

Mapeo hidrogeoquímico regional usando muestras de aguas superficiales en la cuenca Chancay-Lambayeque, Norte del Perú: procesamiento estadístico e interpretación de anomalías

Regional hydrogeochemical mapping using surface water sampling from the Chancay-Lambayeque basin, Northern Peru: statistic processing and interpretation of anomalies

John Cerron¹, Jorge Chira², Yerac Rodríguez³

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, E. P. Ingeniería Geológica. Lima - Perú. E-mail: jcs12160005@gmail.com.

² Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, E. P. Ingeniería Geológica. Lima - Perú. E-mail: jchiraf@unmsm.edu.pe.

³ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, E. P. Ingeniería Geológica. Lima - Perú. E-mail: yerac.rodriguez@unmsm.edu.pe.

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 22-12-2022

Fecha de aceptación: 10-12-2023

Resumen

La hidrogeoquímica como herramienta de exploración minera es usada en diversos distritos mineros en Chile o Canadá para obtener respuestas geoquímicas del agua por su interacción con el ambiente geológico superficial y subterráneo. Este estudio de mapeo hidrogeoquímico regional utilizó una base de datos de muestreo de aguas superficiales de la cuenca Chancay-Lambayeque en el Norte del Perú proporcionada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) con el objetivo de definir nuevas zonas para exploración minera usando métodos estadísticos univariable, bivariable, multivariable (PCA), diagramas hidrogeoquímicos e interpolación geoestadística mediante kriging ordinario (OK).

El análisis estadístico univariable determinó los parámetros estadísticos como medidas de tendencia central, medidas de forma, y rangos de background, threshold y anomalías geoquímicas (eje. Cu con anomalías fuertes entre 0.89 a 2.54 mg/L), mientras que la correlación bivariable definió asociaciones geoquímicas (eje. Ba con Mo, etc.), y el procesamiento multivariable mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA) generó 4 PCA's representando asociaciones multivariables de interés como el PCA1

relacionado a mineralización tipo Epitermal o el PCA3 a mineralización tipo Pórfido Cu-Mo distal. Además, el uso de diagramas hidrogeoquímicos reflejó características hidrogeoquímicas como tipos de "facie" o mecanismo que controlan la composición química del agua, permitiendo interpretar dos grupos de aguas superficiales. El análisis geoestadístico de las principales variables y PCA's facilitó la interpolación por método kriging ordinario (OK) con el objetivo de conocer espacialmente las anomalías, permitiendo su interpretación geológica mediante el uso de secciones geológica-geoquímicas. Por último, toda la interpretación de los resultados generó 17 zonas anómalas, resaltando 11 nuevas zonas de interés para exploración minera.

Palabras clave: cuenca Chancay-Lambayeque, Deposito Mineral, Estadística, Exploración Minera, Hidrogeoquímica.

Abstract

Hydrogeochemistry as a mineral exploration tool is used in several mining districts from Chile or Canada to generate geochemical signatures of water by interaction with the surface and underground geological environment. This regional

hydrogeochemical mapping investigation used a surface water sampling database from the Chancay-Lambayeque basin in Northern Peru provided by the Geological Survey of Peru (INGEMMET) with the objective of generate new zones for mineral exploration using univariate, bivariate, multivariate (PCA) statistical methods, hydrogeochemical diagrams and geostatistical interpolation by ordinary kriging (OK). Univariate statistical analysis determined statistical parameters such as measures of central tendency, measures of shape, and ranges of background, threshold and geochemical anomalies (for example: Cu with strong anomalies between 0.89 to 2.54 mg/L), while bivariate correlation defined geochemical associations (for example: Ba - Mo, etc.) and multivariate analysis by Principal Component Analysis (PCA) generated 4 PCA's representing multivariate associations such as PCA1 related to Epithermal mineralization or PCA3 related to distal mineralization of Porphyry Cu-Mo. In addition, the use of hydrogeochemical diagrams resulted hydrogeochemical characteristics such as types of waters or mechanisms that control the chemical composition of the water, allowing the interpretation of two groups of surface waters. The geostatistical analysis of the main variables and PCA's facilitated the interpolation by ordinary kriging (OK) method with the objective to identify the location of the anomalies, as well as allowing their interpretation using geological-geochemical sections. Finally, the interpretation of the results generated 17 anomalous zones, highlighting 11 new zones for mineral exploration.

Keywords: Chancay-Lambayeque basin, Ore Deposit, Statistics, Mineral Exploration, Hydrogeochemistry.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, la exploración minera ha entrado en crisis por la disminución de la tasa de descubrimientos [30] respecto a la creciente demanda de metales [18], pese al aumento de inversión realizada en la creación de nuevas técnicas de exploración minera cada vez más sofisticadas y costosas [30]. Esto conlleva al uso de las técnicas convencionales de exploración minera, como los primeros pasos para el éxito del descubrimiento de un depósito mineral [25], como la geoquímica, que aumentó significativamente la tasa de descubrimientos en la década de los 60's [13].

La hidrogeoquímica, rama de la hidrogeología, es una técnica con resultados reflejados en Canadá [4], Chile [14] y otros países [23], pues muchos terrenos no presentan las condiciones idóneas para obtener información geoquímica tradicional [15], siendo una alternativa para exploración minera de depósitos minerales dada su capacidad de interactuar con las rocas en superficie y subterráneo [23].

Esta investigación propone mediante la hidrogeoquímica, usando la base de datos de aguas superficiales en la cuenca Chancay-Lambayeque [6] [24], por medio de procesamiento estadístico, geoestadístico e interpretación de resultados [25], generar nuevas zonas para exploración minera en el Norte del Perú.

1.1 Ubicación, fisiografía y clima

La cuenca Chancay-Lambayeque está ubicada al norte del Perú, entre las coordenadas 6° 20' a 6° 55' de latitud sur y 78° 38' a 80° 00' de longitud oeste, comprendida entre los departamentos de Cajamarca y Lambayeque (Figura 1). Esta consta de un área aproximada de 5 482 km². Se divide en seis (6) unidades fisiográficas principales: valle encañonado, llanura aluvial, abanico aluvial local, médanos, formaciones eólicas y terrenos litorales.

El clima está dividido según la parte de la cuenca: en la cuenca baja (0 a 200 msnm) es mayormente árido, temperaturas entre 18°C y 31°C, y con precipitación anual de 33.05 mm; la cuenca media (200 a 2 000 msnm) tiene una temperatura entre 16°C y 20°C, con precipitaciones anuales entre 5.9 mm y 187.4 mm; y la cuenca alta (2 000 msnm a más) tiene una temperatura media anual mínima de 11°C y una máxima de 19°C, con precipitaciones anuales entre 1251 mm y 1997 mm [6] [24].

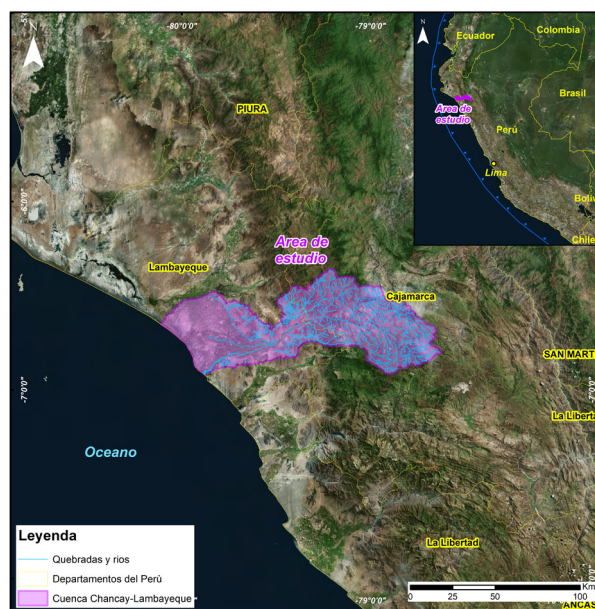


Figura 1. Ubicación de la cuenca Chancay-Lambayeque.

1.1 Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica es una rama de la hidrogeología que estudia las propiedades químicas del agua

superficial y subterránea relacionada a la geología, considerando los parámetros fisicoquímicos, iones disueltos, y la interacción agua-roca (Figura 2) [23]. El estudio del agua se debe a su condición de disolvente universal sujeto a alterar su composición física, química y biológica por interacción con múltiples factores (geológicos, hidrogeológicos, climáticos, ambientales, etc.) variando cuantitativamente por el régimen de precipitación sin variar su composición relativa caracterizada por presentar mayormente una sola facie hidrogeoquímica [3]. Entre los diversos parámetros físicos del agua se tiene a la temperatura (°C), conductividad eléctrica (μS), sólidos totales disueltos (T.D.S.), turbidez, etc. La temperatura es uno de los principales parámetros influyendo en la solubilidad y disociación de las sales (Na, Ca, Mg, etc.), influyendo directamente en los sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica y el pH del agua. Por otro lado, los parámetros químicos del agua son el pH, alcalinidad, potencial redox, etc [3]. El uso de la hidrogeoquímica como herramienta de exploración se ha dado en diversos distritos mineros de Chile, Canadá, India, Rusia y Australia [4] [14] [17] [23], pues muchos

terrenos no presentan las condiciones para recolectar información geoquímica tradicional [15], siendo terrenos pantanosos, con cobertura vegetal o retransportados, áreas donde no es posible adquirir muestras invasivas u otros, donde la hidrogeoquímica es una alternativa de exploración minera [25] de posibles depósitos minerales superficiales u ocultos.

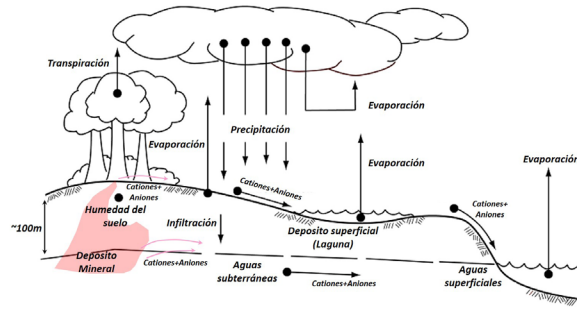


Figura 2. Gráfico del ciclo del agua, considerando la presencia de un depósito mineral que aporta determinados cationes y aniones [36].

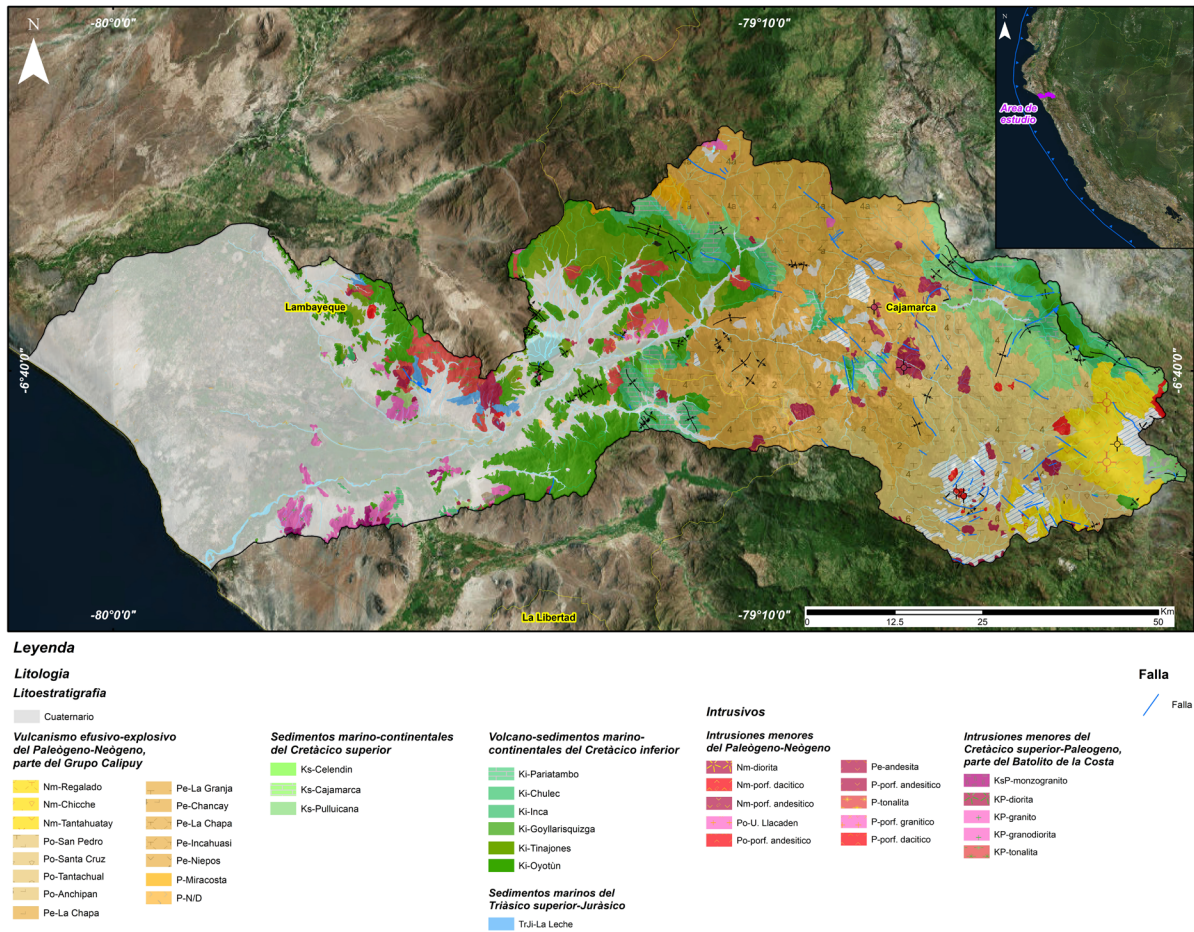


Figura 3. Geología (Escala 1:50000) de la cuenca Chancay-Lambayeque (Datos: INGEMMET).

Durante el Cretácico Inferior, cuando la dirección de convergencia fue oblicua N-NE con un ángulo de subducción abrupto [33] y de tipo Mariana [7], inició un periodo de vulcanismo de arco continental (Fm. Oyotún) [12], posterior suprayacen rocas clásticas de un ambiente continental deltaico a fluvial (Fm. Tinajones a gradualmente Gpo. Goyllarisquizga) [6]. Es seguida la secuencia de rocas clásticas a carbonatadas con abundante material fosilífero [6] de un ambiente marino-continental (Fm. Inca gradando concordantemente a Fm. Chúlec) que pasará a un aumento del nivel del mar [1] generando rocas carbonatadas anóxicas (Fm. Pariatambo).

En el Cretácico Superior, la tectónica se mantuvo con dirección de convergencia [7] junto a un periodo de débil deformación coincidiendo con el decrecimiento de la tasa de convergencia [11] y disminución del ángulo de subducción [33], evidenciando rocas carbonatadas (Gpo. Pulluicana) infrayaciendo a rocas de material mixto terrígeno fino a medio de finales del Albiano Superior (Gpo. Quillquiñán) [29], y posteriormente suprayacen rocas carbonatadas de un ambiente marino profundo (Fm. Cajamarca y Fm. Celendín). Durante dicho periodo hasta el Paleoceno, se inició la intrusión de cuerpos ígneos de composición tonalítica, granodiorítica a diorítica irregulares alineados con rumbo andino parte del Batolito de la Costa [35], entre otros relacionados a mineralización tipo Pórfido, depósitos de Hierro-Cobre-Oro (IOCG, por sus siglas en inglés) y vetas relacionadas a Intrusivos (IR, por sus siglas en inglés).

Por otro lado, desde el Paleógeno (del Eoceno temprano) al Neógeno (al Mioceno superior) se dio diversos periodos de aumento y disminución de la velocidad de convergencia [26], rotación de la dirección de convergencia y disminución del ángulo de subducción [33], reflejado por intrusiones aisladas y episodios de vulcanismo efusivo a explosivo representado en rocas volcánicas a volcanoclásticas (Gpo. Calipuy con las Fms. Llama, Porculla y Huambos) [22]. Cabe resaltar, que en el Mioceno se da la ruptura de la Placa de Farallón en Nazca y Cocos [10] concordando con periodos de vulcanismo piroclásticos a lávico, y el emplazamiento de stocks intrusivos y centros porfíricos mineralizados [7] relacionados a depósitos tipo Pórfido, Epitermales y Polimetálicos [28] [31] [34]. Mientras que, para finales del Mioceno tardío al Cuaternario, se evidencia el

cambio del ángulo de subducción [7] alcanzando una posible pseudo-horizontalidad, dominando los depósitos cuaternarios.

El contexto estructural se basa generalmente en sistemas de fallas de bajo ángulo y plegamientos E-W en rocas sedimentarias Cretácicas siendo cortadas por fallas del terciario NE-SW posiblemente asociados a la deflexión de Huancabamba (más antiguas) rotando a NW-SE (más jóvenes) de tendencia andina [7] [34].

1.1.1 Depósitos minerales y metalogenia regional

La metalogenia en la cuenca Chancay-Lambayeque se describe, en parte, por la propuesta de franjas metalogenéticas [5] basado en dominios geológicos y geotectónicos (Figura 4), así como también, en las provincias metalogenéticas [6].

En el sector oeste, se menciona la presencia de la provincia metalogenética de Cobre y Polimetálicos en la planicie costanera [6]. Pese a no ser registrado en las franjas metalogenéticas [5], se infiere en este sector la presencia de la Franja de depósitos tipo IOCG del Cretácico en la zona costanera con algunas evidencias cercanas como Sicán, Río Loco, Culpón, Leque-Leque, etc. [35]. En las partes subandinas del departamento de Lambayeque, se registra una evidencia de Pórfido Cu-Mo El Rosal que pertenece a la Franja de Pórfidos Cu-Mo del Cretácico Superior, concordando también con algunas evidencias de posibles depósitos de vetas relacionadas a intrusivos como La Pampa de tipo subeconómico [34] (Figura 4).

Por otro lado, en el sector este se menciona la presencia de la provincia metalogenética de Plata, Oro y Polimetálica de la Franja Volcánica Cenozoica de la Cordillera Occidental [6]. Esta congrega en las partes de la cuenca intermedia algunos depósitos de la Franja de Epitermales de Au-Ag hospedados en rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno siendo los depósitos Epitermales de Baja Sulfuración como Los Pircos, Lucero, El Tigre y Totorá; y Epitermales de Alta Sulfuración como Sipán, Tantauatay y La Zanja [28] [34]. Mientras que, en las partes altas de la cuenca, se observa la Franja de Pórfidos de Cu-Mo (\pm Au), Skarn de Pb-Zn-Cu (\pm Ag) y Depósitos Polimetálicos relacionados con intrusiones del Mioceno como Cerro Corona, La Granja, Sinchao, Colorada, Hualgayoc, entre otros [28] [31] (Figura 4).

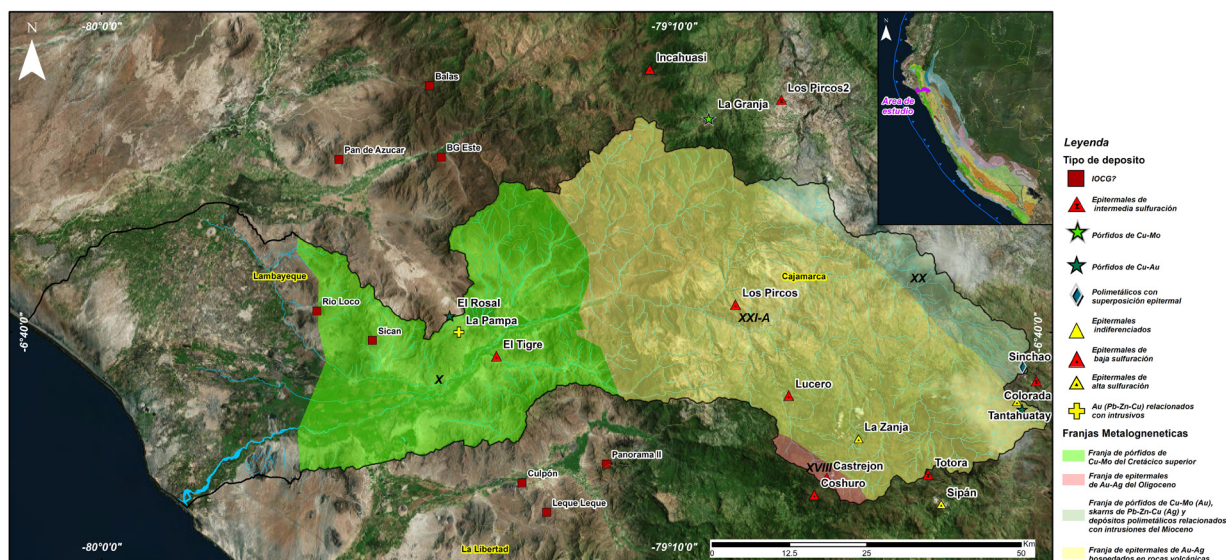


Figura 4. Distribución metalogenética (Escala 1:1000000) de la cuenca Chancay-Lambayeque, con los principales depósitos minerales (Datos: INGEMMET)

2. METODOLOGÍA

El proceso de investigación inició con la recopilación de la base de datos con información de aguas superficiales del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) obtenidos en el proyecto “GE-2: Prospección geoquímica y muestreo de aguas en la cuenca Chancay-Lambayeque” por INGEMMET [6] como parte del programa de Geología Económica. Estos se analizaron desde un enfoque geoquímico ambiental siguiendo los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) del Perú [24] dictado en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM [20].

La base de datos validada constó de 156 muestras de aguas (Figura 5) con información de ubicación espacial, datos de campo, resultados geoquímicos multielementales (ICP-Total 28 elementos+AAS para Hg), resultados de aniones (4 tipos), pH, T.D.S., T (°C) y conductividad eléctrica (µS), siguiendo un protocolo de aseguramiento y control de calidad [6].

El análisis usando métodos estadísticos univariados, bivariados, multivariado por PCA, y diagramas hidrogeoquímicos se desarrolló con los programas Minitab y ioGAS. El uso de estadística univariada permitió definir los parámetros estadísticos como las medidas de tendencia central, background, threshold y anomalías, mientras que la estadística bivariada por correlación de Spearman (1904) definió las correlaciones entre variables. Los diagramas

hidrogeoquímicos permitieron identificar la composición y las características químicas de las aguas superficiales de manera simple y concisa. Para el caso de la estadística multivariada por Análisis Componentes Principales o PCA (por sus siglas en inglés), un método no supervisado con el objetivo de reducir la dimensionalidad de datos, evidenció las múltiples correlaciones entre variables.

Por otro lado, el análisis geoestadístico con el programa Golden Surfer® usando semivariogramas experimentales de determinadas variables transformadas a logaritmo neperiano, permitió generar los parámetros geoestadísticos como pepita, meseta, alcance y anisotropía, a partir del modelado de semivariogramas teóricos esféricos. Estos parámetros sirvieron para interpolar por método kriging ordinario (OK) culminando en mapas de interpolación tipo grid de cada variable escalada según sus rangos de background, threshold y anomalías.

Además, el uso de secciones geológica-geoquímicas generadas con el programa Target for ArcGIS permitieron explicar la presencia de anomalías de las principales variables y PCAs, relacionadas a la geología y metalogenia.

Todos estos análisis fueron interpretados en conjunto con el objetivo de definir zonas anómalas para exploración minera.

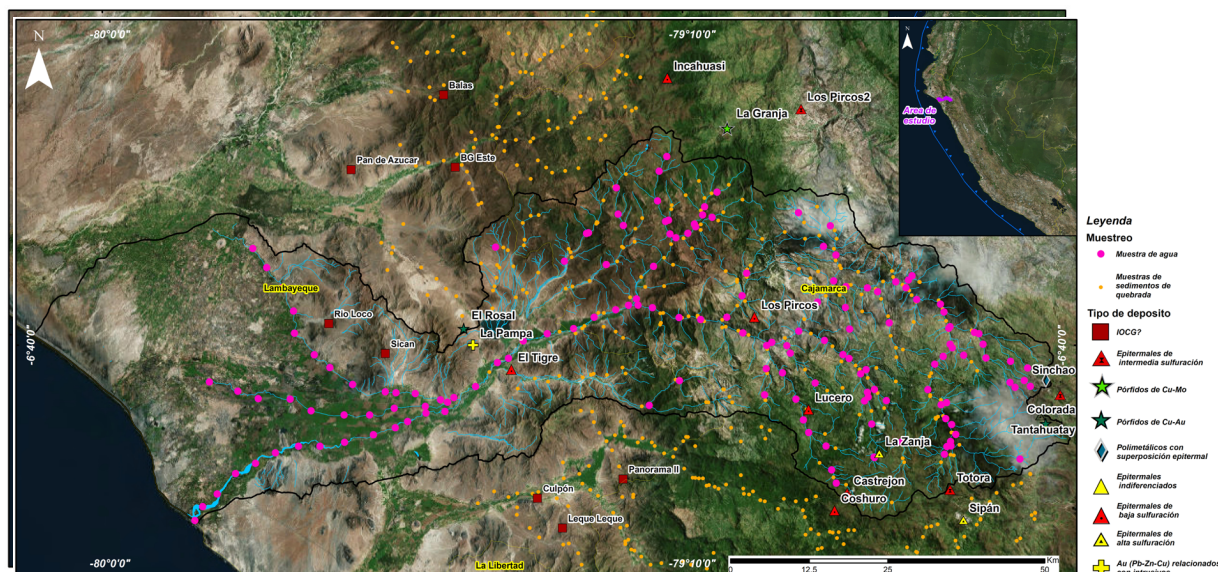


Figura 5. Ubicación de muestras de agua de la cuenca Chancay-Lambayeque (Escala 1:1000000), respecto a las muestras de sedimentos de quebrada, junto con los principales depósitos minerales (Datos: INGEMMET).

3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS

3.1.1 Análisis estadístico univariable y bivariable

Se realizó el análisis de los parámetros estadísticos determinando las medidas de tendencia central (media, mediana y moda), medidas de forma (asimetría, curtosis, etc.) y obteniendo los rangos de background, threshold y anomalías de las variables (Tabla A1), por ejemplo: las anomalías fuertes de Cu que superan 0.89 mg/L llegando hasta 2.54 mg/L, o de SO4 que superan los 302.94 mg/L llegando hasta 759 mg/L. Además, el análisis bivariado (Tabla A2) mediante correlación de Spearman (1904) definió algunas asociaciones geoquímicas de interés como Ba (mg/L) con Mo (mg/L), SO4 (mg/L) o Cl (mg/L), posiblemente relacionados a depósitos minerales.

3.1.2 Diagramas hidrogeoquímicos

El uso del diagrama Piper (Figura 6) [27] determinó dos “facies hidrogeoquímicas” (según Piper) de aguas superficiales dentro del área de estudio, donde la primera facie (representando la mayoría de muestras) evidenció ser del tipo bicarbonatada calco-magnésica por posible aporte de medio geológico dominado por rocas volcánicas y poca influencia de rocas carbonatadas, mientras que la segunda facie es de tipo sulfatada-clorurada calco-magnésica por posible influencia de hidrotermalismo con 8 muestras (códigos: 14fw-003, 025, 039, 044, 088 y 095; 14ew-064 y 200) ubicadas en diversos sectores como a los alrededores de los proyectos La Zanja, Tantauatay,

Los Pircos, Sinchao y el Rosal-El Tigre, y ocasionalmente en un sector al nor-oeste de Pajonal.

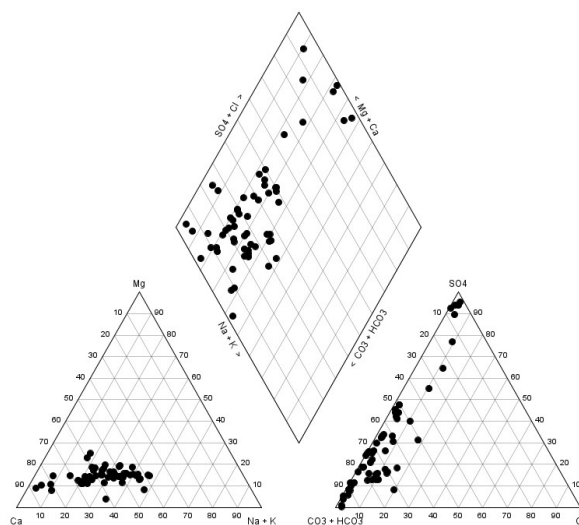


Figura 6. Diagrama Piper de la cuenca Chancay-Lambayeque.

El diagrama de Cl+SO4 (mg/L) vs Na+K (mg/L) [19] muestra la proveniencia del flujo de agua superficial indicando que en el área de estudio la fuente va mayormente de flujo regional a intermedio, mientras que solo algunas muestras presentan fuente de flujo local (12 muestras de códigos 13ew-008; 14ew-033 y 062; 14fw-017, 026, 071, 079, 084, 086, 087, 089 y 097) ubicadas cerca a los proyectos Castrejón, Totorá, La Zanja y Lucero, así como al sur del sector San Juan Licúpis (Figura 7).

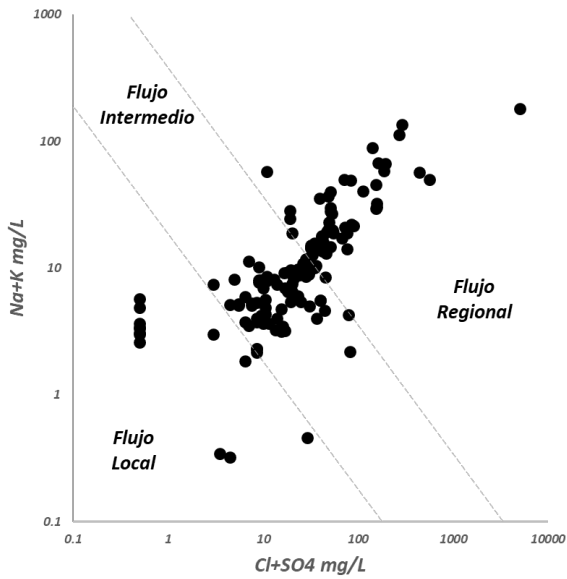


Figura 7. Diagrama Cl+SO4 (mg/L) vs Na+K (mg/L) mostrando la proveniencia del flujo de aguas.

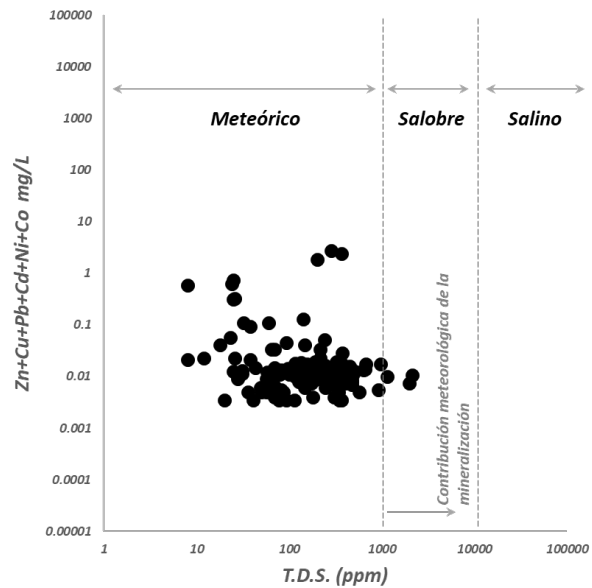


Figura 9. Diagrama T.D.S. (ppm) vs Zn+Cu+Pb+Cd+Ni+Co de la cuenca Chancay-Lambayeque.

Los diagramas de pH vs Zn+Cu+Pb+Cd+Ni+Co (mg/L) y T.D.S. (ppm) vs Zn+Cu+Pb+Cd+Ni+Co (mg/L) [8] evidencian que la mayoría de muestras son aguas con pH cerca al neutro y bajo contenido metálico, mientras que algunas muestras superan la baja acidez-bajo contenido metálico (dos muestras de código 14fw-025 y 039) y otros de baja acidez-alto contenido metálico (3 muestras de código 14fw-003, 016 y 044) ubicadas cerca a los proyectos Tantahuatay, Sinchao y Cerro Corona (Figura 8). Además, la

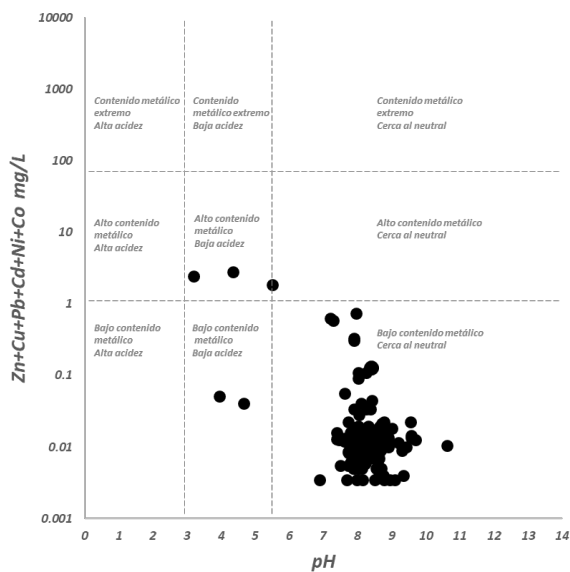


Figura 8. Diagrama pH vs Zn+Cu+Pb+Cd+Ni+Co de la cuenca Chancay-Lambayeque.

mayoría de muestras presenta una proveniencia de aguas meteóricas con algunas en el rango de salobres (dos muestras de código 14ew-016 y 14dw-017), por contribución meteorológica de la mineralización, ubicadas cerca al proyecto Los Pircos (Figura 9).

Los diagramas de Na/Na+Ca vs T.D.S. (ppm) y Cl/Cl+HCO3 vs T.D.S. (ppm) [9] determinan los mecanismos que controlan la composición química del agua. Se observa que la mayoría de muestras presentan un control de dominio geológico, con algunas muestras presentando un control de evaporación-transpiración (4 muestras de códigos 14dw-015, 017, 051 y 053) ubicadas cerca al océano entre Reque y Eten, otras controladas por mineralización (3 muestras de código 14fw-039, 088 y 095) ubicadas cerca a La Zanja y Sinchao-Tantahuatay-Cerro Corona, y algunas con contaminación por Cl (14ew-069 y 200; 14fw-025 y 044) ubicadas en Sinchao-Tantahuatay-Cerro Corona, El Rosal-El Tigre y en el sector nor-oeste de Pajonal (Figura 10 y 11).

Según lo expuesto, fueron pocas muestras que presentaron características hidrogeoquímicas particulares relacionadas a mineralización, mayormente ubicadas cerca de algún proyecto minero documentado y muy pocas ubicadas en nuevos sectores no registrados como, por ejemplo, al nor-este de Pajonal.

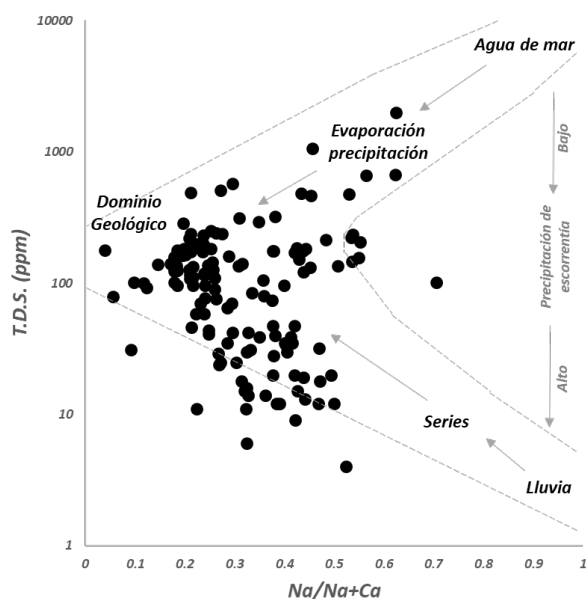


Figura 10. Diagrama Na/Na+Ca vs T.D.S. de la cuenca Chancay-Lambayeque.

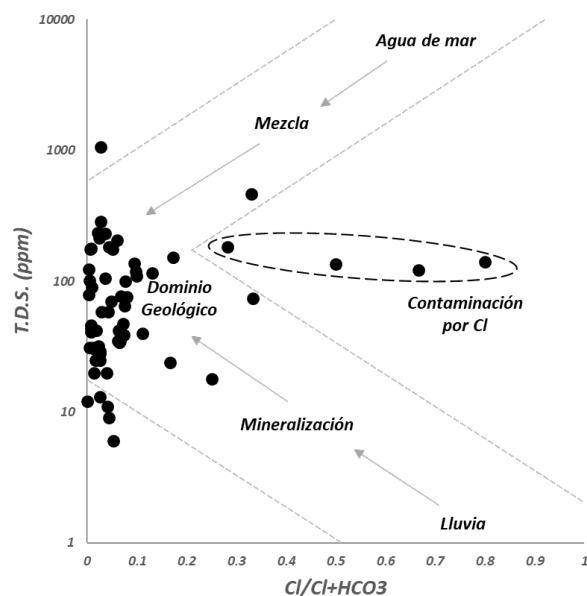


Figura 11. Diagrama Cl/Cl+HCO3 vs T.D.S. de la cuenca Chancay-Lambayeque.

3.1.3 Análisis de componentes principales (PCA)

En este análisis consideramos los primeros 4 PCA's pues explican la mayor varianza de los datos (67.47 % de la varianza; Figura 12) siendo interpretados geológicamente (Tabla 1).

La interpretación geológica de los PCA's (Figs. 13, 14 y 15) es:

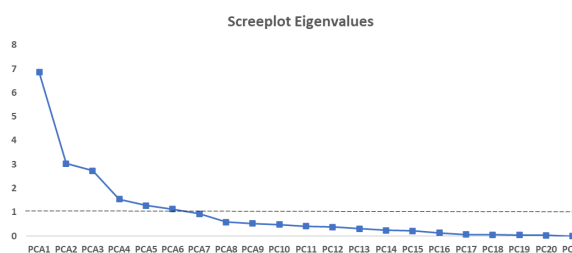


Figura 12. Gráfico de sedimentación presentando los PCA's.

Tabla 1. Valores escalados de los cuatro principales PCA's evaluados. *Leyenda de escala de colores de la tabla, donde el color rojo: mayor correlación positiva, y el color azul: mayor correlación negativa.

Variables escaladas	PC1	PC2	PC3	PC4
Al (mg/L)-CLR	0,74	0,35	0,22	0,08
As (mg/L)-CLR	0,25	-0,43	-0,19	-0,41
B (mg/L)-CLR	-0,36	0,35	-0,14	-0,53
Ba (mg/L)-CLR	-0,26	-0,30	0,69	-0,03
Ca (mg/L)-CLR	-0,83	-0,09	0,24	0,06
Cu (mg/L)-CLR	0,72	0,09	0,18	0,33
Fe (mg/L)-CLR	0,74	0,23	0,24	-0,23
K (mg/L)-CLR	-0,12	-0,41	0,46	-0,22
Mg (mg/L)-CLR	-0,89	-0,05	0,22	0,13
Mn (mg/L)-CLR	0,29	0,59	0,28	-0,26
Mo (mg/L)-CLR	-0,21	-0,67	-0,06	0,22
Na (mg/L)-CLR	-0,86	-0,13	0,03	-0,04
Pb (mg/L)-CLR	0,60	-0,28	-0,12	0,14
Sr (mg/L)-CLR	-0,86	0,00	0,33	-0,01
Zn (mg/L)-CLR	0,54	0,28	-0,15	0,40
SO4- (mg/L)-CLR	-0,43	-0,03	-0,03	0,70
Cl- (mg/L)-CLR	-0,68	0,26	-0,31	-0,17
C.E (µS)-CLR	-0,23	0,00	-0,85	-0,01
T.D.S (ppm)-CLR	-0,22	0,00	-0,83	-0,01
T (°C)-CLR	0,48	-0,77	-0,12	-0,15
pH-CLR	0,48	-0,79	-0,04	-0,12



- * PCA 1: Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH (IP a SO4-Cl-Ca-Sr-Na-Mg) posiblemente relacionados a mineralización tipo Epidermal de metales preciosos a polimetálica, con poca evidencia de rocas máficas.
- * PCA 2: Mn-Al-B (IP a K-As-Mo-T°-pH), posiblemente evidenciando rocas ígneas

- plutónicas relacionadas a mineralización tipo Epitermal somera o distal.
- PCA 3: Ba-K-Sr (IP a T.D.S.-C.E.), representando posiblemente rocas intermedias a félsicas con relación a evidencias de mineralización tipo Pórfido.
- PCA 4: SO4-Zn-Cu (IP a As-B), representando posiblemente mineralización tipo Epitermal (¿LS o IS?) y Vetas relacionadas a Intrusivos.

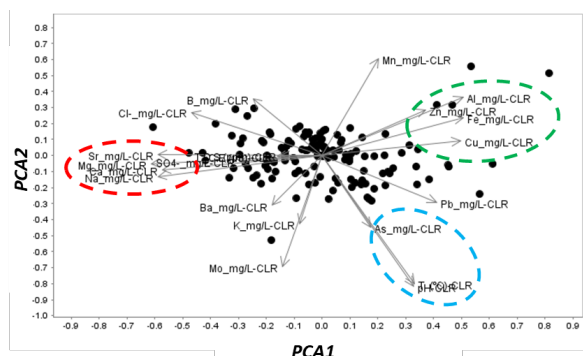


Figura 13. Gráfico de cargas y puntuaciones PCA1-PCA2 donde muestran 3 principales asociaciones entre las variables.

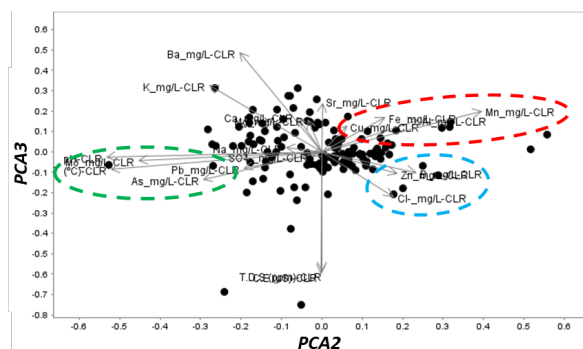


Figura 14. Gráfico de cargas y puntuaciones PCA2-PCA3 donde muestran 3 principales asociaciones entre las variables.

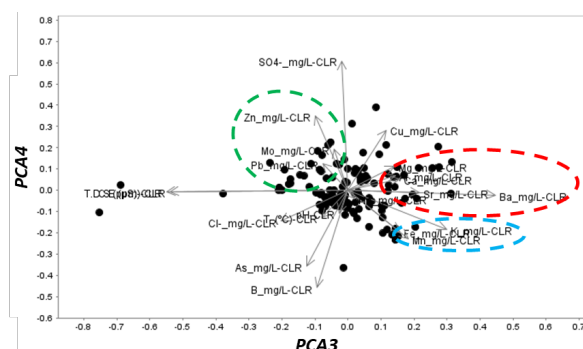


Figura 15. Gráfico de cargas y puntuaciones PCA3-PCA4 donde muestran 3 principales asociaciones entre las variables.

3.1.4 Análisis geoestadístico e interpolación por método kriging ordinario (OK)

El análisis geoestadístico e interpolación de los datos (Tabla A3) mediante kriging ordinario (OK) para Cu (mg/L), As (mg/L), Mo (mg/L), Pb (mg/L), Zn (mg/L), SO4 (mg/L), Fe (mg/L), K (mg/L), pH y T (°C) evidencia zonas anómalas nuevas en algunos sectores como: Marampampa, Santa Cruz de Succsuchamba, Picuncate, Pajonal, Pitipo, Catilluc, etc, y corrobora la ubicación de proyectos mineros como: Sinchao, Castrejón, Lucero, Los Pircos, Rio Loco, La Zanja, etc (visto en Figs. A1, A2, A3 y A4).

Así mismo, el análisis geoestadístico e interpolación para los 4 PCA's presenta las asociaciones de las variables en diversos sectores:

- El PCA1, con asociaciones ubicadas cerca de algunos proyectos como, por ejemplo, La Zanja-Castrejón, Sinchao-Tantahuatay-Cerro Corona, cerca de Lucero y El Tigre, o en el sector nor-oeste de Llama (Fig. A5).
- El PCA2, con asociaciones ubicadas, por ejemplo, cerca al proyecto Sinchao o cerca del sector Monsefú-Eten.
- El PCA3, con asociaciones ubicadas, por ejemplo, cerca de los proyectos La Zanja-Lucero-Los Pircos, o del sector Tongod (Fig. A6).
- El PCA4, con asociaciones ubicadas, por ejemplo, cerca al proyecto Sinchao.

3.2 Interpretación

Con base en el análisis de los diagramas hidrogeoquímicos, se interpreta dos grupos de aguas superficiales, de acuerdo a sus características hidrogeoquímicas (Fig. 16). El primer grupo congrega a la facie sulfatada-clorurada calco-magnésica con posible influencia de hidrotermalismo, baja acidez-alto contenido metálico, aguas salobres por contribución meteorológica de la mineralización, aguas con contaminación por mineralización y contaminación por cloruro predominando en su química como consecuencia de los depósitos minerales como Tantahuatay-Sinchao-Cerro Corona, La Zanja, Los Pircos y El Tigre-El Rosal, y ocasionalmente en el sector llamado Pajonal. Por otro lado, el segundo grupo congrega a la facie bicarbonatada calco-magnésica proveniente de un flujo regional a intermedio, bajo contenido metálico con un pH neutro, con proveniencia de material meteórico y dominio geológico que predominó en la química de estas aguas como consecuencia de la presencia de rocas volcánicas del Grupo Calipuy e intrusiones terciarias menores y rocas carbonatadas de diversas edades (Fm. La Leche, Celendín, etc.) en la parte media-alta de la cuenca.

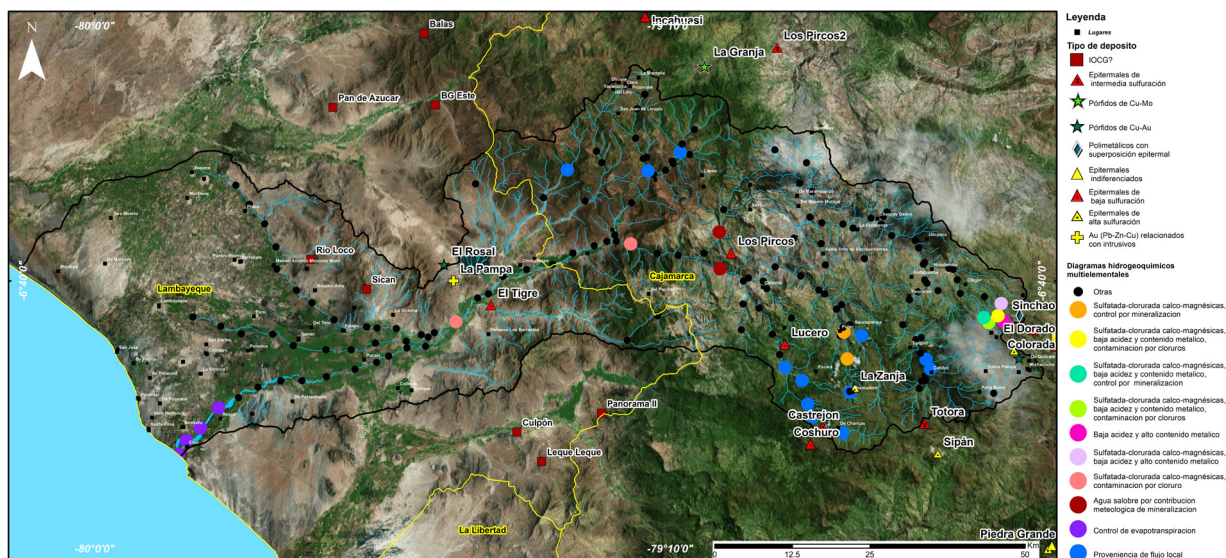


Figura 16. Ubicación de las muestras que presentaron características representativas en los diagramas hidrogeoquímicos.

Además, con el objetivo de simplificar la interpretación, se realizó una síntesis de la estadística univariable, bivariable y multivariable (PCA) representado en perfiles geoquímicos, respecto a la sección geológica E-W de la cuenca Chancay-Lambayeque.

La Figura 17 muestra los valores anómalos de As-Mo relacionados a los Epitermales como Los Pircos y Lucero, así como, del intrusivo Tonalítico del Paleógeno cerca a Pajonal, Pórfido Andesítico del Oligoceno al sur de Santa Cruz de Succsuchamba y Pórfido Andesítico del Eoceno cerca de Marampampa; además, el As presentó el aumento de sus valores promedio cerca de la costa hasta el proyecto Pórfido Cu-Mo El Rosal, y llegó a valores anómalos junto al Pb cerca del proyecto Pórfido Cu-Mo La Granja. Por otra parte, tanto el Zn-Cu-Pb y ocasionalmente el SO₄ presentaron sus valores anómalos cerca de Tantahuatay-Sinchao-Cerro Corona donde las aguas disminuyen drásticamente su pH a rango ácido – neutro, mientras que el Zn presentó valores anómalos cerca a los proyectos Castrejón-Lucero. Para el caso del Fe, la ubicación de sus valores sobre el promedio fue muy variable mayormente influenciado por depósitos minerales cercanos o algunas anomalías presentes relacionadas a intrusiones Pórfido Andesíticas del Eoceno y Oligoceno.

La Figura 18 muestra que el PCA1 (Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T^o-pH) presentó anomalías desde Los Pircos-Lucero hasta Tantahuatay-Sinchao-El Dorado quedando abierta al Este, relacionada a la mineralización de los sistemas tipo Epitermal del Paleógeno-Neógeno, así como una anomalía cerca al Epitermal El Tigre, y otras selectivas en los sectores de Huambos, Llama y San Juan de Licupis cerca al intrusivo Granítico de la Unidad Llacaden rodeando en un radio de 14-16 km al Pórfido Cu-Mo La Granja. En el caso del PCA2 (Mn-Al-B), evidenció valores anómalos cerca de Tantahuatay-Sinchao-El Dorado relacionado a la mineralización Epitermal del Mioceno, mientras que en otros sectores como entre Santa Cruz de Succsuchamba y Marampampa, relacionado al intrusivo Pórfido Andesítico del Eoceno, y en Chongoyape relacionado al intrusivo Tonalítico del Cretácico (Batolito de la Costa). Para el caso del PCA 3 (Ba-K-Sr), los valores fueron anómalos cerca de las rocas del Paleógeno-Neógeno como los volcánicos del Grupo Calipuy e intrusiones terciarias relacionadas a sistemas Pórfido-Epitermal como el Pórfido Cu-Mo La Granja, y desde los Epitermales Los Pircos hasta La Zanja. Por último, para el PCA4 (SO₄-Zn-Cu) se evidenció valores anómalos cerca de los Epitermales El Tigre y Los Pircos-Lucero hasta valores muy anómalos relacionados a Tantahuatay-Sinchao-El Dorado, resaltando además la presencia de nuevos sectores entre Pajonal y San Juan de Licupis relacionados al intrusivo Tonalítico del Paleógeno.

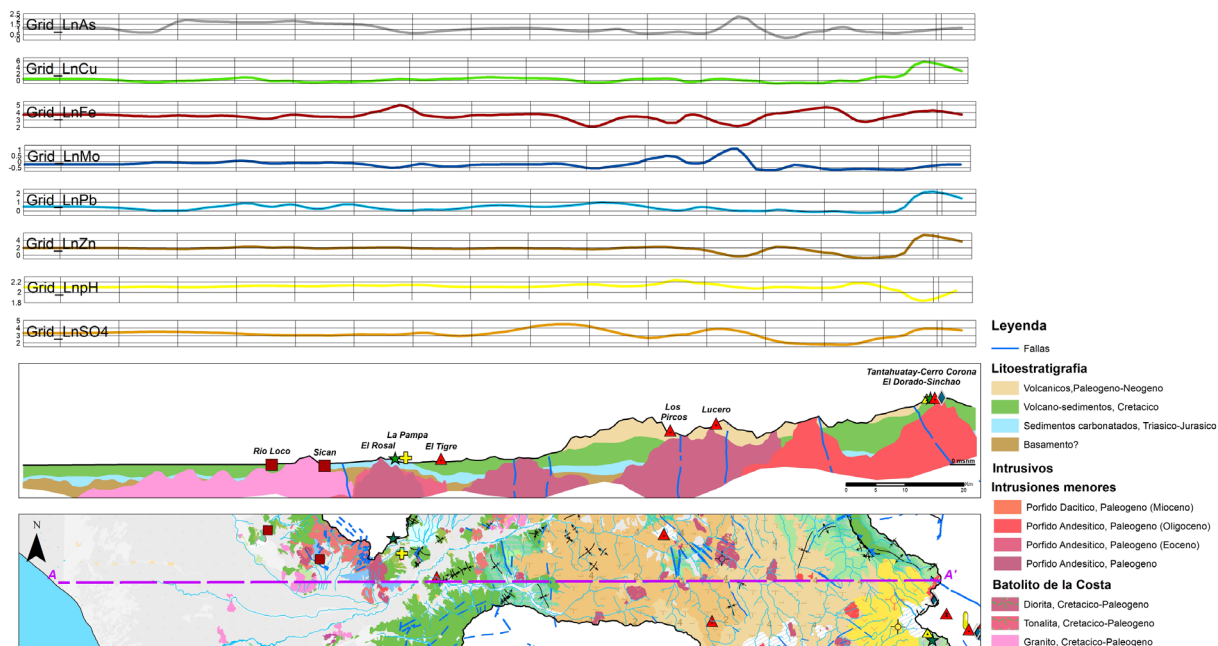


Figura 17. Sección geológica-geoquímica AA' respecto a los perfiles geoquímicos de As, Cu, Fe, Mo, Pb, Zn, pH y SO₄, con la ubicación de los principales proyectos.

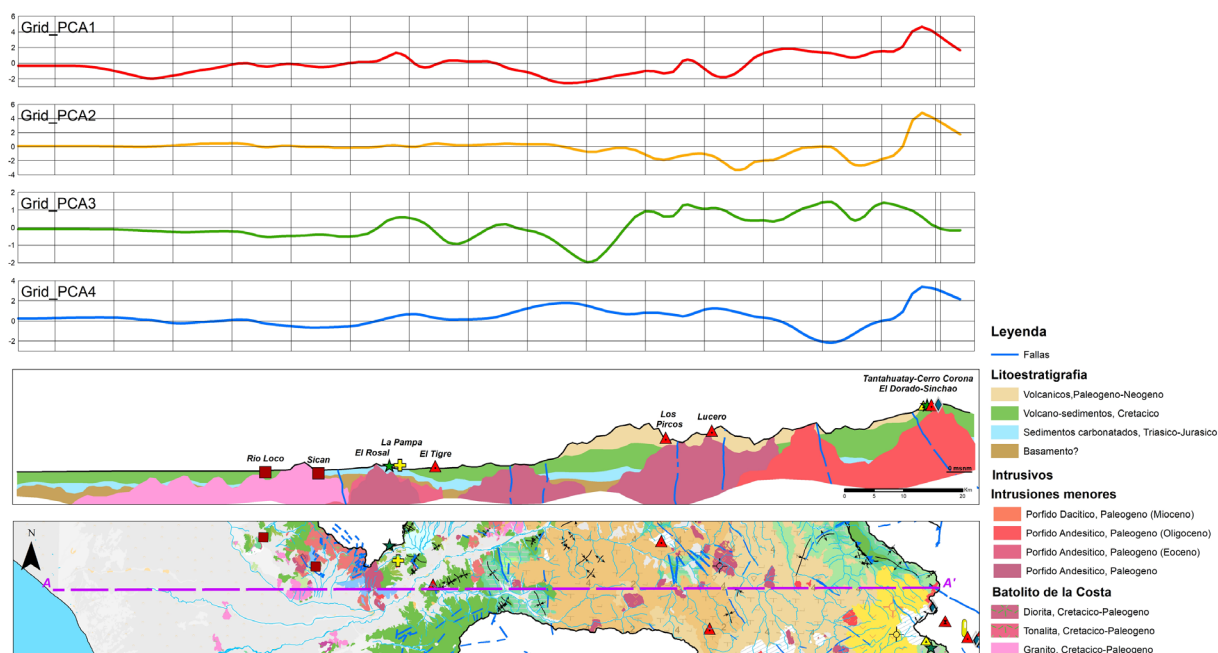


Figura 18. Sección geológica AA' respecto a los perfiles geoquímicos de los PCA's, con la ubicación de los principales proyecto

Por lo tanto, destacamos que mediante diagramas hidrogeoquímicos definimos anomalías cercanas a proyectos mineros documentados, mientras que su enfoque de búsqueda de nuevas zonas anómalas es muy limitado evidenciado en una zona nueva llamada sector Pajonal. Así mismo, mediante estadística univariable, bivariable, multivariable (PCA), geoestadística e interpolación, definimos nuevos sectores anómalos (Tongod, Pajonal, Llama, etc.), y evidenciamos la

con base a lo expuesto, definimos 17 zonas anómalas (Tabla A4) según las asociaciones multivariables, anomalías geoquímicas, geología y características hidrogeoquímicas, comparadas con las anomalías del estudio geoquímico de sedimentos de quebrada [5] concordando varias anomalías, así como, definiendo nuevas zonas de exploración para ser comprobadas en campo (Figura A7).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Este estudio de mapeo hidrogeoquímico con muestras de aguas superficiales definió zonas anómalas para exploración minera en la cuenca Chancay-Lambayeque. Parte del estudio demuestra que el uso de los diagramas hidrogeoquímicos enfocados en exploración minera es limitado, concordando la mayoría de anomalías en proyectos mineros ya conocidos, y solo evidenciando una anomalía ubicada en el sector Pajonal (anomalía 7, ver Tabla).

El análisis estadístico univariable fue de gran utilidad determinando los parámetros estadísticos, background, threshold y anomalías, donde las anomalías son de gran interés para exploración minera, presentadas usando interpolación geoestadística de las muestras mediante kriging ordinario. El ejemplo de anomalías fue observado para el As (anomalía entre 0.011 y 0.058 mg/L) en los sectores de Pajonal y San Juan de Lucupis, o el Mo (anomalía entre 0.002 y 0.01 mg/L) en los sectores de Chongoyape y Huambos. Muchas de estas anomalías de distintas variables coincidieron espacialmente siendo explicado mediante análisis bivariable (correlación de Spearman, por ejemplo, Ba - Mo - SO₄ - Cl) o multivariable usando PCA. Por medio del uso de PCA se determinó cuatro componentes principales que explicaron más del 67.47 % de la varianza total, también presentados usando interpolación geoestadística. Los PCA1 y PCA2 fueron relacionados a mineralización tipo Epitermal (anomalía 1 al 6), el PCA3 a mineralización distal de tipo Pórfido (anomalía 7 al 11), y el PCA4 a mineralización Epitermal o Vetas relacionadas a intrusivos (anomalía 12 al 17).

El uso de secciones geológica-geoquímicas E-W permitió explicar mediante información geológica regional, las anomalías de las variables y PCA's presentadas en perfiles geoquímicos. Tal es el caso para las variables, que las anomalías de As-Mo estuvieron relacionadas espacialmente a los Epitermales como los proyectos Los Pircos o Lucero, y al stock Tonalítico del Paleógeno que aflora cerca al sector Pajonal, o las anomalías de Zn estuvieron relacionadas espacialmente a los proyectos Castrejón o Lucero, y Tantauatay-Sinchao-Cerro Corona concordando con anomalías de Cu-Pb-SO₄. Por otro lado, para los PCA's como el PCA1 con anomalías relacionadas espacialmente desde los proyectos Los Pircos-Lucero hasta Tantauatay-Sinchao-El Dorado, y en los sectores Huambo, Llama y San Juan de Licupis cerca del intrusivo Granítico de la Unidad Llacaden rodeando al Pórfido Cu-Mo La Granja (norte de la cuenca). También, para el PCA3 con anomalías

relacionadas espacialmente a los volcánicos del Grupo Calipuy e intrusiones terciarias asociadas a un sistema Pórfido-Epitermal como el Pórfido Cu-Mo La Granja, y los proyectos Epitermales Los Pircos hasta La Zanja. Por consiguiente, es de gran utilidad el uso de secciones geológica-geoquímicas para la interpretación de las anomalías de variables y multivariables (PCA).

Por último, dado los resultados de esta investigación, se definieron las 17 zonas anómalas, incluyendo 11 nuevas zonas de interés para exploración mineral.

4.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con trabajos de exploración minera aplicando el análisis hidrogeoquímico, considerando los avances tecnológicos de los ensayos de laboratorio (nuevos métodos, más precisos y con menor límite de detección inferior) y así acceder a nuevas alternativas de exploración minera de posibles depósitos minerales someros y/u ocultos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bazán, J., Lagos, A., "La Formación Pariatambo en los alrededores de Cajamarca y su relación con el evento anóxico oceánico del Albiano en el Perú mediante el análisis de secciones delgadas". XVIII Congreso Peruano de Geología, p. xxx-xxx, 2016.
- [2] Bazán, O., Lagos, A., "Implicancias tectónicas en el magmatismo y metalogenia de la región de Cajamarca". XVIII Congreso Peruano de Geología, p. xxx-xxx, 2016.
- [3] Bustamante, E., "Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el acuífero soconusco, Chiapas". Tesis de maestría en Geociencias aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., 111 p., 2017.
- [4] Cameron, E.M., "Hydrogeochemical methods for base metal exploration in the northern Canadian shield". Journal of Geochemical Exploration, Volume 10, Issue 3, Pages 219-243, ISSN 0375-6742, 1978.
- [5] Carlotto V., Acosta H., Mamani M., Cerpa L., Rodríguez R., Jaimes F., Navarro P., Cueva E. y Chacaltana C., "Los dominios geotectónicos del territorio peruano". XV Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. Exp. N° 9. p. 47-50, 2010.
- [6] Chira, J., Guerra, K., Rivera R., Vargas, L., Acosta, J., Valencia, M., "Geoquímica Ambiental de la cuenca del río Chancay-Lambayeque". INGEMMET. Boletín, Serie B: Geología Económica, 15, 125 p., 5 mapas 2006.

- [7] Davies, C., "Tectonic, magmatic and metallogenic evolution of the Cajamarca mining district, Northern Peru". Ph. D. Thesis, James Cook University, Australia, 323 p, 2002.
- [8] Ficklin, W., Plumlee, G., Smith, K., McHugh, J., "Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralized areas". *Water-Rock Interaction* 1, 381–384, 1992.
- [9] Gibbs R. J., "Mechanisms controlling world water chemistry". *Science (New York, N.Y.)*, 170(3962), 1088–1090, 1970.
- [10] Hampel, A., "The migration history of the Nazca Ridge along the Peruvian active margin: a reevaluation". *Earth and Planetary Science Letters* 203, p. 665–679, 2002.
- [11] Jaillard, E., Soler, P., "Cretaceous to early Paleogene tectonic evolution of the northern Central Andes (0–18S) and its relation to geodynamics". *Tectonophysics* 259: p. 47–53, 1996.
- [12] Jaimes, F., Weimin, G., Cueva, E., Patiño, C., "Nuevas interpretaciones en el emplazamiento de los volcánicos de la formación Oyatún y su relación con la metalogenia". En: *Congreso Peruano de Geología*, 19, Lima, 2018. Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 4 p., 2018.
- [13] Kelley, D. L., Benn, C., Riedell, K. B. & Johnson, T., "The role of geochemistry in Andean copper discoveries in the challenge of finding new mineral resources: global metallogeny, innovative exploration and new discoveries". Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, Society of Economic Geologists. Special Publication, v.1, n.15, p. 271–286, 2010.
- [14] Kidder, J. A., McClenaghan, M. B., Leybourne, M. I., McCurdy, M. W., Pelchat, P., Layton-Matthews, D., Voinot, A., "Hydrogeochemistry of porphyry-related solutes in ground and surface waters; an example from the Casino Cu–Au–Mo deposit, Yukon, Canada". *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*; 22 (2): geochem2021–058, 2022.
- [15] Kidder, J.A., Leybourne, M.I., Layton-Matthews, D., Howell, R.J., Rissmann, C.F.W., "A review of hydrogeochemical mineral exploration in the Atacama Desert, Chile". *Ore Geology Reviews*, Volume 124, 103562, ISSN 0169-1368, 2020.
- [16] Lagos, A., Quispe, Z., "Aportes al Análisis de Cuencas sedimentarias en los alrededores de las localidades de los Baños del Inca, Cruz Blanca, Otuzco, distrito de Cajamarca, Cajamarca, Perú". *Sociedad Geológica del Perú*, 2007.
- [17] Leybourne, M.I. and Cameron, E.M., "Source, transport, and fate of rhenium, selenium, molybdenum, arsenic, and copper in groundwater associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile". *Chemical Geology*, 247, p. 208–228, 2008.
- [18] McCuaig, C.T., Sherlock, R., "Exploration Targeting: Proceedings of Exploration". Sixth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 75-82, 2017.
- [19] Mifflin, M.D., "Region 5, Great Basin", *Hydrogeology*, William Back, Joseph S. Rosenshein, Paul R. Seaber, 1998.
- [20] Ministerio del Ambiente, "D.S. N° 004-2017-MINAM: Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias", Lima, 2017.
- [21] Navarro, J., Jaimes, F., Santos, A., Alvan, A., "La Formación Sávila en el noroeste de Perú: equivalente occidental de la Formación Condorsinga, nuevos registros estratigráficos del Toarciano". *XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú*, Pub. Esp. N° 9, Cusco p. 862-872, 2010.
- [22] Navarro, P., Monge, R., "Períodos eruptivos del volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) en la Cordillera Occidental del Norte del Perú: Segmento Cajamarca". *Congreso Peruano de Geología*, 14, Congreso Latinoamericano de Geología, 13, Lima, PE, 29 setiembre - 3 octubre 2008, Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 2008, 6 p, 2008.
- [23] Noble, R.R.P., Gray, D.J. & Gill, A.J., "Field guide for mineral exploration using hydrogeochemical analysis", 2011.
- [24] Núñez S., Villacorta S., Chira J. & Rivera R., "Estudio Geoambiental de la Cuenca Chancay-Lambayeque". *INGEMMET, Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica*. N° 33, 139p., 10 mapas escala 1:150 000, 2006.
- [25] Oyarzun, R., "Introducción a la geología de minas: Exploración & Evaluación". Ediciones GEMM - Aula2punto.net, 2011.
- [26] Pardo-Casas, F., Molnar, P., "Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time". *Tectonics* 6: p. 233–248, 1987.
- [27] Piper, A M., "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses". *Eos, Transactions American Geophysical Union* 25, 914–928, 1944.

- [28] Rivera, R., “Características metalogénicas de los yacimientos asociados al volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) en el Norte del Perú, región Cajamarca”. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Recursos Minerales y Energéticos, 2007.
- [29] Robert, E., Jaillard, E., Peybernes, B., Geogers, L., “La transgresión albana en la Cuenca Andina (Perú Central - Ecuador): modelo general y diacronismo de los depósitos marinos”. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 94 (2002) p. 7, 2002.
- [30] Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B., Dobak, P., McEwan E., Rowe, R., Zhou, X., “Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types”, 2007.
- [31] Rodríguez Morante, I., Huanacuni Mamani, D., Villarreal Jaramillo, E., “Informe de las franjas metalogenéticas y áreas potenciales de la región Cajamarca”, 2011.
- [32] Rosas, B. S., Fontboté, L., “Evolución sedimentológica del Grupo Pucará (Triásico superior – Jurásico Inferior) en un perfil SW-NE en el centro del Perú”. Volumen Jubilar Alberto Benavides, Sociedad Geológica del Perú. p. 279 – 309, 1995.
- [33] Soler, P., Bonhomme, M. G., “Relation of magmatic activity to plate dynamics in central Peru from Late Cretaceous to present”. Special Pap. J. Geol. Soc. Am. 241: p. 173–192, 1990.
- [34] Valencia, M., Santisteban, A., Oscco, S., Lozada, V., “Prospección geológica minera regional en la región Lambayeque”. INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 51, 52 p., 12 mapas, 2018.
- [35] Valer, R., Remigio, F., “Prospección por depósitos tipo IOCG asociados al volcanismo Jurásico submarino del norte del Perú, Chiclayo-Lambayeque”. XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, 2006.
- [36] Vich, A.J.I., 1996, "Aguas Continentales. Formas y procesos", Departamento de Geografía, Fac. F. y L., U.N. Cuyo - IANIGLA (CONICET), 1882 pp.

ANEXOS

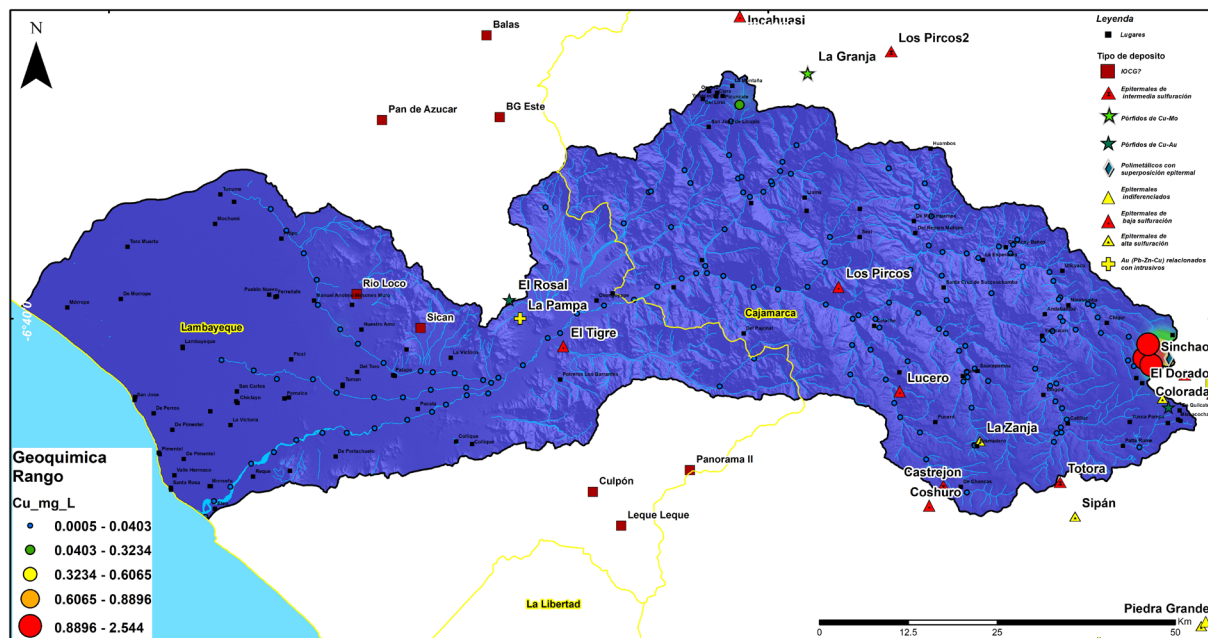


Figura A1. Interpolación grid de Cu mg/L, con la ubicación de lugares y tipos de depósitos minerales.

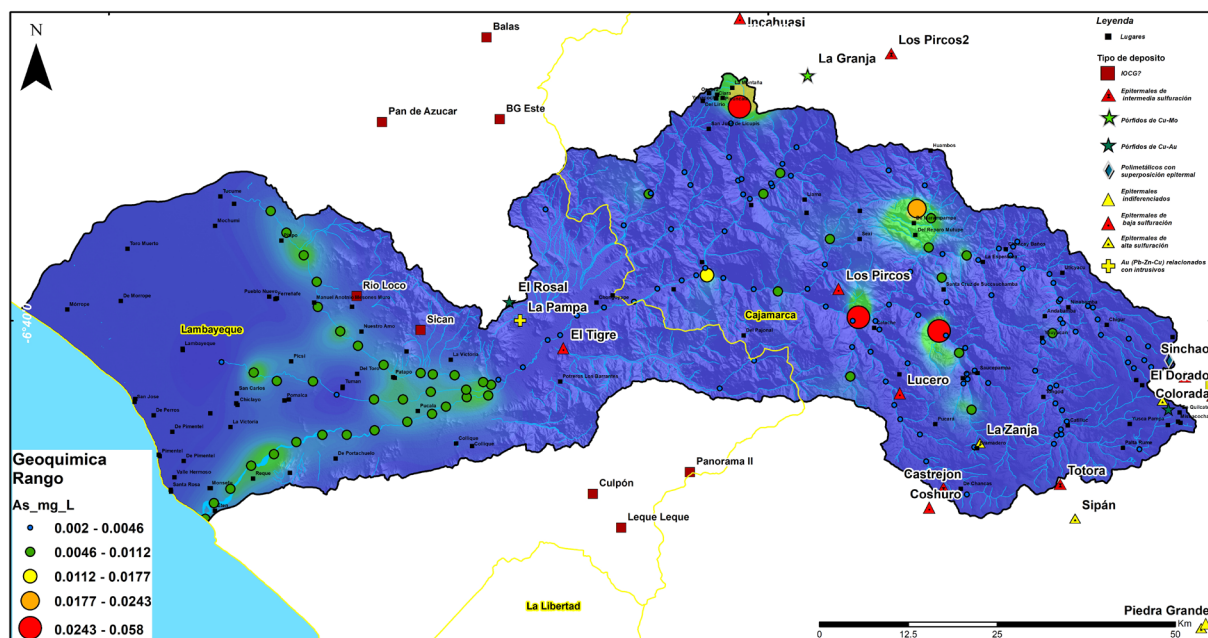


Figura A2. Interpolación grid de As mg/L, con la ubicación de lugares y tipos de depósitos minerales.

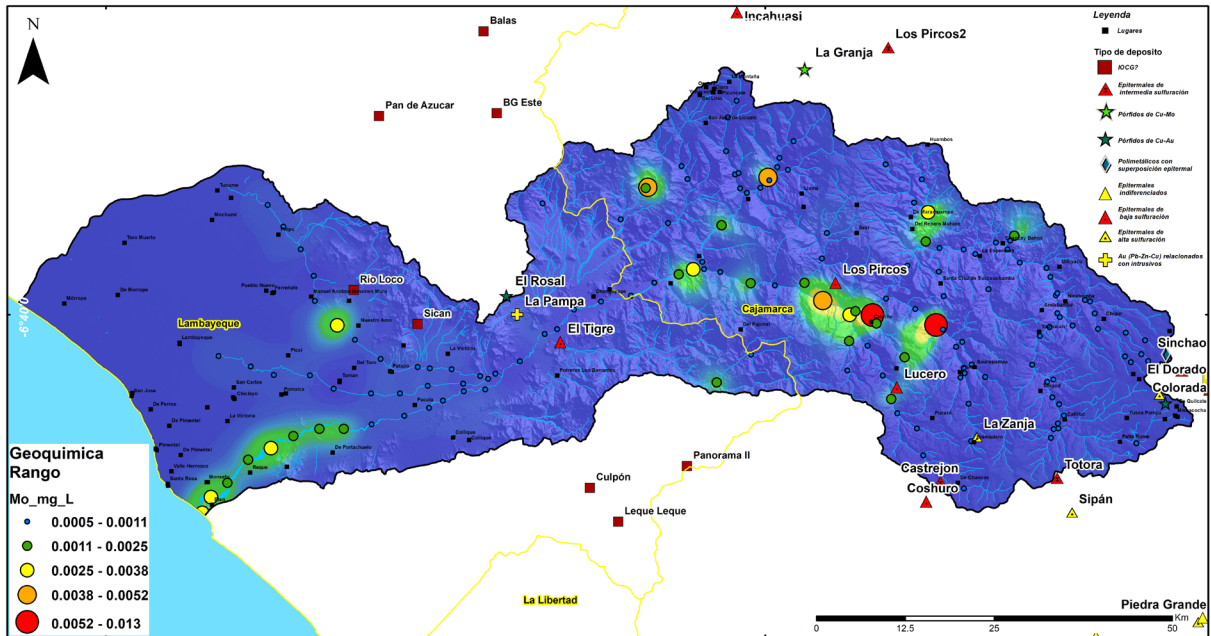


Figura A3. Interpolación grid de Mo mg/L, con la ubicación de lugares y tipos de depósitos minerales.

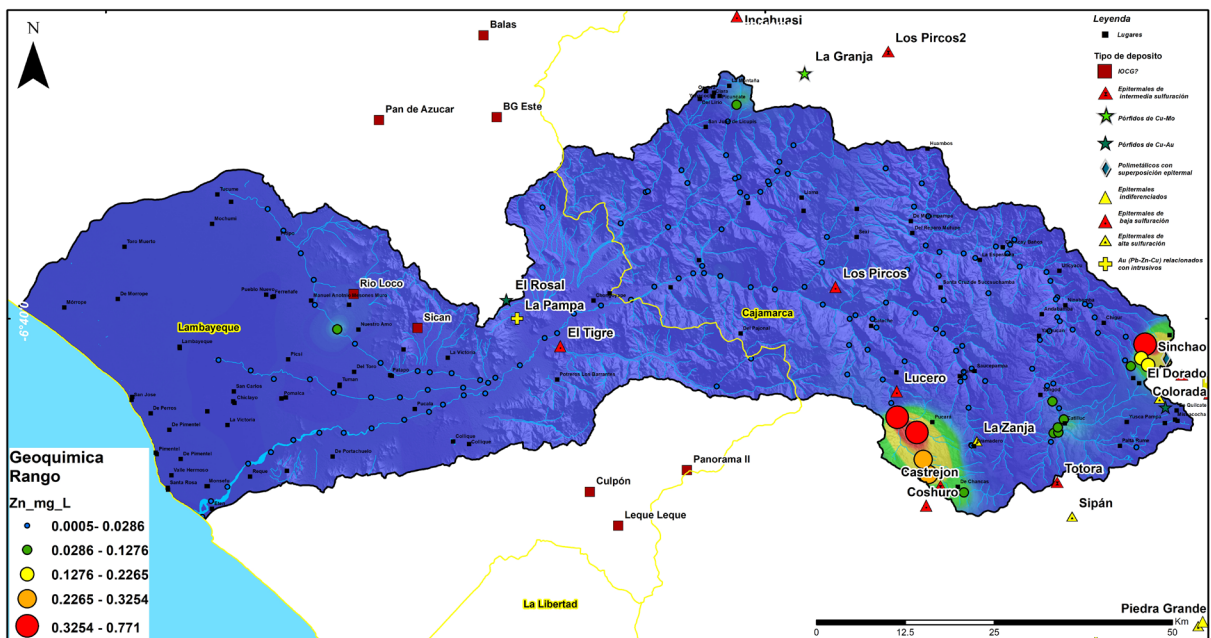


Figura A4. Interpolación grid de Zn mg/L, con la ubicación de lugares y tipos de depósitos minerales.

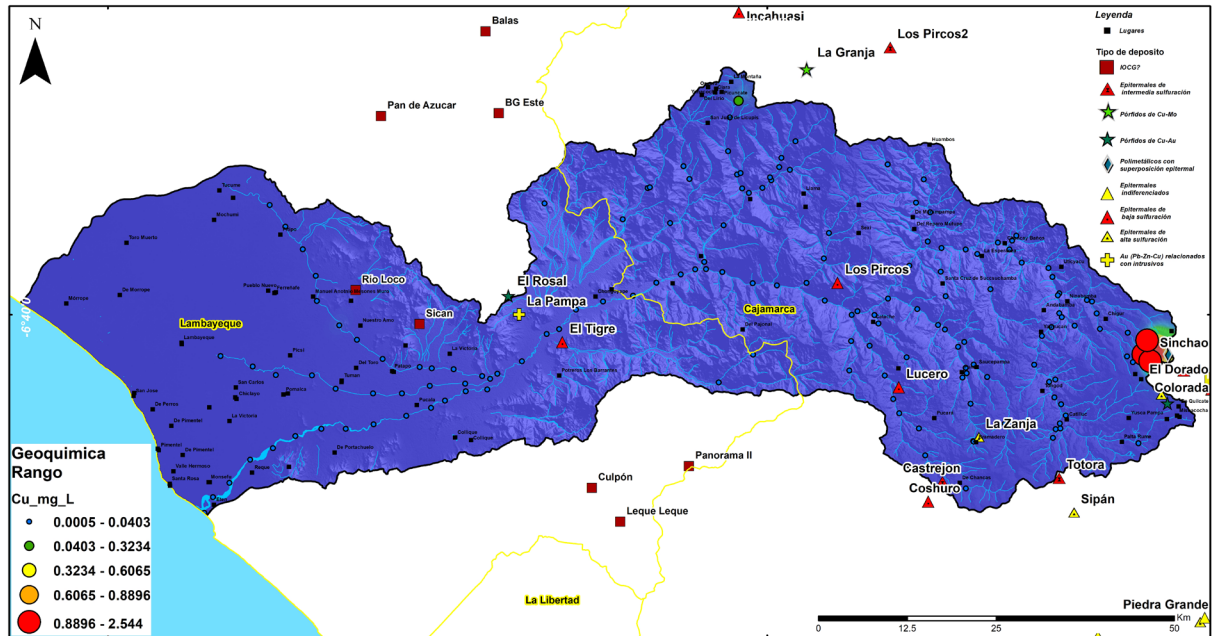


Figura A5. Interpolación grid de PCA1, con la ubicación de lugares y tipos de depósitos minerales.

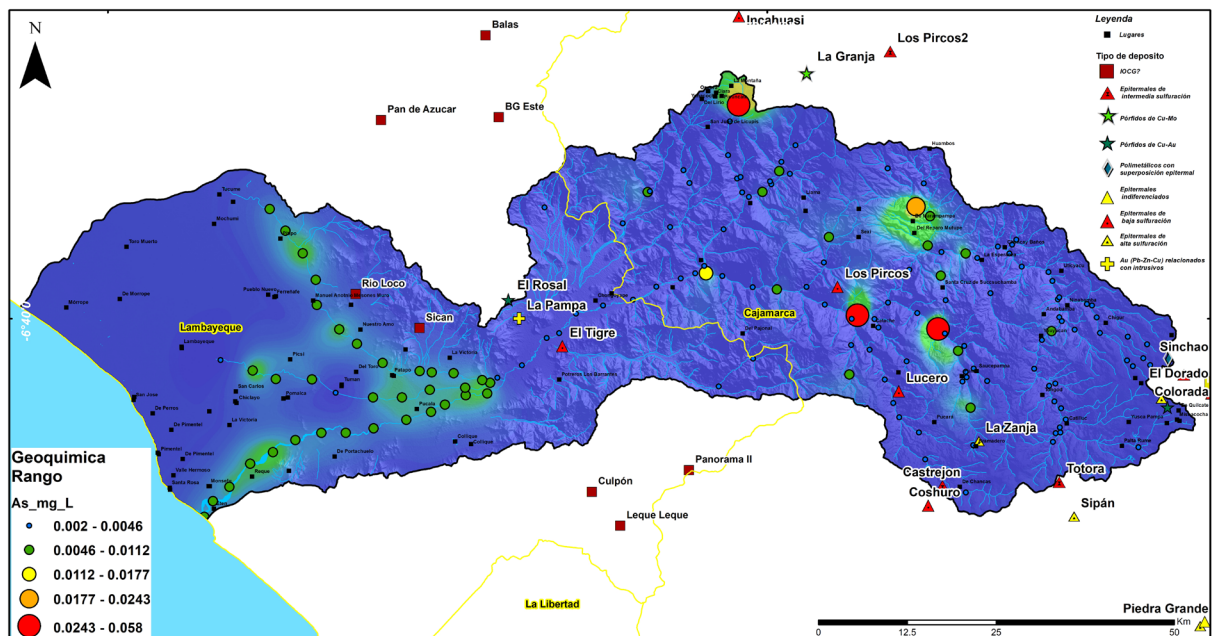


Figura A6. Interpolación grid de PCA3, con la ubicación de lugares y tipos de depósitos minerales.

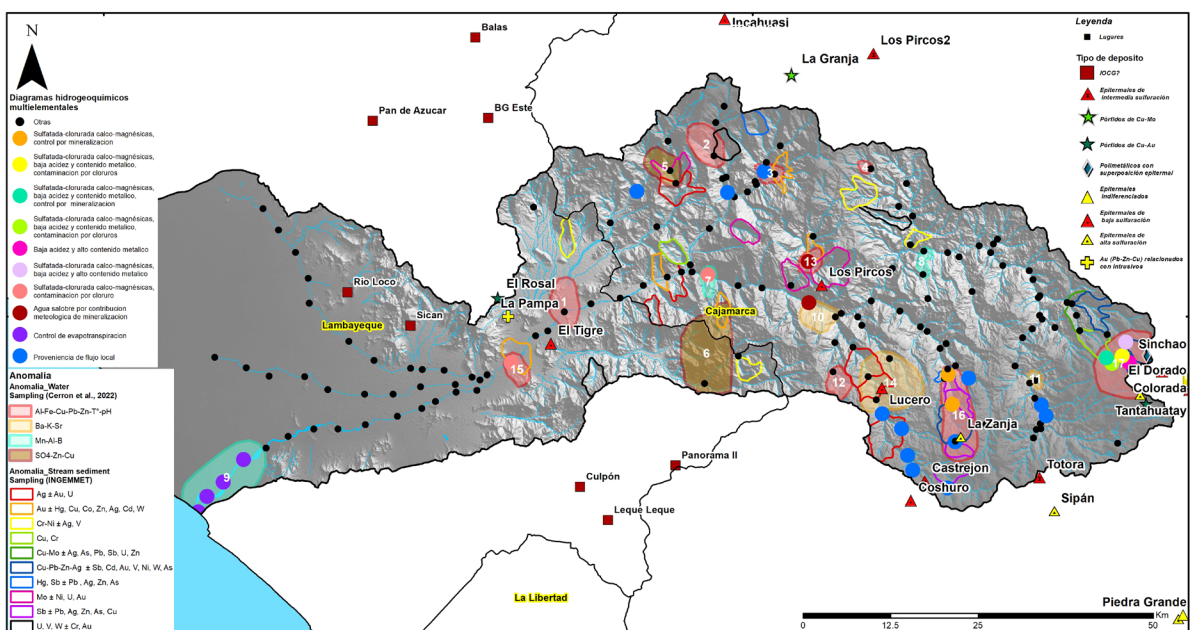


Figura A7. Ubicación de anomalías geoquímicas de aguas, comparadas respecto a las anomalías geoquímicas de sedimentos de quebrada [5].

Tabla A1. Límites de rangos de background, threshold, anomalía débil, moderada y fuerte de las variables. L. D.: Limite de detección, curtosis: grado de concentración de los valores de la variable en la zona central, asimetría: grado de asimetría de la distribución de valores de una variable, background: contenido promedio de una variable en una región determinada, threshold: valor estadístico de una variable sobre el cual se puede considerar anómala a una muestra, anomalía: valores estadísticamente elevados en una región determinada.

Variables	Datos totales	Datos Nulos	Datos L. D.	Valores únicos	Mínimo	Máximo	Suma	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Curtosis	Asimetría	Limite background	Limite threshold-anomalía débil	Limite anomalía débil-moderada	Limite anomalía moderada-fuerte
Al (mg/L)	156	0	35	23	0.015	7.36	32.83	0.21	0.05	0.02	0.87	414.80	44.39	6.48	0.210	1.083	1.956	2.829
As (mg/L)	156	0	102	13	0.002	0.06	0.71	0.00	0.00	0.00	0.01	143.73	39.65	5.75	0.005	0.011	0.018	0.024
B (mg/L)	156	0	26	30	0.005	2.74	15.63	0.10	0.07	0.01	0.23	229.67	113.31	9.97	0.100	0.330	0.560	0.791
Ba (mg/L)	156	0	2	52	0.001	0.18	4.32	0.03	0.02	-	0.02	75.06	21.75	3.68	0.028	0.049	0.069	0.090
Ca (mg/L)	156	0	1	156	0.063	140.81	5266.69	33.76	34.20	-	27.68	81.99	1.16	0.92	33.761	61.442	89.123	116.804
Cu (mg/L)	156	0	54	18	0.001	2.54	6.29	0.04	0.00	0.00	0.28	702.48	64.06	7.94	0.040	0.323	0.607	0.890
Fe (mg/L)	156	0	15	25	0.005	6.05	22.88	0.15	0.05	0.03	0.62	419.26	71.09	8.22	0.147	0.762	1.377	1.992
K (mg/L)	156	0	1	108	0.005	47.36	265.00	1.70	1.35	1.45	3.76	221.34	142.86	11.72	1.699	5.458	9.218	12.978
Mg (mg/L)	156	0	1	135	0.010	143.48	909.25	5.83	3.63	-	12.31	211.29	101.98	9.28	5.829	18.143	30.458	42.773
Mn (mg/L)	156	0	15	49	0.001	1.06	4.69	0.03	0.01	0.00	0.10	325.24	81.71	8.40	0.030	0.128	0.226	0.324
Mo (mg/L)	156	0	97	8	0.001	0.01	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	127.99	39.13	5.39	0.001	0.002	0.004	0.005
Na (mg/L)	156	0	1	154.0	0.063	133.25	2298.37	14.73	7.88	-	21.19	143.84	14.88	3.54	14.733	35.926	57.119	78.311
Pb (mg/L)	156	0	112	13.0	0.001	0.40	0.73	0.00	0.00	0.00	0.03	690.59	153.29	12.33	0.005	0.037	0.069	0.102
Sr (mg/L)	156	0	1	130.0	0.001	1.23	32.29	0.21	0.17	-	0.20	94.88	5.73	2.04	0.207	0.403	0.600	0.796
Zn (mg/L)	156	0	21	34.0	0.001	0.77	4.47	0.03	0.01	0.00	0.10	345.33	35.10	5.75	0.029	0.128	0.226	0.325
SO4- (mg/L)	137	19	0	63.0	2.000	759.00	5864.00	42.80	21.00	21.00	86.71	202.59	41.86	6.00	42.803	129.517	216.231	302.945
Cl- (mg/L)	155	1	41	31.0	0.500	4303.00	5885.50	37.97	6.00	0.50	345.36	909.55	153.97	12.39	37.971	383.335	728.699	1074.062
pH	156	0	0	100	3.200	10.63	1274.90	8.17	8.23	8.51	0.87	10.65	13.49	-2.81	8.172	9.043	9.913	10.784
C.E (µS)	156	0	1	131	8.000	4000.10	47020.10	301.41	253.00	-	406.67	134.92	46.49	5.83	301.411	708.079	1114.747	1521.415
T.D.S (ppm)	156	0	1	115	4.000	2000.10	23685.10	151.83	125.50	141.00	205.78	135.54	44.18	5.65	151.828	357.612	563.397	769.182
T (°C)	154	0	2	92	11.400	28.60	3233.60	21.00	21.60	25.30	3.90	18.55	-0.53	-0.49	20.997	24.893	28.789	32.685

Tabla A2. Correlación bivariable por método Spearman (1904) de las variables. Rangos: 0.5 a 0.6 como correlación moderada, 0.6 a 0.8 como correlación alta, y 0.8 a 0.99 como correlación muy alta.

Spearman	Al (mg/L)	As (mg/L)	B (mg/L)	Ba (mg/L)	Ca (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	Mo (mg/L)	Na (mg/L)	Pb (mg/L)	Sr (mg/L)	Zn (mg/L)	SO4- (mg/L)	Cl- (mg/L)	C.E (µS)	T.D.S (ppm)	T (°C)	pH
Al (mg/L)	1.00	0.00	0.24	0.06	-0.12	0.35	0.69	0.28	-0.14	0.47	-0.22	-0.10	0.17	-0.05	0.30	-0.01	-0.03	0.02	-0.03	0.07	0.01
As (mg/L)	0.00	1.00	0.37	0.36	0.32	0.05	0.05	0.16	0.29	0.43	0.46	0.36	0.11	0.33	0.14	0.20	0.47	0.36	0.33	0.45	-0.03
B (mg/L)	0.24	0.37	1.00	0.45	0.52	0.00	0.09	0.62	0.52	0.35	0.37	0.61	0.10	0.59	-0.02	0.34	0.69	0.42	0.41	0.38	0.15
Ba (mg/L)	0.06	0.36	0.45	1.00	0.72	-0.04	-0.08	0.50	0.65	0.40	0.60	0.63	-0.06	0.74	0.12	0.60	0.63	0.45	0.47	0.39	-0.05
Ca (mg/L)	-0.12	0.32	0.52	0.72	1.00	-0.17	-0.25	0.46	0.97	0.24	0.73	0.90	-0.04	0.96	-0.19	0.70	0.78	0.62	0.62	0.54	0.13
Cu (mg/L)	0.35	0.05	0.00	-0.04	-0.17	1.00	0.23	0.06	-0.16	0.15	-0.16	-0.14	0.06	-0.10	0.17	-0.04	-0.10	0.06	-0.05	0.01	0.09
Fe (mg/L)	0.69	0.05	0.09	-0.08	-0.25	0.23	1.00	0.22	-0.24	0.52	-0.23	-0.20	0.14	-0.18	0.31	-0.19	-0.11	0.13	-0.12	0.15	0.14
K (mg/L)	0.28	0.16	0.62	0.50	0.46	0.06	0.22	1.00	0.45	0.31	0.35	0.59	-0.07	0.54	-0.09	0.32	0.50	0.31	0.29	0.30	0.17
Mg (mg/L)	-0.14	0.29	0.52	0.65	0.97	-0.16	-0.24	0.45	1.00	0.21	0.69	0.93	-0.03	0.94	-0.17	0.73	0.79	0.62	0.61	0.49	0.09
Mn (mg/L)	0.47	0.43	0.35	0.40	0.24	0.15	0.52	0.31	0.21	1.00	0.18	0.24	0.06	0.31	0.24	0.22	0.34	0.26	0.25	0.27	0.22
Mo (mg/L)	-0.22	0.46	0.37	0.60	0.73	-0.16	-0.23	0.35	0.69	0.18	1.00	0.70	0.01	0.72	-0.02	0.65	0.67	0.50	0.48	0.45	0.09
Na (mg/L)	-0.10	0.36	0.61	0.63	0.90	-0.14	-0.20	0.59	0.93	0.24	0.70	1.00	-0.04	0.90	-0.15	0.72	0.83	0.66	0.65	0.54	0.08
Pb (mg/L)	0.17	0.11	0.10	-0.06	-0.04	0.06	0.14	-0.07	-0.03	0.06	0.01	-0.04	1.00	-0.03	0.31	0.09	0.09	0.01	0.00	0.07	0.06
Sr (mg/L)	-0.05	0.33	0.59	0.74	0.96	-0.10	-0.18	0.54	0.94	0.31	0.72	0.90	-0.03	1.00	-0.15	0.70	0.81	0.63	0.62	0.53	0.09
Zn (mg/L)	0.30	0.14	-0.02	0.12	-0.19	0.17	0.31	-0.09	-0.17	0.24	-0.02	-0.15	0.31	-0.15	1.00	0.13	-0.01	0.05	-0.05	0.09	0.24
SO4- (mg/L)	-0.01	0.20	0.34	0.60	0.70	-0.04	-0.19	0.32	0.73	0.22	0.65	0.72	0.09	0.70	0.13	1.00	0.63	0.51	0.50	0.22	0.09
Cl- (mg/L)	-0.03	0.47	0.69	0.63	0.78	-0.10	-0.11	0.50	0.79	0.34	0.67	0.83	0.09	0.81	-0.01	0.63	1.00	0.65	0.65	0.53	0.03
C.E (µS)	-0.02	0.36	0.42	0.45	0.62	-0.06	-0.13	0.31	0.62	0.26	0.50	0.66	-0.01	0.63	-0.05	0.51	0.65	1.00	0.97	0.59	0.09
T.D.S (ppm)	-0.03	0.33	0.41	0.47	0.62	-0.05	-0.12	0.29	0.61	0.25	0.48	0.65	0.00	0.62	-0.05	0.50	0.65	0.97	1.00	0.61	0.09
T (°C)	-0.07	0.45	0.38	0.39	0.54	-0.01	-0.15	0.30	0.49	0.27	0.45	0.54	-0.07	0.53	-0.09	0.22	0.53	0.59	0.61	1.00	0.23
pH	0.01	-0.03	0.15	-0.05	0.13	0.09	-0.14	0.17	0.09	-0.22	0.09	0.08	-0.06	0.09	-0.24	-0.09	0.03	0.09	0.09	0.23	1.00

Tabla A3. Parámetros de los variogramas experimental y teórico de los elementos analizados geostatísticamente. Az: Azimut, Atol: tolerancia total, Buz: buzamiento, Lag: distancia entre muestras, Nlag; número de lags, MaxLag: máxima distancia de muestras, Pepita: discontinuidad del semivariograma en el origen respecto al eje Y, Meseta: máximo valor que puede tomar el semivariograma en el eje Y, Alcance: alcance total del semivariograma en el eje X, Anisotropía: comportamiento de la varianza en diferentes direcciones.

Variable	Parámetros del variograma experimental						Parámetros del variograma teórico modelado				
	Az	Atol	Buz	Lag	Nlag	MaxLag	Modelo	Pepita	Meseta	Alcance	Anisotropía
As	115	30	0	3000	9	27000	Esférico	0	2	12500	1
Cu	130	30	0	3000	9	27000	Esférico	0	2	12500	1
Pb	153	30	0	3000	9	27000	Esférico	0	0.675	12500	1
Zn	148	30	0	3000	9	27000	Esférico	0	2.8	13000	1
Mo	81	30	0	3000	9	27000	Esférico	0	0.4	7500	1
Fe	110	30	0	3000	9	27000	Esférico	0.065	1.565	10000	1
K	25	30	0	3000	9	27000	Esférico	0.575	0.1	5000	1
SO4	112	30	0	3000	9	27000	Esférico	0.15	0.68	17500	1
Tº	60	30	0	3000	9	27000	Esférico	0.001	0.025	17500	1
pH	95	30	0	3000	9	27000	Esférico	0	0.011	10000	1
PCA 1	121	30	0	3000	9	27000	Esférico	0.35	6	13500	1
PCA 2	90	30	0	3000	9	27000	Esférico	0	2.75	12000	1
PCA 3	110	30	0	3000	9	27000	Esférico	0.155	1.6	12000	1
PCA 4	109	30	0	3000	9	27000	Esférico	0.125	1.2	12000	1

Tabla A4. Principales anomalías hidrogeoquímicas enumeradas por orden de prioridad.

Anomalía	Asociación (PCA)	Anomalía geoquímica	Geología	Característica hidrogeoquímica	Ubicación
1	Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH	Mo	Tonalita del Cretácico (Batolito de la Costa)	N/A	Sector Chongoyape
2	Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH	Pb, As	Granito del Paleógeno (Unidad Llacaden)	N/A	Sector de San Juan de Licupis
3	Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH	Mo	Granito del Paleógeno (Unidad Llacaden)	Proveniencia de flujo local	Sector Llama
4	Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH	As, Mo	Pórfido Andesítico del Eoceno	N/A	Sector SW de Huambos
5	SO4-Zn-Cu	Mo, SO4	Tonalita del Cretácico (Batolito de la Costa)	N/A	Sector SW de San Juan de Licupis
6	SO4-Zn-Cu	Mo, SO4	Diorita del Cretácico (Batolito de la Costa)	N/A	Sector El Pajonal
7	Mn-Al-B	As, Mo, SO4	Diorita del Cretácico (Batolito de la Costa)	Sulfatada-clorurada calco-magnésica, contaminación por cloruro	Sector NW del Pajonal
8	Mn-Al-B	As, Mo	Pórfido Andesítico del Eoceno	N/A	Sector Santa Cruz de Sucsuchamba
9	Mn-Al-B	As, Mo	Monzonita del Cretácico (Batolito de la Costa)	Control de evapotranspiración	Sector Eten-Reque
10	Ba-K-Sr	Mo, SO4	Pórfido Andesítico del Eoceno	Agua salobre por contribución meteorológica de mineralización	Sector SW del Prospecto Los Pircos
11	Ba-K-Sr	Pb	Pórfido Andesítico del Mioceno	N/A	Sector Tongod
12	Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH	Mo	Intrusivos relacionados al Proyecto Lucero	N/A	Sector W del Proyecto Lucero
13	Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH	As, Mo	Intrusivos relacionados al Proyecto Los Pircos	Agua salobre por contribución meteorológica de mineralización	NE del Proyecto Los Pircos
14	Ba-K-Sr	Zn, SO4	Intrusivos relacionados al Proyecto Lucero	N/A	Proyecto Lucero
15	Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH	As	Intrusivos relacionados a los Proyectos El Rosal-La Pampa-El Tigre	Sulfatada-clorurada calco-magnésica, contaminación por cloruro	Proyectos El Rosal-La Pampa-El Tigre
16	Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH	Zn, SO4	Intrusivos relacionados al Proyecto La Zanja	Sulfatada-clorurada calco-magnésica, control por mineralización	Proyecto La Zanja
17	Al-Fe-Cu-Pb-Zn-T°-pH	Cu, Zn, Pb, Fe, pH	Intrusivos relacionados a los Proyectos Tantahuatay-Cerro Corona-Slnchao	Múltiples características	Proyectos Tantahuatay-Cerro Corona-Slnchao