022; 49(2): p. 55-64.
11. Solís Y, Zuñiga LA, Mora D. La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. Tecnología en Marcha. 2018; 31(1): p. 35-46.
12. Fernández M, Nfundiko B, Guardado R, Almaguer Y. Evaluación hidroquímica de las aguas del río Cayo Guam, Moa, Cuba. Min Geol. 2018; 34(3): p. 268-288.
13. Martínez PE, Martínez P, Castaño S. Fundamentos de Hidrogeología. Primera ed. Madrid, España: Mundi-Prensa; 2006.
14. Zekâi Ş. Practical and Applied Hydrogeology. Primera ed. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier; 2015.

15. Fetter CW. Applied Hydrogeology. Cuarta ed. New Jersey, United States: Prentice Hall; 2001.
16. Custodia E, Ramón M. Hidrología Subterránea. Segunda ed. Barcelona, España: Omega; 1983.
17. García Y, Balmaseda C, Vargas , Heriberto. Caracterización hidroquímica de las aguas de riego de la cuenca del río Naranjo, municipio Majibacoa, provincia Las Tunas. Rev Cie Téc Agr. 2012; 21(3): 29-34.
18. Campos A, Ulloa M. Tratamiento de aguas sulfatadas de origen superficial producidas por una mina de carbón a cielo abierto. Minería y Geología. 2016; 32(4): p. 160-171.
19. Falcón CM, Moreno GG, Combina AM. Evaluación de la Aguas Termales en el área de Santa Teresita, Provincia de La Rioja, Argentina. Ser Correl Geol. 2015; 31(1): 21-40.
20. Schumann W. Guía de Rocas y Minerales. Primera ed. Barcelona, España: OMEGA; 2004.
21. Aldana G, Chourio A, Zambrano O. Validación estadística de datos hidrogeoquímicos provenientes del agua de producción de pozos petroleros. Rev Téc Ing Univ Zulia. 2015; 38(3): p. 257-265.