

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

ESCUELA DE POSGRADO

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL**



TESIS:

**Distribución espacial de metales pesados en arroyos
altoandinos de la cuenca alta del río Cachi Ayacucho 2024**

Para optar el grado académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN
GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE**

PRESENTADO POR:

Bach. Pedro Nilton CRUZADO VASQUEZ

ASESOR:

Dr. Carlos Emilio CARRASCO BADAJOZ

AYACUCHO - PERÚ

2026

Dedicatoria

A toda a mi familia, principalmente a mis padres.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mi alma mater, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, que ha sido la base fundamental de mi formación académica y profesional. De manera especial, extendiendo mi reconocimiento a la Escuela de Posgrado y a la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, mención Gerencia de Proyectos y Medio Ambiente, por proporcionarme las herramientas necesarias para la realización de esta investigación.

Agradezco al Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de Información Geográfica (BioSIG) por ofrecerme las facilidades necesarias para llevar a cabo los procesos experimentales, así como por la cesión de equipos y materiales que fueron esenciales para el desarrollo de este estudio.

Mi más profundo reconocimiento a mi asesor, el Dr. Carlos Carrasco Badajoz, cuya orientación y observaciones fueron cruciales durante todo el proceso de elaboración de esta tesis. Sus valiosos consejos contribuyeron significativamente a mejorar la calidad de este trabajo.

Mi gratitud también va dirigida a mi coasesora la Mg. Carolina Rayme Chalco, por su apoyo en la toma de muestras y procesamiento de las aguas colectados de los arroyos, determinante para la materialización de esta investigación.

Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento a todos mis compañeros y amigos, quienes, con su presencia y apoyo, estuvieron a mi lado durante los momentos más desafiantes en la elaboración de esta tesis. Su confianza y estímulo fueron esenciales para lograr este importante objetivo.

Índice

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Índice	IV
Relación de tablas	VII
Relación de figuras	VIII
Relación de anexos	X
Resumen	XII
Abstract	XIII
Introducción	14

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1. Descripción del problema	18
1.2.1. Problema general	20
1.2.2. Problemas específicos	20
1.3. Alcance y limitaciones	21
1.3.1. Alcances	21
1.3.2. Limitaciones	22
1.4. Variables e indicadores	23
1.5. Operacionalización de las variables	24
1.6. Objetivos	24
1.6.1. Objetivo general	24
1.6.2. Objetivos específicos	25
1.7. Justificación	25
1.8. Hipótesis	26
1.8.1. Hipótesis general	26
1.8.2. Hipótesis específicas	26

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes	27
2.1.1. Internacional	27
2.1.2. Nacional	34
2.2. Bases teóricas	38
2.2.1. Los sistemas fluviales altoandinos	38
2.2.2. Características fisicoquímicas de los ríos altoandinos	39

2.2.3. Servicios ambientales de los ríos andinos	40
2.2.4. Influencia edafológica en las características físicas y químicas del agua superficial	42
2.3.5. Drenaje Ácido de Roca (DAR)	44
2.3.6. Características fisicoquímicas del agua	51
2.3. Marco conceptual	55
2.4. Marco legal	57
2.4.1. Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338)	57
2.4.2. Código Penal	59
2.4.3. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (Decreto Supremo 004-2017-MINAM)	60

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución	63
3.1.1. Ubicación política	63
Para más detalle observar los mapas de los anexos 16 y 17.	63
3.1.2. Localización geográfica de los arroyos	63
3.2. Tipo de investigación	64
3.3. Población y muestra	64
3.3.1. Población	64
3.3.2. Muestra	64
3.3.3. Muestreo	64
3.3.4. Unidad de observación	65
3.4. Operacionalización de variables	65
3.5. Diseño de investigación	66
3.6. Técnicas de recolección de datos	66
3.6.1. Ubicación de las zonas de muestreo	66
3.6.2. Colecta de muestras de agua para determinación de metales pesados	67
3.6.3. Determinación de las características fisicoquímicas del agua	68
3.6.4. Determinación de las características morfohidrológicas	70
3.7. Procesamiento de datos	70

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características fisicoquímicas del agua de arroyos	72
4.2. Concentración de metales	82

4.3. Relación entre las características hidromorfológicas de los arroyos con la cantidad de metales	91
CONCLUSIONES	103
RECOMENDACIONES	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXO	113

Relación de tablas

	Categorías consideradas en los Estándares Nacionales de	
Tabla 1	Calidad Ambiental (ECA) aprobado por Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.	61
Tabla 2	Ubicación geográfica de las zonas de muestreo en los siete arroyos monitoreados	63
Tabla 3	Operacionalización de variables	65

Relación de figuras

	Pág.
Figura 1	Valores de alcalinidad, dureza total y pH registrados en siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024 72
Figura 2	Valores de conductividad eléctrica, turbidez y temperatura registrados en siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024 73
Figura 3	Valores de sulfatos, fosfatos y nitratos registrados en siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024 74
Figura 4	Caudal en siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024 75
Figura 5	Valores de aluminio, arsénico y bario en época húmeda (marzo) y seca (julio) registrado en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024. 83
Figura 6	Valores de cadmio, cobre y hierro en época húmeda (marzo) y seca (julio) registrado en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024 86
Figura 7	Valores de manganeso, níquel y zinc en época húmeda (marzo) y seca (julio) registrado en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024. 88
Figura 8	Diagrama de dispersión para la relación de la altitud con la concentración de metales (aluminio arsénico, bario, cadmio y cobre) en agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024. 92
Figura 9	Diagrama de dispersión para la relación de la altitud con la concentración de metales (hierro, manganeso, níquel y zinc) en agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024. 93
Figura 10	Diagrama de dispersión para la relación del caudal con la concentración de metales (aluminio, arsénico, bario, cadmio y cobre) en agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024 94

Figura 11	Diagrama de dispersión para la relación del caudal con la concentración de metales (hierro, manganeso, níquel y zinc) en agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.	95
Figura 12	Dendograma de similitud para los arroyos en base de las características físicas y químicas de sus agua cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024. a: Para los dos meses (promedio) con ; b: Para marzo (época húmeda): c. Para julio (época seca)	97
Figura 13	Dendograma de similitud para los arroyos en base la presencia de metales en sus agua cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024. a: Para los dos meses (promedio) con ; b: Para marzo (época húmeda): c. Para julio (época seca)	98
Figura 14	Biplot para los dos primeros componentes principales para siete arroyos en base las características físicas-químicas y metales en sus aguas, cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.	99

Relación de anexos

	Pág.
Anexo 1	112
Anexo 2	113
Anexo 3	114
Anexo 4	116
Anexo 5	117
Anexo 6	118
Anexo 7	119
Anexo 8	120
Anexo 9	121
Anexo 10	122
Anexo 11	123

	Correlación de Spearman para la altitud y caudal con las	
Anexo 12	características físicas-químicas de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024	124
	Correlación de Spearman para la altitud y caudal con los	
Anexo 13	metales presentes en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024	125
Anexo 14	Registro fotográfico del proceso de investigación	126
	Proceso de las determinaciones físicas y químicas del agua	129
Anexo 15	proveniente de los arroyos examinados	
Anexo 16	Mapa de ubicación de las zonas de muestreo	130
Anexo 17	Mapa de ubicación de la cuenca del Cachi y microcuenca del Apacheta (donde se ubica la zona de estudio)	131

Resumen

El agua que se genera en las cuencas altoandinas abastece a las necesidades humanas, en vista del cual es importante su monitoreo, principalmente a nivel de las cabeceras debido a las particularidades geoquímicas que presentan. **Objetivo**, la investigación se desarrolló con la finalidad de determinar las características físicas-químicas (alcalinidad total, dureza total, turbidez, sulfatos, fosfatos, nitratos, temperatura, conductividad eléctrica y pH), así como la presencia de metales (aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc) en siete arroyos de la cabecera del río Cachi, ubicados de 3700 a 4700 msnm, las que fueron denominadas desde P1 hasta P7, donde las primeras se hallan a mayor altitud, para luego disminuir paulatinamente. **Materiales y métodos**, el muestreo de los arroyos identificados se desarrolló durante dos periodos, en el marzo (época húmeda) y julio (época seca). Se ajustó a un **diseño** no experimental prospectivo. Se realizaron determinaciones físicas y químicas in situ y en laboratorio, para este último fue necesario coleccionar muestras de agua. **Resultados**, de acuerdo a las características físicas y químicas, así como de la concentración de metales pesados, se determinó que los arroyos ubicados a mayor altitud (P2 y P2), presentaron los menores valores de pH y alcalinidad, mientras que fueron mayores en sulfatos, aluminio, cobre y níquel, evidenciando que son afectados por el drenaje ácido de roca (DAR) natural. Sin embargo, existe la presencia de un arroyo ubicado a menor altitud (P6) en el que se caracteriza por presentar un mayor caudal, con mayores valores de conductividad eléctrica, arsénico, pH y caudal.

Palabras clave: cabecera de cuenca, lóticos, calidad, fisicoquímico, temporalidad

Abstract

Water generated in high Andean basins sustains human needs; therefore, monitoring is crucial, particularly at headwaters due to their unique geochemical characteristics. **Objective:** This research aimed to determine the physicochemical properties (total alkalinity, total hardness, turbidity, sulfates, phosphates, nitrates, temperature, electrical conductivity, and pH) and the presence of metals (aluminum, arsenic, barium, cadmium, copper, iron, manganese, nickel, and zinc) in seven streams within the Cachi River headwaters. These sites, located between 3,700 and 4,700 m a.s.l., were designated P1 through P7, with the lower numbers corresponding to higher altitudes. **Materials and methods:** Sampling was conducted across two periods: March (wet season) and July (dry season), following a prospective non-experimental design. Physical and chemical determinations were performed both *in situ* and in the laboratory using collected water samples. **Results:** Based on the physicochemical characteristics and heavy metal concentrations, it was determined that the streams at higher altitudes (P1 and P2) exhibited the lowest pH and alkalinity values, while showing higher concentrations of sulfates, aluminum, copper, and nickel. This evidence suggests they are affected by natural acid rock drainage (ARD). However, a stream at a lower altitude (P6) was characterized by higher discharge, as well as increased levels of electrical conductivity, arsenic, and pH.

Keywords: headwaters, lotic, quality, physicochemical, temporality

Introducción

Los arroyos altoandinos son ecosistemas acuáticos altamente dinámicos y sujetos a constantes cambios, influenciados principalmente por las variaciones estacionales en la precipitación y el deshielo de la nieve (Encalada et al., 2019). Además, estos cuerpos de agua están siendo fuertemente impactados por el cambio climático, un fenómeno global que altera, tanto la frecuencia como la intensidad de las precipitaciones pluviales. Este proceso, a su vez, afecta a los nevados, cuya tendencia es a la reducción progresiva, por lo que disminuye la cantidad de agua almacenada en forma de hielo, lo que se transforma en agua con características fisicoquímicas particulares (Dudgeon, 2011).

La calidad del agua en los arroyos de cabecera de cuenca es crucial para el bienestar de los ecosistemas acuáticos dependientes de ella, así como para la seguridad hídrica de las comunidades humanas que utilizan estos recursos, tanto para consumo directo como para riego e incluso en procesos industriales, involucrando la producción de alimentos (Stevenson & Sabater, 2010).

Los arroyos altoandinos desempeñan un papel esencial en la regulación hídrica y la preservación de la biodiversidad en la región. Sin embargo, estos ecosistemas están expuestos a graves amenazas, especialmente la contaminación, dentro de los más importantes es por metales pesados, que se derivada de la actividad minera, tanto legal como ilegal, como muy frecuentemente ocurre en las zonas altas de nuestro país (Passarelli et al.,

2024). Se debe resaltar, que la presencia de metales pesados no siempre está asociada exclusivamente a las actividades humanas; también está determinada por las características del suelo por donde circulan las aguas de los sistemas lóticos (Choque & Estremadoyro, 2024). Las propiedades del suelo influyen significativamente en la biodisponibilidad y la movilidad de los metales pesados en las regiones de gran altitud, lo que afecta su distribución en las fuentes de agua. Estas propiedades incluyen el pH, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la textura del suelo, que en conjunto determinan la especiación química y la partición de los metales pesados en los suelos. La interacción de estos factores con las condiciones climáticas y las actividades antropogénicas modula aún más la movilidad y la biodisponibilidad de los metales pesados, lo que repercute en sus posibles riesgos ecológicos y para la salud. En las siguientes secciones se detalla la influencia de las propiedades específicas del suelo en el comportamiento de los metales pesados en ambientes de gran altitud (Dashtey, 2024).

Por otro lado, los suelos altoandinos suelen tener altos contenidos de materia orgánica y minerales arcillosos, lo que permite la adsorción de metales pesados, afectando su movilidad y disponibilidad para el transporte hacia los cuerpos de agua. Esta capacidad de retención está influenciada por la composición química y física del suelo, como el contenido de materia orgánica, el pH, y la presencia de óxidos de hierro y aluminio, los cuales tienen una alta afinidad por los metales pesados (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007). Estudios previos han demostrado que los suelos con un

mayor contenido de materia orgánica y un pH bajo presentan mayores concentraciones de metales pesados disueltos en los arroyos, bajo dichas condiciones, por ejemplo, las concentraciones se incrementaron ostensiblemente, en comparación con suelos con pH más elevado, siendo las concentraciones significativamente menores. Estos resultados sugieren que el pH del suelo tiene una influencia directa en la solubilidad y movilidad de los metales pesados, lo que afecta su presencia en los cuerpos de agua (Singh & Steinnes, 1994).

La alta concentración de metales pesados, tenga un tipo de origen u otro, en los arroyos de cabecera de cuenca representa una amenaza importante para la biodiversidad y la salud humana. Los metales pesados tienen el potencial de bioacumularse en los organismos acuáticos, lo que puede generar efectos tóxicos que afectan su supervivencia y reproducción. Este proceso puede, a su vez, reducir la biodiversidad y alterar las funciones ecológicas de los arroyos, comprometiendo la resiliencia de los ecosistemas (Tyller, 2006).

Por lo detallado, resulta crucial hacer monitoreos para determinar la concentración de metales pesados en los arroyos de las cabeceras de cuenca que desembocan en cuerpos de agua de mayor volumen, teniendo mayor énfasis en aquellos que están destinados a abastecer poblaciones humanas. En dicho proceso es necesario considerar otras características fisicoquímicas del agua, ya que muchos de ellos están relacionados con la movilidad y toxicidad de los metales pesados, es el caso del pH y la conductividad eléctrica.

Dentro de lo descrito se circunscribe la cabecera de la cuenca del río Cachi, que se halla por encima de los 4000 msnm, donde las características del suelo son especiales en la medida que muestra físicas como el color, que tienden desde suelos muy oscuros hasta rojiza. En dicha área geográfica se hallan arroyos de primer orden, muchos de ellos temporales, y que confluyen a cuerpos lóticos de mayor envergadura, para luego convertirse en el río Apacheta. El río mencionado, es empleado como fuente principal de agua para la ciudad de Ayacucho, además de que en su recorrido es empleado para la crianza de trucha.

En el contexto descrito, este trabajo de investigación pretende evaluar la presencia de metales pesados en el agua de los arroyos y quebradas de primer orden que se hallan distribuidas en la cabecera de la cuenca del río Cachi, durante el periodo de lluvias y en la época de estío.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Descripción del problema

Las cabeceras de cuenca en las zonas altoandinas son regiones particularmente vulnerables a una variedad de factores que afectan la calidad del agua de los arroyos, especialmente en lo que respecta a la presencia de metales pesados (Violante et al., 2010). Estos ecosistemas acuáticos, que desempeñan un papel fundamental en la regulación hídrica y la sostenibilidad de la biodiversidad, sin embargo, enfrentan una creciente amenaza tanto por actividades antropogénicas que se pueden desarrollar en áreas aledañas, como por características fenómenos derivados del cambio climático. Debido a lo último señalado, se observa una creciente incertidumbre de la presencia y la frecuencia de la precipitación pluvial, influenciando directamente en la presencia de agua en los pequeños arroyos.

Según la realidad de nuestro país, uno de los factores más importantes que contribuye a la contaminación de los arroyos de cabecera de cuenca en las zonas andinas, es la actividad minera, en muchos casos, ilegal. Se debe considerar que, en toda actividad minera, metálica como no metálica, libera del suelo metales pesados como plomo, mercurio, cadmio y arsénico, que son altamente tóxicos para los organismos que depende de los ecosistemas acuáticos, incluyendo al hombre. Estos contaminantes, al ser incorporados al agua, tienen el potencial de bioacumularse en los organismos vivos, como invertebrados, peces y otros, generando procesos de intoxicación que pueden

conducir a la muerte. Además, dicho proceso, pone en otros animales, como aves y mamíferos, que consumen los organismos anteriormente señalados.

Sin embargo, la presencia de metales pesados en los arroyos no es únicamente atribuible a la actividad minera. Existen factores edafológicos propios de las zonas altoandinas que contribuyen significativamente a la reducción del pH y consecuentemente al incremento de metales pesados. Los metales pesados, dentro de los seres vivos, generan problemas fisiológicos en los organismos acuáticos, como daño a los sistemas fisiológicos, reduciendo su capacidad para sobrevivir y reproducirse. Lo que puede provocar la desaparición de poblaciones que en caso de ser especies clave, alteran los sistemas ecológicos.

Los seres humanos pueden verse gravemente afectados por la presencia de metales pesados en los recursos hídricos. Caso de que dichos arroyos son empleados para el consumo, la agricultura y otras actividades productivas, donde el riesgo sobre la salud se incrementa significativamente. La ingesta de agua contaminada con metales pesados es causa de diversas enfermedades crónicas y agudas, como trastornos renales, daños al sistema nervioso central, problemas gastrointestinales, e incluso cáncer, dependiendo de los metales presentes y sus concentraciones.

En este contexto, dada la creciente preocupación por el incremento del riesgo derivado de los efectos del cambio climático que está relacionado con la presencia de los metales pesados y en desmedro de los ecosistemas y la salud humana, es urgente establecer medidas que nos permita conocer a detalle dicha realidad. Por ello, es de urgencia la investigación mediante monitoreos

determinar la distribución espacial de estos contaminantes en los arroyos altoandinos. Es el caso de la cuenca del río Cachi, principalmente la cabecera, ubicada en el departamento de Ayacucho, es un área crítica por la presencia de suelos que predisponen a la acidificación del agua; además que alimentan cuerpos de agua lóticos que abastecen a comunidades humanas. Determinar el comportamiento de los metales pesados en el agua de arroyos de primer orden, en las estaciones del año (lluvia y seca) permitirá comprender mejor la magnitud del problema y sus posibles soluciones.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo se distribuye los metales pesados espacial y temporalmente en el agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024?

1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024?
- b. ¿Cuál es la distribución espacial de metales pesados en el agua, según el orden, en arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024?
- c. ¿Cuál es la relación de la concentración de metales pesados con las características hidromorfológicas (altitud, estación del año y caudal), de

arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024?

1.3. Alcance y limitaciones

1.3.1. Alcances

La investigación se circunscribe a los siguientes puntos de ejecución y análisis:

- a. **Ámbito geográfico:** El estudio abarca exclusivamente la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho, enfocándose en siete arroyos ubicados en un gradiente altitudinal que va desde los 3743 hasta los 4718 msnm.
- b. **Delimitación temática:** Se centra en la caracterización física y química del agua superficial, evaluando parámetros como pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza y sulfatos, además de la concentración de nueve metales específicos: aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc.
- c. **Enfoque geoquímico:** El alcance principal es determinar la influencia del Drenaje Ácido de Roca (DAR) de origen natural sobre la calidad del agua, diferenciándolo de posibles impactos antropogénicos.
- d. **Variabilidad Temporal:** La investigación alcanza a comparar el comportamiento de los contaminantes en dos periodos estacionales definidos del año 2024: marzo (época húmeda) y julio (época seca), lo que permite identificar el efecto de dilución por precipitaciones.

- e. Nivel de investigación: El estudio tiene un alcance descriptivo y correlacional, estableciendo la relación estadística entre la altitud, el caudal y la presencia de metales pesados en el ecosistema lótico.

1.3.2. Limitaciones

A pesar del rigor metodológico, la investigación presenta las siguientes restricciones:

- a. Frecuencia de muestreo: Debido a la naturaleza transversal del diseño, los datos representan capturas puntuales en dos meses específicos (marzo y julio), lo que podría no reflejar variaciones climáticas atípicas o eventos hidrológicos extremos fuera de esos periodos.
- b. Extensión geográfica: Los hallazgos son representativos de la zona alta de la cuenca del río Cachi y no pueden extrapolarse de manera general a toda la cuenca media o baja, ni a otras cabeceras de cuenca con litologías distintas en la región.
- c. Determinaciones químicas: Aunque se tamizaron 49 metales inicialmente, el análisis detallado y la comparación con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) se limitaron a aquellos con resultados numéricos por encima del límite de detección del laboratorio contratado.
- d. Factores externos: La accesibilidad a los puntos de muestreo estuvo supeditada a la proximidad de la Vía Los Libertadores, lo que limitó la exploración de arroyos más remotos que podrían presentar condiciones geoquímicas diferentes.

- e. Variabilidad Climática: La incertidumbre en la intensidad y frecuencia de las lluvias, derivada del cambio climático, representa una limitación para predecir el comportamiento futuro de los arroyos temporales evaluados

1.4. Variables e indicadores

1.4.1. Dependiente

a. Metales pesados en el agua

Dimensión e indicadores

- Aluminio
- Arsénico
- Hierro
- Manganeso
- Zinc
- Plomo
- Mercurio
- Otros metales pesados.

1.4.2. Independiente

a. Arroyos altoandinos

Dimensión e indicadores

- Orden del arroyo.
- Características hidromorfológicas (Caudal, profundidad máxima, ancho de cauce, altitud)

1.4.3. Interviniente

Características fisicoquímicas

- Conductividad eléctrica
- Sólidos disueltos totales
- Turbidez
- pH
- Oxígeno disuelto
- Dureza total

- Cloruro

1.5. Operacionalización de las variables

VARIABLE	DIMENSION	INDICADORES	UNIDAD O CATEGORÍAS DE MEDIDA	ESCALA DE MEDICIÓN	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
Metales pesados	Metales pesados	Aluminio	mg/L	Razón	Espectrofotómetro de llama
		Arsénico	mg/L	Razón	Espectrofotómetro de llama
		Hierro	mg/L	Razón	Espectrofotómetro de llama
		Manganeso	mg/L	Razón	Espectrofotómetro de llama
		Zinc	mg/L	Razón	Espectrofotómetro de llama
		Plomo	mg/L	Razón	Espectrofotómetro de llama
		Mercurio	mg/L	Razón	Espectrofotómetro de llama
		Otros metales pesados	mg/L	Razón	Espectrofotómetro de llama
Arroyos altoandinos	Orden de arroyo	Orden del arroyo	1ro y 2do	Nominal	Mapa
	Características morfohidrológicas	Caudal	L/seg	Razón	Método del flotador
		Profundidad máxima	mg/L	Razón	Regla graduada
		Ancho de cauce	mg/L	Razón	Distanciómetro
		Altitud	msnm	Razón	GPS navegador
Características fisicoquímicas	Características fisicoquímicas	Conductividad eléctrica	US/cm	Razón	Multiparámetro
		Sólidos disueltos totales	ppm	Razón	Multiparámetro
		Turbidez	NTU	Razón	Multiparámetro
		pH		Razón	Multiparámetro
		Oxígeno disuelto	mg/L	Razón	Multiparámetro
		Dureza total	mg/L	Razón	Titulación
		Cloruro	mg/L	Razón	Titulación
		Nitrato	mg/L	Razón	Espectrofotómetro
		Fosfato	mg/L	Razón	Espectrofotómetro

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Evaluar la distribución de los metales pesados, espacial y temporalmente, en el agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024

1.6.2. Objetivos específicos

- a. Evaluar las características fisicoquímicas del agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024.
- b. Estimar la relación de la concentración de metales pesados con las características hidromorfológicas (altitud, estación del año y caudal) de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024.
- c. Determinar la distribución espacial de metales pesados en el agua según el orden de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024.

1.7. Justificación

La alta concentración de metales pesados en los arroyos de cabecera de cuenca es una amenaza significativa para la biodiversidad y la salud humana. Los metales pesados pueden bioacumularse en los organismos acuáticos, provocando toxicidad que afecta su supervivencia y reproducción. Este fenómeno, a su vez, puede reducir la biodiversidad y alterar las funciones ecológicas de los arroyos, comprometiendo la resiliencia de los ecosistemas.

Por lo que es necesario conocer la concentración de metales pesados en los arroyos que son afluentes de cuerpos de agua de mayor volumen, que muchos de ellos abastecen la necesidad de poblaciones humanas. También se debe considerar las características fisicoquímicas en el monitoreo de aguas, ya que se ha determinado que el pH y la conductividad, influyen en la movilidad y

la toxicidad de los metales pesados. Un pH bajo, por ejemplo, puede aumentar la solubilidad de los metales pesados, haciéndolos más bioaccesibles y tóxicos para los organismos acuáticos.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

La distribución de los metales pesados, varía espacial y temporalmente en el agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024

1.8.2. Hipótesis específicas

- a. Las características fisicoquímicas del agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi varían significativamente en el departamento de Ayacucho durante el año 2024.
- b. La distribución espacial de metales pesados es varían significativamente en el agua según el orden de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024.
- c. Existe relación significativa entre la concentración de metales pesados con las características hidromorfológicas de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el año 2024.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

De acuerdo al análisis de información hallada, la gran mayoría de los trabajos de investigación abordan la temática de metales pesados en el agua de sistemas lóticos, como consecuencia de la contaminación generada por el hombre. Se aprecia que la principal actividad humana causante, es la minería, así como la industrial; mientras que, investigaciones que hacen referencia a causas naturales, como por ejemplo las características edafológicas, es muy reducida.

2.1.1. Internacional

La investigación se llevó a cabo en las cuencas de la parte alta de Madeira (Bolivia), centrándose en el río Beni y sus afluentes. Este estudio tuvo como objetivo principal investigar las fuentes de mercurio (Hg) en las aguas superficiales en relación con las actividades humanas y las formaciones geológicas naturales. Se colectaron muestras durante diferentes períodos estacionales en las que se determinaron las concentraciones totales de Hg. También se consideró diferenciar los ríos según los diferentes niveles de explotación de oro aluvial. Dentro de los principales hallazgos, resalta que las concentraciones del mercurio variaron significativamente, con un máximo de 1600 ng/l durante el período de aguas altas, particularmente en los ríos afectados por la actividad humana. Este estudio llegó a la conclusión de que tanto las fuentes naturales, como la presencia de lutitas negras que presenta un alto contenido de mercurio, como las actividades antropogénicas, son

determinantes en la presencia de mercurio en los ríos (Maurice-Bourgoin et al., 2003).

El drenaje ácido de minas (DAM) ha sido durante años una consecuencia nociva de la minería de minerales sulfurados. En la mayoría de los casos, este fenómeno se origina principalmente por la oxidación del sulfuro de hierro, que suele estar presente junto con metales de interés económico. El DAM es un problema global que ocasiona graves daños ecológicos en cuencas hidrográficas y contamina fuentes de agua para consumo humano con ácido sulfúrico y metales pesados como arsénico, cobre y plomo. Eslovaquia es uno de los países con una sólida tradición minera, destacándose en la extracción de hierro, cobre, oro, plata y otros minerales polimetálicos. Por ejemplo, en una mina abandonada donde todavía se genera DAM con caudales entre 5 y 10 L/s y un pH de 3,7 a 4,1, confluye a un arroyo, lamentablemente deteriora la calidad del agua y con la consecuente afectación del ecosistema. La presencia de lluvias incrementa el caudal del arroyo, que varía entre 0,3 y 2,0 m³/s, lo que está relacionado con cambios en el pH y la precipitación de metales (Fe, Al, Cu y Zn), lo que favorece su acumulación en los sedimentos (Bálintová et al., 2019).

La investigación se llevó a cabo en el área de la mina de Aljustrel, del Cinturón Pirítico Ibérico (IPB). Tuvo como objetivo evaluar el impacto ambiental del drenaje ácido de las minas (AMD) en las aguas superficiales, en los sedimentos de los arroyos y el macrófito *Scirpus holoschoenus* L. Para el cual se colectaron muestras de agua superficial, sedimentos y macrófitos en los arroyos Agua Forte y Roxo, tanto río arriba como río abajo. Los

resultados revelaron que el agua superficial y los sedimentos del arroyo Agua Forte eran extremadamente ácidos, con valores de pH que oscilaban entre 2,22 y 2,92 para el agua y entre 2,57 y 3,32 para los sedimentos. Se detectaron altas concentraciones de arsénico, cobre, plomo y zinc; así mismo las evaluaciones ecotoxicológicas mostraron altos niveles de toxicidad en el agua, mientras que la planta acuática demostró tener bajos factores de bioacumulación (Alvarenga et al., 2021).

El artículo de investigación de revisión, cuyo objetivo es determinar el impacto del cambio climático en la generación de drenaje ácido de minas (AMD) y el transporte de contaminantes en los ecosistemas acuáticos, particularmente en las áreas mineras áridas y semiáridas. Resalta que, es importante comprender las reacciones geoquímicas relacionadas con los residuos mineros. La metodología incluyó una revisión de la literatura existente para resumir los efectos del cambio climático en la generación de AMD, la calidad del agua y el transporte de contaminantes en las cuencas hidrográficas. Dentro de los principales resultados, señalan que el cambio climático influye en la oxidación de los minerales que contienen azufre y en la hidrólisis de los productos de oxidación, lo que lleva a la producción de DMAE y la solubilización de metales tóxicos. Finalmente destaca que, existe la necesidad de emplear varios modelos de transporte reactivo para simular los efectos del cambio climático en la oxidación de sulfuros y la producción de DMAE, que son cruciales para la eficacia de las técnicas de remediación en los entornos mineros (Anawar, 2013).

La investigación se llevó a cabo en la cuenca del río Snake, ubicada en las Montañas Rocosas del oeste de los Estados Unidos. Se centró en los impactos del cambio climático en la calidad del agua, particularmente en relación con el drenaje ácido de las minas (AMD) y la movilización de elementos de tierras raras (REE). Se analizaron muestras de agua de arroyos para determinar el pH y las concentraciones de metales en solución, así como en evaluar la distribución de los REE en el agua y su acumulación en los invertebrados bentónicos. Los principales resultados indicaron que las concentraciones de REE en los arroyos oscilaban entre 1 y 100 µg/L, y que los aumentos a lo largo del tiempo se correlacionaban con el aumento de la temperatura ambiental en verano. Concluyen que, la intensificación de los procesos de erosión, impulsada por el cambio climático, está contribuyendo a la movilización de los REE y consecuentemente degradar la calidad del agua en la cuenca hidrográfica, lo que pone de relieve las consecuencias ambientales de las actividades mineras históricas (Rue & McKnight, 2021).

En suelos donde existe la pirita (FeS_2) y con presencia de oxígeno y agua, se degrada por reacción de oxidación (química y biológica) y procesos de disolución, produciendo sulfato (SO_4^{2-}), hierro (Fe^{2+}) e hidrógeno (lo que causa una disminución abrupta del pH). El hierro (Fe^{2+}) producido por la oxidación de la pirita, se oxida rápidamente en hierro férrico que se une con hidrógeno para formar hidróxidos de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) que son tóxicos. Este proceso libera y arrastra metales desde las cabeceras de cuencas hasta los diferentes cuerpos de agua. Asimismo, el sulfato reacciona con el hidrógeno

del agua y produce ácido sulfúrico (H_2SO_4) que también es tóxico para la vida acuática (Zimmer et al., 2018).

Los efectos del cambio climático actualmente se están observando, en diferentes aspectos a nivel mundial. Uno de dichos aspectos, poco abordados, sobre su efecto sobre la calidad de agua como consecuencia de la pérdida de la cubierta glaciar. Con los cambios globales del clima, muchos glaciares han ido gradualmente retrocediendo dejando expuestos depósitos minerales como el sulfuro de hierro (pirita), dejándolos expuestos a la acción del agua y el oxígeno. Lo que ha determinado la generación de drenaje ácido de rocas (DAR), que se ha convertido en un problema que afecta gravemente la calidad del agua en las cabeceras de cuenca, consecuentemente a afectando la cuenca media y baja. Este drenaje ácido ha sido atribuido muy frecuentemente a la actividad minera. Por otro lado, al alterarse significativamente las precipitaciones, han determinado el aumento o disminución de los niveles de agua superficial o subterránea, factor determinante en la generación de drenaje ácido de rocas (Downing & Jacobs, 2014).

La generación de ácido sin la influencia antropogénica de la minería es denominada en la literatura frecuentemente como drenaje ácido de roca (DAR); mientras que drenaje ácido de mina (DAM) a aquello que se origina en los lugares donde se practica la minería. En ambos casos dichos drenajes han devastado ríos, arroyos y vida acuática. Un ejemplo de este efecto negativo se observó como consecuencia de la extracción de molibdeno en la mina Questa en Nuevo México, que afectó negativamente la biota acuática a lo largo de 8 millas del Río Rojo. Los procesos que generan los DAR y DAM,

se hallan asociados a la oxidación de compuestos sulfurados y la generación de ácido, lo que facilita la movilización de metales. El proceso detallado no solamente ocurre en la superficie del suelo, también a el agua subterránea (Jacobs, 2014).

La explotación de carbón y recursos minerales metálicos en todo el mundo genera grandes cantidades de materiales que contienen cantidades significativas de minerales sulfurados como esfalerita, calcopirita, galena y otros. Es frecuente que estén asociados con la pirita (sulfuro de hierro), una forma de sulfuro que es más abundante en la corteza terrestre. Dichos materiales son la presencia de agua y oxígeno durante las operaciones mineras y el procesamiento de minerales, se oxidan química y bioquímica, produciendo lixiviados altamente ácidos y cargados de metales, comúnmente conocidos como drenaje ácido de roca (DAR) o drenaje ácido de minas (DAM). La producción de DAR, ocurre sin que necesariamente se de actividad minera, cuando los compuestos sulfurados se hallan próximos a la superficie terrestre o incluso son alcanzado por agua que se percola a capas inferiores de la corteza terrestre y vuelve a emerger. El drenaje ácido de rocas sin tratamiento contamina gravemente grandes extensiones de tierra, así como recursos hídricos superficiales y subterráneos. La gravedad del problema ha impulsado importantes esfuerzos de investigación en busca de soluciones (Egiebor & Oni, 2007).

La generación de drenaje ácido de roca (DAR) libera diversos compuestos químicos, como el ácido sulfúrico, lo que disuelve grandes cantidades de metales pesados. Este proceso reduce el valor del pH del agua a niveles entre

1,5 y 5. En algunos casos, la presencia del ion férrico (Fe^{3+}) se manifiesta por una coloración café-rojiza, mientras que la presencia del ion ferroso (Fe^{2+}) de color azul verdoso. Cuando las corrientes de aguas ácidas se mezclan con aguas no ácidas, los óxidos de hierro suelen precipitar, haciendo que los sedimentos finos, arena y grava (cantos rodados) del arroyo se cubran con capas superficiales oxidadas de color café-rojizo. Los procesos naturales de drenaje ácido de roca afectan la calidad del agua, el suelo y los ecosistemas donde ocurren, y estos impactos pueden extenderse aguas abajo (Montano et al., 2022).

La contribución del agua subterránea al caudal de las corrientes de montaña, representa una importante fuente para arroyos de alta montaña. Realizaron una revisión de literatura para tener generar información sobre la importancia de aguas subterráneas de alta montaña (muy alta, alta y media). Mediante trazadores y balance hídrico, se demuestra que el agua subterránea contribuye sustancialmente al caudal en muchas cuencas de alta montaña, principalmente en períodos de bajo caudal (falta de lluvia). La recarga de los acuíferos de alta montaña proviene de una combinación de infiltración por lluvia y deshielo de glaciares. Resaltan que, los conocimientos respaldan la importancia del agua subterránea de alta montaña, como un medio resiliente, al menos temporalmente, frente a la pérdida de glaciares y mantos nivosos generada por el cambio climático. Si embargo, se tiene escasez de datos de campo y la heterogeneidad de los paisajes de elevada altitud son desafíos importantes (Somers & McKenzie, 2020).

2.1.2. Nacional

La investigación se llevó a cabo en la Cordillera Blanca (Ancash, Perú), durante los años 2010 y 2011, abarcó arroyos ubicados a altitudes entre 3000 y 4000 metros sobre el nivel del mar. Se colectaron muestras de macroinvertebrados bentónicos con una red Surber, adicionalmente se determinaron variables ambientales, como el pH, la temperatura y las concentraciones de metales. Se efectuó análisis de correspondencia canónica con la finalidad de para evaluar la influencia de la altitud y la contaminación por metales en la composición de la comunidad. Los principales resultados indicaron mucho de los arroyos evaluados presentaban agua con altas concentraciones de metales y un pH bajo, lo que determinó una reducción significativa de la abundancia y diversidad de los taxones sensibles dentro de los macroinvertebrados. Dicho estudio concluye que la lixiviación de metales se facilita por la presencia de las rocas ígneas y las condiciones de altitud extrema, lo que son determinantes en la reducción de la diversidad dentro de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos en los arroyos andinos estudiados, sin embargo, favorecen a los taxones especializados que en condiciones ambientales adversas (Loayza-Muro et al., 2014).

En otra investigación se llevó a cabo en una zona altoandina de Amazonas en Perú, abarcando cinco microcuencas hidrográficas: Cabildo, Timbambo, Pomacochas, Atuen y Ventilla, durante la estación seca (octubre de 2017) y la estación húmeda (marzo de 2018). La metodología consistió en determinar la calidad de agua en una dimensión espacio-temporal, para ello se determinaron características fisicoquímicas, metales y metaloides mediante

espectrometría de emisión atómica. Dentro de los principales hallazgos determinaron que el arsénico estaba presente en todas las microcuencas estudiadas, además de plomo. Destacan que las concentraciones de arsénico, cadmio, plomo y hierro presentaban riesgos según las regulaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y superaban las normas peruanas, especialmente para agua potable, consumo de animales y riego de vegetales. Las elevadas concentraciones de los metales, fueron atribuidos a una combinación de factores geológicos naturales y actividades ganaderas. Por ello a modo de conclusión, enfatizan la necesidad de estrategias eficaces de gestión de los recursos hídricos y prevención de la contaminación (Leiva-Tafur et al., 2024).

La investigación se llevó a cabo en los ríos pertenecientes a cuatro cuencas hidrográficas: Chili-Quilca, Tambo, Camana-Majes-Colca y Ocoña, ubicadas en Arequipa, durante los años 2019 a 2020. Se priorizó la cuantificación de la dinámica estacional de 34 elementos. Hallaron que en el agua de los ríos están presentes en concentraciones relativamente altas bario, arsénico, hierro, aluminio, manganeso, fósforo, plomo y níquel. La cuenca del Tambo presentó los niveles más alto de metales, seguida de Chili-Quilca, Camana-Majes-Colca y Ocoña. Por otro lado, caudales determinados por las estaciones del año influyeron significativamente en las concentraciones de veinte metales traza, donde la mayoría presentaron mayores concentraciones durante la estación húmeda, mientras que otros lo fueron en la estación seca (Ccanccapa-Cartagena et al., 2023).

En la cuenca del río Jequetepeque (Perú), se recolectaron muestras de agua en seis estaciones de monitoreo durante las épocas de lluvia y estiaje, totalizando 12 muestras. Estas muestras se analizaron para identificar la presencia de metales pesados, comparándolas con los límites establecidos en los Estándares de Calidad de Agua (D.S. N°015-2015-MINAM) para aguas superficiales categoría 3, que incluyen usos como el riego de cultivos (tallo alto y bajo) y el consumo animal. En mayo, durante la temporada de lluvias, se detectaron concentraciones de arsénico en dos puntos de muestreo (0,001 mg/L y 0,003 mg/L), cadmio en cinco puntos (0,001 mg/L en todos) y plomo en dos puntos (0,004 mg/L y 0,007 mg/L). En noviembre, durante el estiaje, se observó un ligero aumento en las concentraciones de arsénico en tres sitios (0,004 mg/L, 0,005 mg/L y 0,006 mg/L), mientras que los niveles de plomo mostraron una leve disminución, registrándose valores de 0,003 mg/L y 0,004 mg/L (Izquierdo & Verástegui, 2017).

Determinaron metales pesados en sedimentos y aguas del río Piñog (Arequipa, Perú), obteniendo muestras en época seca y de lluvias. Para las determinaciones emplearon el método de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Lo hallarlo evidenciaron que, tanto en la temporada seca como húmeda, las concentraciones de los metales pesados no excedieron los valores de referencia estándares de las ECAs agua en la categoría 3 (riego de verduras y bebida de animales), exceptuando arsénico, que registró valores mayores a 0,1 mg/L en la época seca. En la temporada de inundaciones, todos los parámetros estuvieron dentro de los estándares y límites establecidos. Concluyen que la concentración de metales pesados en

el río, no es superior a los valores referenciales de las ECAs agua (Choque & Estremadoyro, 2024).

Mencionan que la contaminación por metales pesados en aguas superficiales cerca de proyectos mineros en los Andes representa un riesgo para los ecosistemas acuáticos y plantea un desafío para las agencias reguladoras. Por ello evaluaron los riesgos ecológicos asociados a la contaminación por metales pesados en diferentes niveles tróficos (microalgas, zooplancton, invertebrados bentónicos y peces) en 283 estaciones de monitoreo empleando informes de Evaluación Ambiental Temprana (EEA) del OEFA-Perú (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental) para analizar las concentraciones de metales disueltos (Fe, Cu, Zn, Mn y Pb) durante las estaciones seca y húmeda. El riesgo individual (RI) se estimó mediante el modelo del cociente, mientras que el riesgo total (TR) se evaluó mediante la regla de probabilidad aditiva. La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), que representa el nivel trófico T3, mostró la mayor sensibilidad al Fe y al Cu. Las pruebas estadísticas clasificaron el IR como $Fe > Cu > Zn > Mn > Pb$ ($p < 0,01$). El riesgo total (TR) fue más prevalente durante la estación húmeda en comparación con la estación seca ($p < 0,01$). Alrededor del 50 % de las estaciones de monitoreo ($n = 142$) fueron clasificadas como de alto riesgo, y el 9 % ($n = 13$) mostraron valores de riesgo extremadamente alto para Cu y Fe (Moreno-Aguirre et al., 2024).

En la subcuenca de Quillcay (tributario del río Santa) abastecedor de agua de la ciudad de Huaraz, se realizó un trabajo de investigación con la finalidad de determinar la calidad de agua y de sedimentos e identificar las fuentes de

contaminación. Se establecieron siete zonas de muestreo que abarcaron ríos y lagunas. Se halló diferencias importantes en la calidad de agua al comparar los lugares sin y con impacto por los DAR, los primeros un pH del agua próximo a la neutralidad con niveles bajos de conductividad eléctrica, así como de metales. Por el contrario, el agua de los lugares impactados directamente por los DAR, fueron más ácidos, con mayor conductividad y metales pesados (el aluminio, hierro, manganeso, arsénico, cadmio y cromo excedieron los estándares de calidad ambiental del agua (Loayza, 2014).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Los sistemas fluviales altoandinos

Los sistemas fluviales altoandinos son ríos que se hallan en cuencas hidrográficas que se encuentran en las zonas altas de la cordillera de los Andes, abarcando áreas de gran altitud en América del Sur. Se hallan principalmente en Perú, Ecuador, Bolivia y partes de Colombia, Chile y Argentina y se hallan por encima de los 2 000 msnm, recorriendo valles estrechos y profundos, frecuentemente con pendientes pronunciadas, sus nacientes se alimentan de deshielo, precipitación pluvial y fuentes de agua subterránea de los Andes. Estos ríos atraviesan ecosistemas tan diversos como los pajonales y turberas de las zonas más altas de la cordillera, hasta los bosques montanos y las selvas tropicales de la llanura amazónica. Además, drenan un paisaje con una geología extremadamente dinámica, caracterizada por volcanes activos, fallas geológicas y una historia reciente de procesos glaciares (Encalada et al., 2019).

Dichos sistemas son fundamentales para el suministro de agua tanto para las poblaciones locales como para los ecosistemas circundantes, ya que alimentan a las tierras bajas y proveen agua para la agricultura, el consumo humano y la generación de energía hidroeléctrica. Además, presentan una gran biodiversidad y albergan ecosistemas únicos y adaptados a las condiciones extremas de altitud (Domínguez & Vega, 2015).

Pese que los sistemas fluviales altoandinos prestan importantes servicios ambientales, están sujetos a presiones y desafíos significativos, como la variabilidad climática, la alteración por actividades humanas como la minería, la agricultura y la urbanización (Maldonado, 2018)

2.2.2. Características fisicoquímicas de los ríos altoandinos

Se refiere a propiedades físicas y químicas que se derivan de compuestos y partículas que se hallan en solución o suspensión en el agua, el que puede variar determinado por factores, como la geología local, el clima, la altitud y por actividades humanas (Dudgeon, 2011). Por lo general la turbidez es mínima, ya que sus aguas provienen de deshielo de glaciares, fuente subterránea y precipitación pluvial. La conductividad eléctrica es baja, influenciada por el agua de origen pluvial, además de que debido a que su recorrido es relativamente corto, aún no ha incorporado por solución componentes del suelo que recorre (Roldán Pérez, 1992). La concentración de oxígeno disuelto es alta, debido a la gran turbulencia en sus aguas que circulan por pendientes elevadas, así como el contenido de nutrientes (fosfatos y nitratos), es bajo, incluso inexistente (Arroyo & Cavieres, 2013). Sin embargo, dichas características pueden variar según la ubicación

geográfica del río, la altitud, la temporada y la influencia de actividades humanas como la minería, la agricultura y la urbanización.

Un aspecto importante a tomar en cuentas es que en zonas altoandinas es frecuente la presencia de manantes que contribuyen con agua a los sistemas fluviales, dichas agua puede tener un pH sumamente ácido y está relacionada a la presencia de rocas con minerales sulfurados (La Matta, 2020). Dichas aguas ácidas con presencia de diferentes metales pesados es producto de la meteorización y reacciones bioquímicas con la presencia de agua y oxígeno (Egiebor & Oni, 2007). Debido a la acción biótica y abiótica el agua de los manantes que circulan por un lecho con compuestos de azufre, libera diferentes compuestos químicos, como el ácido sulfúrico, solubilizando cantidades importantes de metales pesados, lo que conlleva a la disminución del pH del agua entre 1,5 a 5 (Jacobs et al., 2014).

2.2.3. Servicios ambientales de los ríos andinos

Los ríos andinos, que nacen y discurren desde las altas cordilleras en diferentes direcciones, proporcionan una amplia variedad de servicios ecosistémicos, que son esenciales para el hombre y ecosistemas que atraviesan. Dentro de los principales tenemos (Santos & López, 2015; Stevenson & Sabater, 2010):

a. Servicios de Aprovechamiento

- Proveen agua para consumo humano, riego agrícola, ganadería e industrias.

Son fuentes cruciales de agua potable para muchas comunidades.

- Provee proteína proveniente de peces y otros recursos biológicos importantes para la dieta de las poblaciones locales.
- Proveen material de construcción bajo la forma de arena, grava y piedra gruesa, empleado en la construcción y otros usos locales.
- A partir de la fuerza que presenta (flujo del agua), se genera energía hidroeléctrica que es indispensable para el desarrollo económico de la sociedad humana

b. Servicios de Regulación

- Controla minimiza las inundaciones, ya que absorbe y distribuir el agua durante las temporadas de lluvia.
- Actúan como filtros naturales que eliminan sedimentos y contaminantes, mejorando la calidad del agua que fluye hacia las zonas bajas.
- Regulación del ciclo hidrológico, ya que contribuye con la recarga de acuíferos y a la regulación del flujo de agua.
- Regula el clima local, influyen en la temperatura ambiental y la humedad, generando microclimas que benefician la biodiversidad y las actividades humanas.

c. Servicios de Soporte

- Como medios acuáticos, proveen un espacio físico (hábitat) para que sean ocupados por una gama amplia de biodiversidad, como aves, peces, anfibios, insectos, entre otros, muchos de las cuales son endémicas de la región andina.

- Facilitan la descomposición de materia orgánica y el ciclaje de nutrientes esenciales contribuyendo con los ciclos biogeoquímicos.

d. Servicios Culturales

- Como lugares de recreación y turismo, ofrecen oportunidades para actividades recreativas como pesca, senderismo, observación de aves, entre otros, por lo que se constituyen como potenciales atractivos para turistas.
- Valores estéticos, ya que contribuye de manera determinante a paisajes naturales otorgándoles gran belleza, por lo mismo son valorados por su impacto visual y emocional.
- Culturales y espirituales, ya que los ríos, tienen un significado cultural, histórico y espiritual para comunidades indígenas y locales asentadas en lugares próximos al cauce. Incluso son sitios donde se llevan a cabo ceremonias tradicionales, por lo que son considerados como patrimonio cultural.
- Educación e investigación, como lugares para la educación ambiental y la investigación científica en ecología, hidrología y conservación.

2.2.4. Influencia edafológica en las características físicas y químicas del agua superficial

Las características del suelo por donde circulan o se hallan los cuerpos de aguas superficiales, son determinantes en sus características físicas, químicas y consecuentemente para las biológicas. El agua como solvente universal, incorpora por solución sales y minerales del suelo, lo que influye sobre sus

propiedades físicas y químicas los que son condicionantes para las comunidades que se hallan en ella, en la presencia o ausencia de poblaciones y fundamentalmente en sus abundancias (Molles, 2006; Smith & Smith, 2015).

Existen factores fundamentalmente asociados a las características edafológicas que influyen de manera determinante sobre las características del agua. Uno de ellos es la presencia de drenaje ácido de roca (DAR), es un proceso geoquímico natural que hace que el pH de las aguas descienda a niveles bastante bajos, como consecuencia de ello incorpora metales pesados en los cuerpos de agua, estos procesos ocurren particularmente en las cabeceras de los sistemas fluviales. Este fenómeno se caracteriza por la formación de agua ácida cuando los minerales de sulfuro, comúnmente encontrados en ciertas formaciones geológicas, se exponen al aire y al agua, lo que lleva a la producción de ácido sulfúrico. Si bien el DAR puede ocurrir de forma natural, su prevalencia e intensidad se ven significativamente amplificadas por las actividades humanas, especialmente la minería, lo que resulta en lo que a menudo se denomina drenaje ácido de mina (DAM). Comprender la distinción entre estas formas naturales y antropogénicas de DAR es crucial para evaluar el alcance del problema y desarrollar estrategias de gestión efectivas en la región andina.

Las cabeceras de los ríos andinos son particularmente susceptibles al DAR debido a las características geológicas inherentes de la región. La cordillera de los Andes es rica en minerales que contienen sulfuro, lo que hace que las cabeceras de sus ríos sean naturalmente propensas a los procesos de DAR.

Además, las actividades mineras están muy extendidas en estas áreas de gran altitud, lo que aumenta aún más el riesgo de DAR y sus efectos perjudiciales en la calidad del agua y los ecosistemas.

Un factor adicional y cada vez más significativo que contribuye al DAR en las cabeceras andinas es el retroceso glaciar, una consecuencia directa del cambio climático. A medida que los glaciares retroceden, exponen rocas ricas en sulfuro previamente cubiertas a la intemperie, lo que acelera el proceso natural de DAR y libera metales en los prístinos entornos de las cabeceras. La confluencia de estos factores, como un entorno geológicamente predispuesto, extensas operaciones mineras y los impactos del cambio climático, crea una situación única y desafiante donde los ríos altoandinos presentan características físicas y químicas que son preocupantes, por su efecto negativo sobre la biodiversidad y para el hombre. Esto determina que la gestión del DAR debe ser abordado de manera inmediata para evitar o minimizar los efectos negativos en ecosistemas andinos como ríos y lagunas.

2.3.5. Drenaje Ácido de Roca (DAR)

El drenaje ácido de roca (DAR) es un fenómeno natural y complejo que está relacionado con la presencia de rocas que contienen minerales sulfurados. Se diferencia del drenaje ácido de minas (DAM) en que este último se produce exclusivamente asociado a la actividad minera. Dicho proceso implica la formación de soluciones bastante ácidas que contienen diversos metales pesados, resultado de la meteorización y reacciones bioquímicas en presencia de agua y oxígeno.

El agua actúa como un agente oxidante que lixivia y arrastra los minerales presentes en las rocas durante su curso desde la alta montaña. Cuando los minerales de sulfuro entran en contacto con el agua y el hielo, se producen reacciones químicas naturales que generan niveles ácidos en cuanto al pH. Factores como la presencia de minerales de sulfuro, oxígeno, temperatura y agua favorecen la generación de DAR, donde el pH, la temperatura, las bacterias acidófilas y el Fe^{3+} , afectan la tasa de oxidación.

La contaminación natural causada por el DAR es un proceso que altera las fuentes de agua y los ecosistemas circundantes, como un proceso de origen natural, tal como ocurre en las quebradas Pacchac y Pucauran en Huaraz, Ancash, donde la presencia de metales pesados en el agua data desde hace mucho tiempo como consecuencia de la presencia de pasivos ambientales y de la mineralización natural que contiene alta carga metálica.

Dentro de las principales características que presenta el DAR, se tiene:

- **pH ácido:** En cuerpos de agua afectado por este fenómeno, se han reportado valores de 2.85 y 4.45. Dichos valores indicarían un predominio de piritita sobre otros sulfuros y la influencia del clima xerofítico de dicha región. En climas áridos, los drenajes ácidos de rocas tienden a ser más ácidos y metalíferos debido a los efectos del aumento de la evaporación y la disminución del potencial de dilución por aguas no mineralizadas.
- **Contenido de Metales y Elementos Químicos:** Las aguas de DAR pueden contener diferentes metales pesados y otros elementos, siendo común la presencia de hierro, manganeso y aluminio. Sin embargo, la presencia de las

especies metálicas y sus concentraciones varían, no solo consecuencia directa de las características del componente edafológico, sino de aportes hidrotermales

- **Características Visuales y Físicas:** Las rocas afectadas por alteración hidrotermal pueden mostrar colores amarillo-rojizos debido a la oxidación de minerales sulfurados. En áreas de los arroyos afectados por los DAR, es común observar una capa de precipitados de fondo color ocre. La elevada evaporación en climas áridos favorece la formación de sales solubles sulfato-metálicas que pueden transformarse en fases más estables como ocre de hierro. Estos pueden cementar sedimentos aluviales y fluviales, dando lugar a la formación de ferricretas (conglomerados ferruginosos).

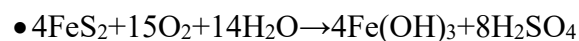
a. Factores determinantes para la generación del DAR

- **Minerales sulfurados**

Factor fundamental es la presencia de rocas que contienen compuestos sulfurados. La pirita se destaca como el mineral de sulfuro más abundante y común en muchas rocas, siendo el de mayor relevancia para la generación de DAR por su concentración, tamaño de grano y distribución. Se debe tomar en cuenta que no todos los minerales de sulfuro generan acidez al oxidarse.

- **Oxígeno**

La pirita (disulfuro de hierro) que es común en vetas de cuarzo, como en depósitos de carbón, y en ambientes sedimentarios, ígneos y metamórficos, al ser expuesta al oxígeno del aire y al agua, se generan ácidos, principalmente ácido sulfúrico (H_2SO_4), la fórmula general para dicha reacción es:



- **Agua**

Los minerales sulfurosos al estar expuestos a agua (lluvia, nieve derretida o agua subterránea), generan una disolución de los iones de azufre y hierro. Es decir que, el agua actúa como un disolvente del oxígeno además del mineral permitiendo que entren en contacto. Adicionalmente, el agua actúa como un medio de transporte del ácido generado y los contaminantes asociados

- **Temperatura**

La oxidación de la pirita, se acelera significativamente con el aumento de la temperatura del entorno. Por ello a temperaturas más altas, las moléculas de agua y oxígeno se movilizan más rápidamente, lo que facilita su interacción con los sulfuros y acelera las reacciones químicas. En ambientes fríos, como en regiones de gran altitud o zonas frías, el proceso de oxidación será más lento.

- **Bacterias**

El proceso inicial del DAR comienza cuando los minerales de sulfuro se exponen al oxígeno y al agua, oxidándose y liberando iones de hidrógeno (creando acidez) e iones ferrosos (Fe^{2+}), que luego pueden oxidarse a iones férricos (Fe^{3+}). Las bacterias acidófilas pueden acelerar significativamente estas reacciones de oxidación, como por ejemplo el género *Acidithiobacillus* son de particular importancia. Específicamente, *A. ferrooxidans* es capaz de catalizar, la oxidación de los sulfuros y del hierro ferroso (Fe^{2+}), mientras que *A. thiooxidans*, puede oxidar solo azufre. Otros géneros capaces de catalizar la oxidación de pirita incluyen *Sulfolobus*, *Leptospirillum*, *Thiobasilus*, y *Archaeas*. En forma general dichas bacterias aceleran la oxidación de

minerales de sulfuro, especialmente bajo condiciones de bajos valores de pH, con un rango óptimo de 1.5 a 3.5.

- **Contexto geológico**

Las características geológicas son determinantes en la generación del DAR, debido a factores como la composición de las rocas, la estructura geológica, y los procesos geodinámicos que favorecen la exposición de minerales sulfurosos a condiciones que propician la oxidación. Los minerales sulfurosos, como la pirita (FeS_2), se encuentran comúnmente en depósitos de mineralización metálica, en zonas de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas. Los que al entrar en contacto con el oxígeno y el agua generan ácido.

Por otro lado, la presencia del DAR en condiciones naturales ocurre también, por la presencia de las fracturas y fisuras en las rocas, que son vías por donde el agua y el agua se infiltra. Las rocas fracturadas permiten que el agua de lluvia o el agua subterránea entre en contacto con los sulfuros, facilitando la oxidación y la formación de ácido sulfúrico.

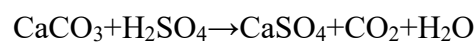
- **Clima y condiciones hidrogeológicas**

El clima también juega un papel importante en la generación de DAR, sin embargo, debe estar relacionado a otros, como las características geológicas, como la disposición y permeabilidad de las rocas. En climas o periodos del año húmedos, con precipitación alta, el agua puede infiltrarse más fácilmente en las rocas sulfurosas, aumentando la probabilidad de DAR.

También es importante mencionar que, la presencia y circulación de aguas subterráneas, también es un factor son determinantes. Las formaciones rocosas con alta permeabilidad permiten un mayor flujo de agua subterránea, lo que facilita la disolución de sulfuros y la infiltración de oxígeno.

- **Capacidad de neutralización de las rocas**

La presencia de rocas ricos en carbonato (como la caliza o el mármol) o silicatos básicos (como la diabase y el basalto), pueden disminuir los efectos del DAR. Los carbonatos son especialmente importantes para neutralizar el ácido sulfúrico en un proceso químico como el siguiente:



Lamentablemente, es común observar en las cabeceras de ríos andinos, ausencia de rocas con dichas características.

b. Impactos potenciales negativos del DAR

- **Sobre la Calidad del Agua**

Los cuerpos de agua, como ríos y lagunas, afectados por el DAR, presentan aguas ácidas, dichos niveles de pH facilita la presencia de metales pesados y metaloides, los que varían en tipo y cantidad según el tipo de roca involucrado. Es común que contenga hierro (Fe), manganeso (Mn), aluminio (Al), zinc (Zn), cesio (Cs), cobre (Cu), rubidio (Rb), níquel (Ni), cobalto (Co), arsénico (As), cadmio (Cd) y plata (Ag). Por ello, dichas aguas a menudo no son apta para diversos usos (según normativas), como para consumo humano, riego o bebida de ganado.

- **Impactos en la calidad del suelo**

Los metales en solución al entrar en contacto con el suelo, tienden a acumularse y es común observar la formación de ferricretas o conglomerados ferruginosos, que son sedimentos cementados por oxihidróxidos de hierro (principalmente goethita). La presencia de dichos depósitos son indicadores de la oxidación de sulfuros

- **Impacto en los ecosistemas terrestres y acuáticos**

El DAR, afecta negativamente a los componentes vivos de los ecosistemas, vegetación, herbívoros, carnívoros, incluyendo dentro de ellos al ganado.

Los metales asociados al DAR, son tóxicos para los seres vivos, por su capacidad de bioacumulación. Por ejemplo, se ha demostrado que el DAR afecta negativamente a los macroinvertebrados bentónicos en ríos. Se encontraron diferencias significativas en la distribución de taxones y una menor abundancia y mayor número de taxones tolerantes en lugares afectados por DAR.

- **Posible impactos en los seres humanos**

El principal efecto se relaciona con el riesgo de la ingesta de agua que contiene metales pesados, como es la presencia de arsénico, cadmio, cobre, plomo, zinc, entre otros metales, pueden causar problemas en varios sistemas y órganos del cuerpo, como el respiratorio y los riñones. Por lo mismo, el consumo de agua proveniente de recursos hídricos afectados por el DAR compromete la seguridad alimentaria y la salud pública.

2.3.6. Características fisicoquímicas del agua

Son las propiedades físicas y químicas que determinan la calidad del agua para determinados usos en un entorno específico. Estas características son importantes para determinar la aptitud de usos, como consumo humano (alimentación y aseo), para uso en la agricultura, la industria y la preservación de los ecosistemas acuáticos (Rojas, 2002). Dentro de los principales indicadores tenemos:

a. Temperatura

La temperatura del agua es la medida de energía calórica que contiene el agua. Se mide en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) o Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), es importante su medición ya que puede afectar muchos aspectos, como la vida acuática, los patrones climáticos y la capacidad del agua para disolver sustancias. También influye en la capacidad de oxígeno de disolverse en el agua y afecta el metabolismo de los organismos acuáticos (Rojas, 2002).

b. Conductividad eléctrica

Es un indicador de la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, atribuida a la presencia de iones disueltos como sales minerales, ácidos, bases u otros compuestos iónicos. Se mide en siemens por metro (S/m) o en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$). La conductividad es crucial para evaluar la calidad del agua, ya que diagnostica sobre la cantidad de sales disueltas, muchas de ellas son consideradas como. Una alta conductividad sugiere una mayor concentración de sales disueltas, lo cual puede ser beneficioso o perjudicial según el uso del agua (Sierra, 2021)

c. Sólidos disueltos totales

Representan la cantidad total de todas las sustancias sólidas disueltas en el agua, incluyendo sales minerales, iones inorgánicos, metales, nutrientes y otros compuestos. Se expresan en partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/L) y su medición es crucial para determinar la calidad del agua. Valores elevados pueden influir en el sabor y la turbidez del agua, así como en su seguridad para el consumo humano y su idoneidad para usos industriales. (Chacón, 2017).

d. Turbidez

Es una medida de la claridad del agua y se refiere a la cantidad de partículas suspendidas en el agua que dispersan y absorben la luz, haciendo que el agua aparezca turbia. Las partículas en suspensión pueden ser sedimentos, materia orgánica, microorganismos, algas y otros materiales. La turbidez es un parámetro importante en la evaluación de la calidad del agua, tanto para el consumo humano como para los ecosistemas acuáticos (Sierra, 2021).

e. Potencial de hidrogeno

Comúnmente conocido como pH, es una medida de brinda información sobre la acidez o alcalinidad del agua en una escala que va desde 0 a 14, en la que un valor de 7 es considerado como neutro. Cuanto mayor sea la concentración de iones de hidrógeno, la solución será más ácida (pH por debajo de 7); por el contrario, menores concentraciones indican soluciones alcalinas (pH superiores a 7). El pH es una propiedad del agua fundamental en numerosos procesos químicos y bioquímicos; así como, naturales y aplicaciones

humanas, como el tratamiento de aguas y la producción agrícola, ya que ciertos organismos y reacciones químicas funcionan óptimamente en rangos específicos de pH (Chang, 2011).

f. Dureza total

La dureza total del agua, también conocida como dureza total de cationes, es una medida de la concentración de cationes metálicos divalentes disueltos en el agua, principalmente calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), expresada como carbonato de calcio (CaCO_3) en miligramos por litro (mg/L). Es decir, es un indicador a través del cual se determina la cantidad de minerales "incrustantes" presentes en el agua. La dureza total se deriva del contacto del agua con minerales como la caliza (piedra caliza) y la dolomita durante, que al ser disueltas liberan iones de calcio y magnesio al agua, aumentando su dureza (Patnaik, 2010).

g. Nitratos

Compuestos químicos formados por nitrógeno y oxígeno, específicamente en forma de iones nitrato (NO_3^-). Esta forma química de nitrógeno se encuentra de manera natural en el suelo y el agua, pero también puede ser introducida por actividades humanas como la agricultura, la industria y el tratamiento de aguas residuales. Los nitratos son esenciales para los productores primarios, ya que proporcionan nitrógeno, un nutriente crucial. Sin embargo, niveles elevados de nitratos en el agua potable pueden ser dañinos para la salud humana, especialmente para bebés y mujeres embarazadas, porque pueden

convertirse en nitritos en el cuerpo, interfiriendo con la capacidad de la sangre para transportar oxígeno (Lozano-Rivas, 2013).

h. Fosfatos

Compuestos químicos que contienen fósforo y oxígeno, y pueden presentarse en el agua en diversas formas, como iones fosfato (PO_4) o ácido fosfórico (H_3PO_4). Los fosfatos son nutrientes esenciales para los productores primarios acuáticos, ya que son componentes clave de los ácidos nucleicos y los sistemas de energía celular. Sin embargo, un exceso de fosfatos en el agua puede ser problemático, ya que promueve un crecimiento excesivo de organismos fotosintetizadores, lo que conduce a la eutrofización. Este proceso reduce el oxígeno disponible en el agua, afectando negativamente a los ecosistemas acuáticos (Sierra, 2021).

i. Sulfatos

Son compuestos químicos que contienen azufre y oxígeno, comúnmente encontrados en el agua en forma de iones sulfato (SO_4). Son solubles en agua y pueden provenir de diversas fuentes naturales, como de minerales de sulfato en el suelo, la roca y los depósitos subterráneos. Los sulfatos también pueden ser liberados al agua a través de actividades humanas, como la minería, la industria, el tratamiento de aguas residuales y la liberación de productos químicos. En pequeñas cantidades, los sulfatos en el agua generalmente no representan un riesgo para la salud humana, y de hecho, en ciertas cantidades, pueden ser necesarios para algunas funciones biológicas. Sin embargo, niveles muy altos de sulfatos en el agua potable pueden causar efectos

laxantes o tener un impacto en la calidad del agua, afectando su sabor o aspecto (Arellano & Guzmán, 2011).

2.3. Marco conceptual

- a. **Río:** Curso de agua natural, continuo y con flujo unidireccional (también es llamado lótico), de tamaño considerable. Drena una cuenca hidrográfica específica y converge finalmente en otro cuerpo de agua como un lago, un embalse o el océano (Elosegui, 2009).
- b. **Arroyo:** Curso de agua lótico de menor tamaño que un río, caracterizado por un cauce más estrecho, menor profundidad. Recibe mayor influencia directa de la zona riparia y el ecosistema terrestre circundante. Hidrológicamente, los arroyos suelen ubicarse en las cabeceras de cuenca y pueden ser perennes, intermitentes o efímeros (Allan & Castillo, 2007).
- c. **Orden de ríos:** Es un sistema de clasificación jerarquizada que se emplea en la caracterización morfológica y en limnología para describir la posición relativa de un segmento de corriente dentro de un sistema fluvial. El método más ampliamente aceptado y utilizado en estudios ecológicos es el método de Strahler (Pérez & Restrepo, 2008)
- d. **Distribución espacial de metales pesados:** Patrón de variabilidad geográfica que determina la disposición heterogénea de la presencia y concentraciones (formas químicas o especiación) de metales pesados en los distintos componentes de una red fluvial a lo largo de los límites de una microcuenca (Sojka & Jaskuła, 2022).
- e. **Cabecera de cuenca:** Área geográfica que se halla dentro de una cuenca de más altitud, donde nacen cuerpos de agua lóticos. También se puede

considerar como el área donde nacen y comienzan a fluir el sistema fluvial, para luego, a medida que circula unirse a otros para formar un curso de agua más grande (Brack & Mendiola, 2010).

- f. Altoandino:** Región de la cordillera de los Andes, que se halla a niveles superiores a los 3 500 msnm, ocurre en zonas donde se halla presente la Cordillera de los Andes. Abarca diferentes países de América del Sur, como Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina, entre otros. Las condiciones climáticas en el altoandino suelen ser extremas (Brack & Mendiola, 2010).
- g. Metales pesados:** Elementos metálicos que presentan elevado peso molecular, con dicha denominación se refieren a elementos como el plomo, mercurio, cadmio, arsénico, cromo, entre otros. Estos elementos pueden encontrarse de forma natural en el medio ambiente, pero también pueden ser liberados por actividades humanas, como la minería, la industria, la agricultura y el vertido de desechos. Cuando los metales pesados están presentes en el agua en concentraciones elevadas, pueden representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (Arellano & Guzmán, 2011).
- h. Drenaje ácido de roca (DAR):** Proceso geoquímico donde al entrar en contacto el agua con minerales que contienen sulfuros (pirita), provoca la liberación de generación de ácidos, principalmente bajo la forma química de ácido sulfúrico, se forma cuando los sulfuros.

2.4. Marco legal

2.4.1. Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338)

Regula el uso y gestión integrada de los recursos hídricos, que comprende agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados a ésta. Según el ordenamiento legal peruano el agua es un recurso natural renovable que constituye patrimonio de la Nación y es un bien de uso público, cuya administración solo puede ser otorgada y ejercida en armonía con el bien común, la protección ambiental y el interés de la Nación. En consecuencia, no hay propiedad privada sobre el agua, correspondiendo al Estado la asignación de derechos patrimoniales a particulares, condicionado a su disponibilidad.

El agua cuya regulación es materia de la Ley mencionada comprende lo siguiente:

- Los ríos y sus afluentes, desde su origen natural;
- La que discurre por cauces artificiales;
- La acumulada en forma natural o artificial;
- La que se encuentra en las ensenadas y esteros;
- La que se encuentra en los humedales y manglares;
- La que se encuentra en los manantiales;
- La de los nevados y glaciares;
- La residual;
- La subterránea;
- La de origen minero medicinal;

- La geotermal;
- La atmosférica; y
- La proveniente de la desalación

Dentro de los aspectos más importantes de esta ley resalta:

a. Clases de uso y orden de prioridad

La prioridad para el otorgamiento y el ejercicio de los usos sigue el siguiente orden:

- **Uso primario:** que consiste en la utilización directa y efectiva del agua en sus fuentes naturales y cauces públicos con el fin de satisfacer necesidades humanas primarias, comprendiendo su uso para la preparación de alimentos, consumo directo y el aseo personal, así como su uso en ceremonias culturales, religiosas y rituales. No requiere autorización administrativa.
- **Uso poblacional:** Consiste en la captación del agua de una fuente o red pública, debidamente tratada, con el fin de satisfacer las necesidades humanas básicas (preparación de alimentos y aseo personal), se ejerce mediante derechos de uso de agua otorgado por la Autoridad Nacional.
- **Uso productivo:** Consiste en el uso del agua en procesos de producción o previos a los mismos, se ejerce mediante derechos de uso de agua otorgados por la Autoridad Nacional. Siendo los tipos de uso productivo, en orden prioritario, los siguientes:
 - Agrario: pecuario y agrícola
 - Acuícola y pesquero
 - Energético

- Industrial
- Medicinal
- Minero
- Recreativo
- Turístico
- Transporte

b. Protección del agua

La Autoridad Nacional en coordinación con el Consejo de Cuenca e instituciones públicas competentes correspondientes, en el lugar sea en sus cauces naturales y artificiales controla supervisa y fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA agua).

2.4.2. Código Penal

En sus artículos 304° y 305°, prohíben la contaminación por vertimiento de residuos sólidos, líquidos, gaseosos o de cualquier otra naturaleza con infracción de las normas ambientales y por encima de los límites máximos permisibles, que causen o puedan causar perjuicio o alteraciones en la flora, fauna y recursos hidrobiológicos. El Artículo 307°, prohíbe el vertimiento de desechos industriales o domésticos en lugares no autorizados o sin cumplir con las normas sanitarias y de protección al ambiente.

2.4.3. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (Decreto Supremo 004-2017-MINAM)

Establece el grado o el nivel de concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente, estos ECA son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural y son obligatorios en los diseños de normas legales y las políticas públicas, siendo también obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

Las categorías de los ECA para agua son las siguientes:

- **Categoría 1.** Poblacional y recreacional

Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable: Incluye las aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección; las que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional; y las que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado.

Aguas superficiales destinadas para recreación: Incluye las de contacto primario y las de contacto secundario.

- **Categoría 2.** Actividades de Extracción y Cultivo Marino Costeras y Continentales

Extracción y cultivo de moluscos bivalvos

Extracción y cultivo de otras especies microbiológicas

Otras actividades

• **Categoría 3.** Riego de Vegetales y Bebida de Animales

Vegetales de tallo alto y tallo bajo. - Incluye iguales parámetros fisicoquímicos, inorgánicos, orgánicos y plaguicidas.

Vegetales de tallo bajo. - Incluye parámetros biológicos más exigentes

Vegetales de tallo alto. - Incluye parámetros biológicos menos exigentes que el de tallo bajo

Para bebida de animales

• **Categoría 4.** Conservación del ambiente acuático

Están referidos a aquellos cuerpos de agua superficiales que forman parte de ecosistemas frágiles, áreas naturales protegidas y/o zonas de amortiguamiento y que cuyas características requieren ser protegidas.

Tabla 1.

Categorías consideradas en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) aprobado por Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.

Categoría	Descripción	Subcategoría	Descripción
Categoría 1-A	Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable	A1	Agua que puede ser potabilizada con desinfección.
		A2	Agua que puede ser potabilizada con tratamiento convencional.
		A3	Agua que puede ser potabilizada con tratamiento avanzado.
Categoría 1-B	Aguas superficiales destinadas a recreación	B1	Contacto primario
		B2	Contacto secundario
Categoría 2: Actividades de extracción y cultivos marinos costeros y continentales.	Agua de mar	C1	Extracción y cultivo de moluscos
		C2	Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas.
		C3	Otras actividades

	Agua continental	C4	Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas
Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales	Parámetros para riego de vegetales	D1	Riego de cultivo de tallo alto y bajo
	Parámetros para bebidas de animales	D2	Bebida de animales
Categoría 4	Conservación del Ambiente Acuático	E1	Lagunas y lagos
		E2: Ríos	Ríos de costa y sierra
		E3: Ecosistemas marino costeros	Ríos de selva Estuarios Marinos

Existen valores referenciales para todas las categorías consideradas en el decreto supremo referido: Categoría 1 (Población y recreacional), Categoría 2 (actividades de extracción y cultivo marino costeros y continentales), categorías 3 (riego de vegetales y bebida de animales) y categoría 4 (conservación del ambiente acuático).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación política

El estudio se llevó a cabo en los arroyos de ubicados en la cuenca alta del río Cachi, específicamente en la microcuenca del río Apacheta. Políticamente se encuentra ubicado de la siguiente manera:

Departamento: Ayacucho

Departamento: Huancavelica

Provincia: Huamanga y Cangallo

Provincia: Huaytará

Distrito: Vinchos y Paras

Distrito: Pilpichaca

Para más detalle observar los mapas de los anexos 16 y 17.

3.1.2. Localización geográfica de los arroyos

Preliminarmente los arroyos a muestrear serán las que se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2.

Ubicación geográfica de las zonas de muestreo en los siete arroyos monitoreados

N°	Zona muestreo	Ubicación (UTM)			Departamento	Provincia	Distrito
		X	Y	Altitud (msnm)			
1	P1	529054	8523620	4718	Huancavelica	Huaytará	Pilpichaca
2	P2	529726	8523868	4659	Huancavelica	Huaytará	Pilpichaca
3	P3	534420	8523670	4377	Ayacucho	Paras	Cangallo
4	P4	537808	8523840	4226	Ayacucho	Paras	Cangallo
5	P5	540631	8525353	4109	Ayacucho	Paras	Cangallo
6	P6	546835	8524936	3915	Ayacucho	Paras	Cangallo
7	P7	552161	8525529	3743	Ayacucho	Huamanga	Vinchos

3.2. Tipo de investigación

De acuerdo a Hernández (2018), la investigación tiene las siguientes características:

- Según sus objetivos es investigación básica, ya que busca generar conocimientos teóricos sin un objetivo práctico inmediato.
- Según el enfoque, es cuantitativa, ya que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos para identificar patrones y tendencias. También se apoya en las herramientas de la estadística.
- Según la finalidad es descriptiva, ya que su propósito fue describir las características de un fenómeno, este caso las características físicas y químicas del agua de los arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi.
- Según el tiempo de toma de datos, es transversal, ya que se tomó muestras de los arroyos en dos periodos temporales definidos (húmeda y seca).

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Agua de arroyos altoandinos de la cabecera de cuenca del río Cachi (microcuenca del Apacheta) durante el 2024.

3.3.2. Muestra

14 muestras de agua proveniente de 7 arroyos muestreados

3.3.3. Muestreo

La ubicación de los arroyos o quebradas, fue realizada en una prospección inicial, para el cual se recorrió con un vehículo la Vía Libertadores. La

selección de los arroyos fue determinístico, seleccionando aquellos que se hallaron por encima de 3700, siguiendo las recomendaciones de Ramírez (1999). Por otro lado, también se consideró las recomendaciones de la Autoridad Nacional del Agua (2016), en los aspectos de accesibilidad al lugar de muestreo. Los muestreos fueron realizados en los meses de marzo (época húmeda) y julio (época seca)

3.3.4. Unidad de observación

750 ml de muestra de agua proveniente de siete arroyos estudiados.

3.4. Operacionalización de variables

Tabla 3.

Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Unidad o categoría de medida	Escala de medición	Instrumento de medición
Metales pesados	Metales pesados	Aluminio	mg/L	Razón	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
		Arsénico	mg/L	Razón	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
		Hierro	mg/L	Razón	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
		Manganeso	mg/L	Razón	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
		Zinc	mg/L	Razón	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
		Plomo	mg/L	Razón	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
		Mercurio	mg/L	Razón	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente
Arroyos altoandinos	Orden de arroyo	Orden del arroyo	1ro y 2do	Nominal	Mapa
		Caudal	L/seg	Razón	Método del flotador
	Características morfohidrológicas	Profundidad máxima	mg/L	Razón	Regla graduada
		Ancho de cauce	mg/L	Razón	Distanciómetro
		Altitud	msnm	Razón	GPS navegador

Características físicoquímicas	Características físicoquímicas	Conductividad eléctrica	μS/cm	Razón	Multiparámetro
		Sólidos disueltos totales	ppm	Razón	Multiparámetro
		Turbidez	NTU	Razón	Multiparámetro
		pH		Razón	Multiparámetro
		Oxígeno disuelto	mg/L	Razón	Multiparámetro
		Dureza total	mg/L	Razón	Titulación
		Cloruro	mg/L	Razón	Titulación
		Nitrato	mg/L	Razón	Espectrofotómetro
		Fosfato	mg/L	Razón	Espectrofotómetro

3.5. Diseño de investigación

La investigación se ajusta a un diseño no experimental, caracterizado por que el investigador observa y analiza fenómenos sin manipular variables independientes ni asignar tratamientos a los sujetos, fenómenos u objetos. Prioriza la descripción, correlación o explorar relaciones entre variables tal como ocurren en su contexto natural, sin intervención directa. Este diseño es característico de estudios observacionales, descriptivos o correlacionales, siendo una de sus principales limitaciones, la dificultad para establecer causalidad debido a la falta de control sobre variables que no es de interés del investigador (Hernández, 2018).

3.6. Técnicas de recolección de datos

3.6.1. Ubicación de las zonas de muestreo

Los arroyos fueron seleccionados considerando la altitud al cual se encuentran, por encima de los 3500 msnm, adicionalmente por su proximidad a la “Vía Los Libertadores”. Para este efecto mediante un vehículo motorizado se recorrió e inspeccionó cuidadosamente dicha vía, a partir de una altitud de 3500 msnm hasta el Abra Apacheta que se halla a 4746 msnm. Se seleccionaron un total de 7 cuerpos lóticos que presentaron flujo de agua

durante la época húmeda. Las zonas de muestreo se ubicaron principalmente “río arriba”, alejados de la influencia directa de los vehículos que transitan y de la actividad de las personas que habitan en dichas zonas. Durante la época seca, se halló que el arroyo P3 no presentó agua, por lo que en los análisis estadísticos no fue considerado.

3.6.2. Colecta de muestras de agua para determinación de metales pesados

Mediante el uso de frasco de polietileno de aproximadamente 120 mL, se colectó muestras de agua, siguiendo las recomendaciones determinadas por la Autoridad Nacional del Agua (2016). En forma general el procedimiento seguido fue, sumergir el frasco en zona central de la corriente de agua y se realizar dos enjuagues. Posteriormente coleccionar las muestras, llenado los frascos hasta el tope, minimizando la presencia de burbujas. Posteriormente, se agregó seis gotas de ácido nítrico concentrado, para luego cerrar el frasco cuidadosamente.

Los frascos conteniendo el agua muestreada, fueron etiquetados según el requerimiento del laboratorio contratado, así como siguiendo las recomendaciones mencionadas en la cadena de custodia (Autoridad Nacional del Agua, 2016). Posteriormente, fueron depositados en un recipiente atemperado ($5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2$) y trasladados al laboratorio de Biodiversidad y Sistema de Información Geográfica (BioSIG) de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Dentro de los dos días luego del muestreo, las muestras fueron remitidos al Laboratorio SGS en

la ciudad de Lima, para su procesamiento, en los que se determinaron 49 metales en las muestras

Para la investigación, los datos considerados solo fueron aquellos que tuvieron resultados numéricos, descartándose aquellos que presentaron el símbolo de (<), por lo que solo fueron considerados aluminio, arsénico, bario, cadmio, calcio, cesio, cobalto, cobre, estroncio, hierro, litio, magnesio, manganeso, níquel, potasio, rubidio, sílice, silicio, sodio, titanio y zinc. Finalmente, con la finalidad de comparar los resultados con los valores referenciales de las ECAs agua (DS N° 004-2017-MINAM) los metales considerados fueron aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel, y zinc.

3.6.3. Determinación de las características fisicoquímicas del agua

Complementariamente a las determinaciones de metales pesados, se hizo determinaciones físicas y químicas, por triplicado, en el agua de los arroyos identificados. De acuerdo al lugar donde se realizaron las determinaciones, fueron divididos en dos grupos:

- a. Determinaciones *in situ***, la que se realizó en el momento de la toma de muestras. Se empleó un multiparámetro portátil marca Hanna. Para este efecto, con la ayuda de un recipiente plástico se colectó aproximadamente 200 mL de agua en el cual fue sumergido el electrodo del equipo, para luego de uno a dos minutos realizar la lectura. Los resultados fueron registrados en una planilla especialmente diseñado para este efecto.

Las variables ambientales determinadas en esta etapa fueron:

- Temperatura
- pH
- Conductividad eléctrica
- Sólidos disueltos totales.

b. Determinaciones en laboratorio, para el cual fue necesario la colecta de muestras de agua en frascos de polietileno de aproximadamente 0,7 L de capacidad. La toma de muestras fue siguiendo las recomendaciones de la Autoridad Nacional del Agua (2016): consistió en sumergir el frasco de colecta en la parte central de la corriente, hasta llenarlo completamente, previo dos enjuague. Los frascos fueron rotulados siguiendo el modelo empleado en los frascos destinados para el análisis de metales pesados. Posteriormente fueron depositado en un recipiente refrigerado 5 °C y transportados al Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de Información Geográfica (BioSIG) de la Facultad de Ciencias Biológicas para su procesamiento dentro de las 24 horas luego del muestreo.

Las características físicas y químicas determinadas fueron:

- Dureza total
- Dureza Cálcica
- Cloruros
- Turbidez
- Sulfatos
- Fosfatos
- Nitratos

La metodología seguida en la determinaciones fue la que se describe en APHA (2017) y Chacón (2017).

3.6.4. Determinación de las características morfohidrológicas

- a. Profundidad máxima: Fue realizada con la ayuda de una regla graduada de metal de 1 m de longitud, procedimiento que fue repetido entre 3 a 5 veces, a partir del cual se obtuvo un valor promedio.
- b. Ancho de cauce: Fue realizado mediante uso de un distanciómetro que se ubicó en una de las orillas, para luego registrar la distancia transversal hacia la otra. Este procedimiento fue realizado en una tramo de aproximadamente 5 m.
- c. Ubicación y altitud: Para la ubicación geográfica se empleó un equipo GPS navegador a través del cual se asignó coordenadas y una altitud a cada zona de muestreo. Para la altitud el equipo fue colocado al ras del suelo dentro de la zona de muestreo.

3.7. Procesamiento de datos

Los datos de la concentración de metales pesados, las características químicas y físicas del agua de los arroyos, así como las características hidromorfológicas se construyó una matriz en el software Excel, para luego ser exportado al SPSS 25 e InfoStat, donde se realizó los análisis estadísticos respectivos. Se efectuará estimaciones de los estadísticos de tendencia central (media y mediana) y de dispersión (desviación típica y varianza), los que serán presentados en tablas y figuras.

Los datos, inicialmente, fueron analizados con el test de Kolmogorov-Sminorv y de Shapiro-Wilks, con la finalidad de determinar si los datos colectados se ajustan a una distribución normal. Al determinar que no se ajustan a una distribución normal, se procedió a realizar pruebas estadísticas no paramétricas para comparar los arroyos según las características químicas y físicas.

Con la finalidad de tener más evidencia, se aplicó la prueba estadísticas multivariada de conglomerados (cluster) lo que permitió agrupar los arroyos por sus semejanzas y/o diferencias, para el cual se empleó los valores promedios de las características físicas y químicas. Así mismo para identificar las variables que explican en mayor medida las diferencias entre los arroyos, se hizo el Análisis de Componentes Principales (ACP).

Con la finalidad de determinar la existencia de relación entre las variables hidromorfológicas de los arroyos con la concentración de metales pesados y las características fisicoquímicas de sus aguas, se elaboró figuras de dispersión complementado con la prueba de correlación de Sperman.

Para todos los casos se trabajará con una confianza estadística del 95%.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características fisicoquímicas del agua de arroyos

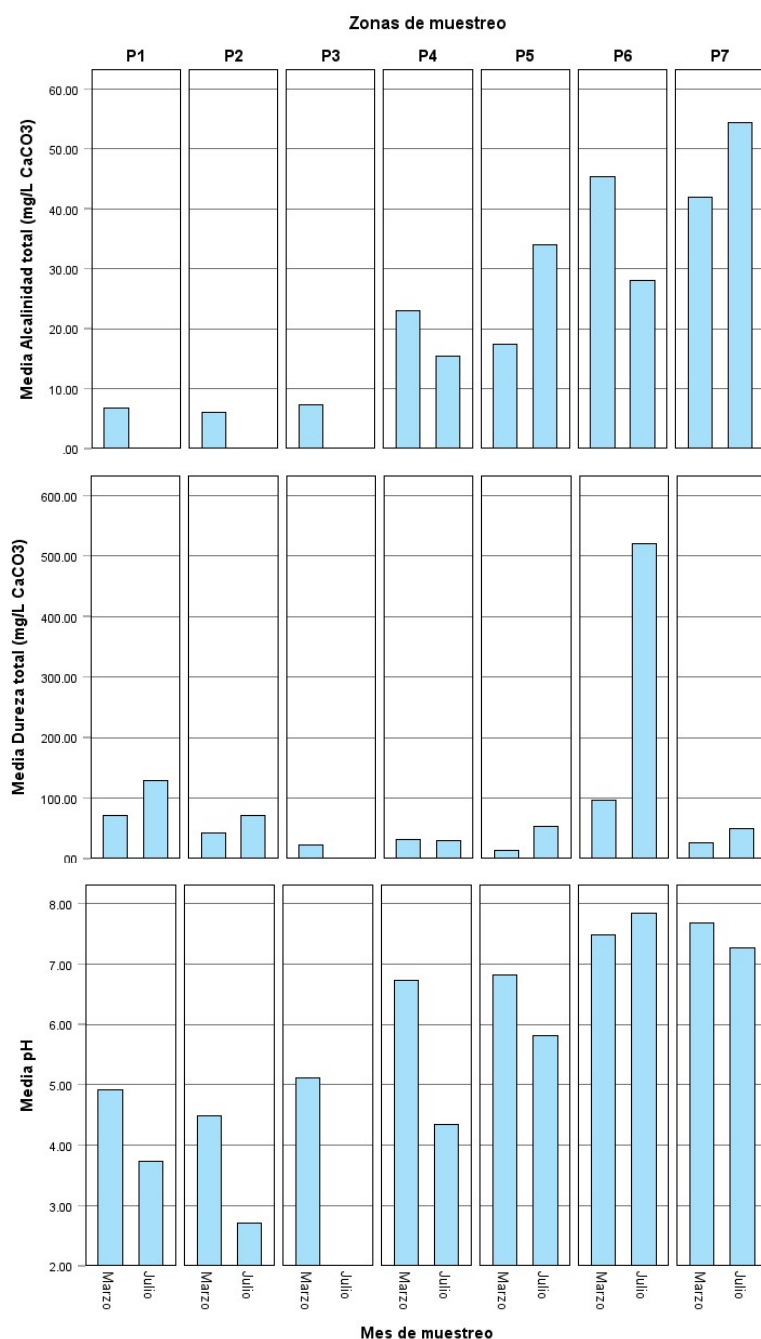


Figura 1.

Valores de alcalinidad, dureza total y pH registrados en siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

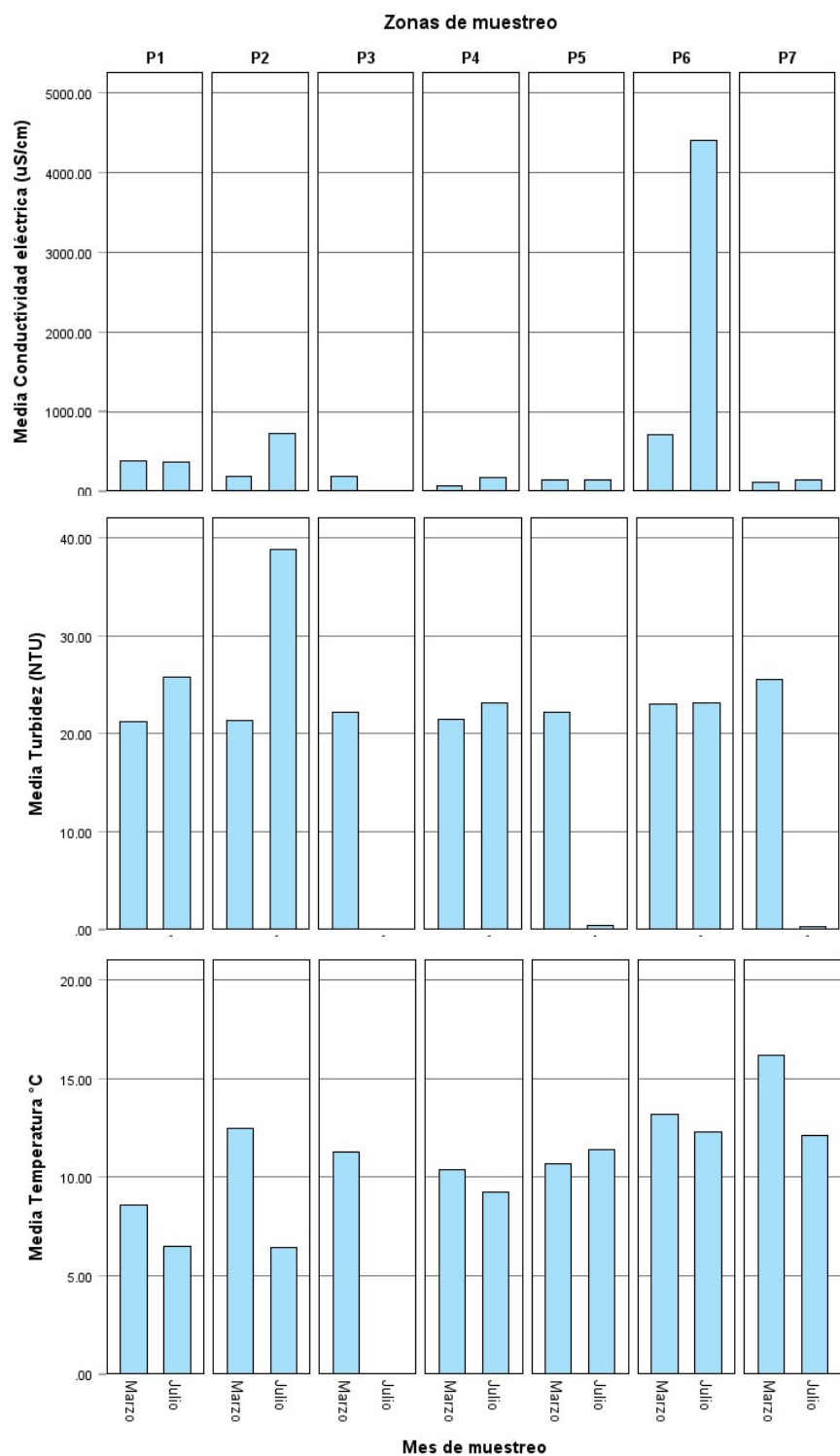


Figura 2.
Valores de conductividad eléctrica, turbidez y temperatura registrados en siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

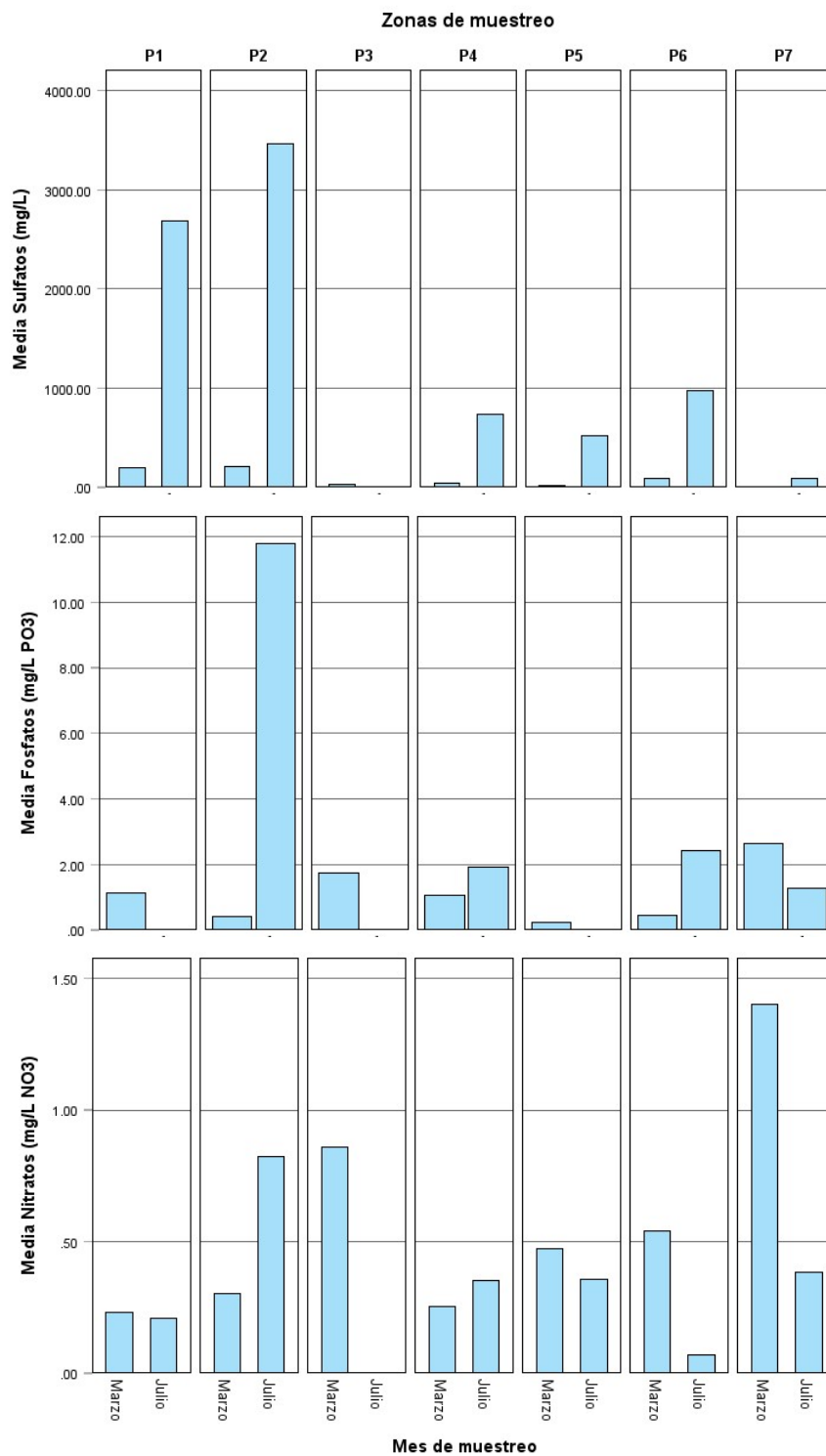


Figura 3.

Valores de sulfatos, fosfatos y nitratos registrados en siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

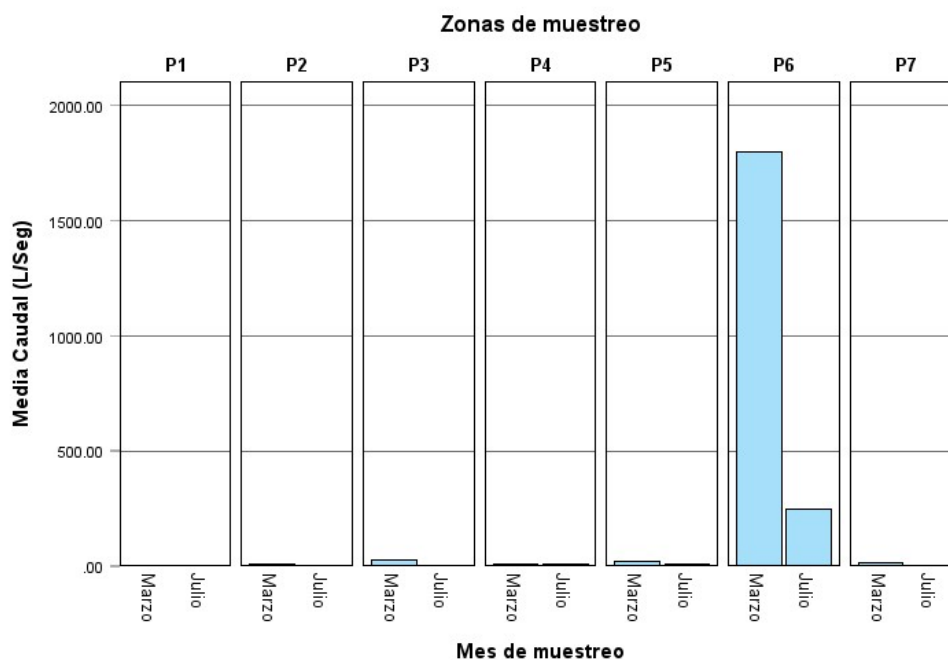


Figura 4.

Caudal en siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

En la Figuras 1, 2, 3 y 4, se observa las características físicas y químicas del agua de siete arroyos estudiados (P1 a P7), ubicados en la cabecera de la cuenca del río Cachi. La información fue colectada en dos periodos del año 2024: marzo (época húmeda) y julio (época seca). Se presenta información de alcalinidad total, dureza total y pH (Figura1); turbidez, conductividad eléctrica y temperatura (Figura 2); sulfatos, fosfatos, nitratos (Figura 3) y caudal (Figura 4). Al realizar la prueba de Krukal-Wallis con la finalidad de determinar el tipo de distribución de los datos (Anexo 4) se observa que las variables mencionadas no tienen distribución normal, con excepción de uno de ellos (temperatura del agua)

Con respecto a la alcalinidad total de los arroyos, resalta que en P2, P3 y P4 no fue registrado, con lo que se afirma que en el agua no se tiene la presencia de formas químicas que tienen la capacidad para neutralizar ácidos (bicarbonatos y carbonatos), debido a que el pH de las aguas fue menor a 4,3. Bajo dichas condiciones, solo es posible hallar dióxido de carbono (CO_2) libre o bajo la forma de ácido carbónico (H_2CO_3). En los otros arroyos que se hallan a menor altitud (P4, P5, P6 y P7) se incrementan ostensiblemente. La ausencia o baja alcalinidad total en las zonas altas, indica que la capacidad de amortiguamiento del ecosistema ha sido superada por la presencia de ácido. Por ello se puede afirmar que, a medida que el agua de los arroyos fluye aguas abajo, la interacción con minerales que contienen carbonatos (como la calcita o dolomita) reducen la presencia de los ácido y libera iones de bicarbonato (HCO_3^-), por lo que se incrementa la alcalinidad y el pH. Lo descrito probablemente, es consecuencia de la presencia de drenajes ácidos de roca (DAR) naturales que influyen en los arroyos, que es mucho mayor en la zonas más altas (P1 y P2), la que disminuye progresivamente hacia P7. La presencia del fenómeno del DAR, es consecuencia de las características geológicas predominantes, como es la presencia de compuestos sulfurados que al contacto de oxígeno y agua origina ácidos fuertes.

La dureza total, presentó los mayores valores en P6 (julio) con 520,67 mg/L de CaCO_3), mientras que en P3 los menores con 22,67 (marzo). No se observa la tendencia descrita para la alcalinidad, debido probablemente a que los orígenes de los arroyos sean diferentes (lluvia, manantial). Sin embargo, es de notar que los mayores valores son registrados generalmente durante la

época seca (julio), que como ya se mencionó el efecto diluyente de las lluvias ya no se observa,

Los valores de pH más bajos, fueron de 2,7 que, fue registrado en el arroyo (P2) para julio, seguido de P1 con 3,72 para el mismo mes. Por otro lado, los pH fueron mayores en los arroyos P6 y P7 (en julio y marzo, respectivamente) alcanzando valores por encima de 7. En una observación general se observa cierta tendencia de incremento desde los arroyos ubicados a mayor altitud hacia los de menor altitud. Lo reportado se asemeja a los valores hallados en la quebrada Quilcayhuanca (Ancash, Perú), pero en este caso, como producto del retroceso glaciar, donde se registraron valores de hasta 3,53 acompañado de altas concentraciones de metales que superaban los estándares de calidad ambiental (Crisanto-Rojas & Iannacone, 2023). Por otro lado, en arroyos asociados a bofedales en el departamento de Ayacucho en una zona cercana a los primeros arroyos estudiados, se registraron valores de hasta 2,7 (Carrasco et al., 2020), probablemente a también reciben influencia de los DAR. Por otro lado, en la mina de São Domingos (Portugal), se reportaron valores de pH tan bajos como 0,84, con concentraciones de sulfatos que superan los 400 mg/L, como efecto del potencial extremo del DAR derivado de la actividad minera (Gomes & Valente, 2024). Es importante mencionar que la extrema acidez de las aguas fomentan la movilidad de metales, por lo que un pH bajo y alta conductividad en P2 y P4, sugieren elevadas concentraciones de metales disueltos, tal como se ha registrado en muchos estudios sobre el DAR (Simate & Ndlovu, 2014). El inicio del drenaje ácido de roca se da cuando los minerales de sulfuro se exponen al oxígeno y al agua.

Debido a esa exposición al aire atmosférico (meteorización) el sulfuro se oxida, liberando iones de hidrógeno, creando acidez, lo que a su vez permite la liberación del ion ferroso (Fe_2^+) y posteriormente el ion férrico (Fe_3^+) (Montano et al., 2022). La presencia de ciertas bacterias acidófilas puede acelerar la velocidad de algunas de las reacciones relacionadas con la oxidación de minerales de sulfuros. Las bacterias del género *Acidithiobacillus* son de particular importancia. Por ejemplo, *A. ferrooxidans* es capaz de catalizar tanto la oxidación de mineral de sulfuro como la de hierro ferroso (Fe_2^+), mientras que *A. thiooxidans* sólo puede oxidar azufre. Otros miembros del género *Acidithiobacillus* también son capaces de catalizar la oxidación de pirita, al igual que ciertas especies de los géneros *Sulfolobus* y *Leptospirillum*. Estas bacterias aceleran la oxidación de minerales de sulfuro bajo condiciones de pH bajo (Valdez-Núñez et al., 2024).

La conductividad eléctrica (CE) fue notablemente mayor en P6 con 4 411,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (julio), seguida de 716,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el mismo arroyo, pero en el mes de marzo, lo que indica una alta concentración de iones disueltos, lo que probablemente se deba al tipo de origen de dicho arroyo, que se da a partir de emanaciones termohidrológicas (Tapia et al., 2021). Por otro lado, en P2 se registró el segundo mayor valor con 720,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (julio), valores que también son elevadas en comparación con otros arroyos. El DAR natural tiene origen en la interacción del agua con minerales sulfurados, principalmente pirita, y en presencia de oxígeno, genera soluciones ácidas y disuelve cantidades significativas de metales pesados, lo que incrementa la conductividad eléctrica del agua (Tong et al., 2022).

La turbidez fue mayor en los arroyos ubicados a mayor nivel altitudinal, considerando que el pH que mostraron fueron las más ácidas, probablemente se deba a la precipitación de hidróxidos de hierro (III) ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Este fenómeno ocurre cuando las aguas ácidas ricas en hierro ferroso (Fe_2^+) se oxidan y el pH aumenta ligeramente, haciendo que el hierro férrico (Fe_3^+) precipite, otorgando al agua y a los sedimentos una característica coloración ocre o rojiza (Montano et al., 2022). Este es un signo visual distintivo del DAR. El incremento de la turbidez puede también estar relacionada con el aporte de sedimentos finos, derivado del deshielo.

Las mayores concentraciones de sulfatos (SO_4^-) fueron registradas en P1 y P2, con valores alto en el P2 tanto para marzo y julio, alcanzando 3 461,7 mg/L y 2 686,7 mg/L, respectivamente; mientras que los valores mínimos fueron registrados en P7 con un valor de 0,2 mg/L para marzo. El incremento de los sulfatos en el agua se debe al proceso de oxidación que sufren los minerales sulfurados (principalmente pirita) además de incrementar ostensiblemente metales disueltos. Los factores geológicos, climáticos, la acción tectónica, volcánica, la erosión glacial y pluvial, y los ciclos de congelamiento y deshielo, son cruciales en la exposición de minerales y la formación del DAR, afectando la superficie mineral y la recarga de aguas subterráneas (Somers & McKenzie, 2020).

Las concentraciones de los nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^-) (Figura 3), mostraron máximos valores en diferentes arroyos (P7 para nitratos y P2 para fosfatos). Apparently su presencia no estaría vinculada directamente al

efecto del DAR o la altitud, más bien estaría asociadas a procesos biológicos, como la descomposición de la materia orgánica (heces de animales, restos vegetales), fuentes de contaminación difusa (Laws, 2017). No se puede descartar el efecto de cianobacterias (fijar nitrógeno atmosférico) que pudieran estar presentes en ambientes húmedos (Manezes & Bicudo, 2022).

De acuerdo a los hallazgos, la presencia de aguas con pH ácido en las cabeceras de la cuenca, están indicando muy probablemente la presencia del Drenaje Ácido de Roca (DAR). Principalmente como consecuencia de la meteorización de suelos sulfurados, en la que predomina la piritita (FeS_2), estos minerales en presencia de agua y oxígeno atmosférico genera ácido sulfúrico (H_2SO_4), lo que reduce drásticamente el pH del agua (Ccanccapa-Cartagena et al., 2023). Similar proceso ocurre como consecuencia del retroceso glaciar acelerado por el cambio climático, que deja expuesto rocas con minerales azufrados a la intemperie (Spitzer et al., 2024). Se observa claramente que la acidificación de las aguas de los arroyos es más intensa cerca de la fuente de meteorización (mayor altitud), la que se atenúa aguas abajo debido a la dilución y a la neutralización por parte de rocas carbonatadas que probablemente son más abundantes en zonas bajas (Crisanto-Rojas & Iannacone, 2023). El efecto del DAR en las aguas de los manantiales, es consecuencia claramente de un proceso natural ya que en zonas aledañas a la zona no existe actividad minera.

En la época seca (julio) donde el caudal de los arroyos disminuye debido a la ausencia de lluvias, la calidad de las aguas de los manantiales se hace crítica,

la que se caracteriza por una disminución del pH, incremento de la conductividad, al igual que los sulfatos (principalmente en P1 y P2), patrón que es típico en zonas donde ocurre la presencia del DAR. Durante este período, el caudal de los ríos disminuye, reduciendo la capacidad de dilución (Gomes & Valente, 2024; Tong et al., 2022).

Un aspecto que llama la atención, es el arroyo P6, con máximos valores de dureza total, pH, conductividad, en la época seca (julio), un comportamiento que es diferente a P1 y P2, principalmente a nivel de pH. Dichas características no se mantienen en la época húmeda debido a la influencia que ejerce las precipitaciones pluviales, no solamente a nivel de incremento del caudal, sino también en las características físicas y químicas, es el caso de la dureza total, conductividad eléctrica. Otra característica que cambia radicalmente, es el caudal, sea en época seca o húmeda, es el principal tributario del río Apacheta (Figura 4).

En el anexo 7 se muestra los resultados del análisis de Kruskal-Wallis en el que se compara los arroyos en función de las características físicas y químicas. Se halló significancia estadística en todas, con excepción de la turbidez y el caudal, lo que refleja que los arroyos presentan diferencias, como en la alcalinidad (existen arroyos con valor cero), el pH (con valores ácidos hasta por encima de 7,6) o como la conductividad eléctrica con valores que van desde 61 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta más de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Lo que es reflejo que factores como el geoquímico ejerce influencia importante en la calidad de agua, aún más con la confirmación que a partir de ello se genera el drenaje ácido de roca

natural, ya que en zonas aledañas no existe actividad minera que pudiera contaminar los cuerpos de agua.

Con la finalidad de determinar la posible relación (influencia) de las altitud y el caudal del arroyo con las nueve características físicas y químicas determinadas se hizo el análisis bivariado de Sperman (Anexo 12). Se halló significancia estadística negativa ($p < 0,05$) de la alcalinidad total, nitratos, temperatura, conductividad eléctrica y pH con la altitud, lo que aporta evidencia que, con el incremento de la altitud, disminuyen las características señaladas; el comportamiento del sulfato es directo, es decir a mayor altitud, su tendencia es también al incremento. El caudal se halla relacionada significativamente ($p < 0,05$) de manera directa con la temperatura y el pH, lo que quiere decir que, a mayor caudal, su tendencia es a incrementarse.

4.2. Concentración de metales

En la Figuras 5, 6 y 7 se muestra los valores de la cantidad de metales (aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc) hallados en las aguas de siete arroyos altoandinos, para los meses de marzo y julio. Dentro de los principales resultados se describe:

La concentración de aluminio alcanza sus valores máximos en los arroyos que se hallan en la cabecera P1 y P2, mientras que los que hallan en menor altitud, presentan valores más bajos. El aluminio es un metal cuya solubilidad es dependiente del pH, en condiciones ácidas ($\text{pH} < 5$), se vuelve muy soluble y móvil en su forma iónica tóxica (Al_3^+). Es por ello que sus concentraciones más altas se registren en los arroyos P1 y P2, las que están más influenciados

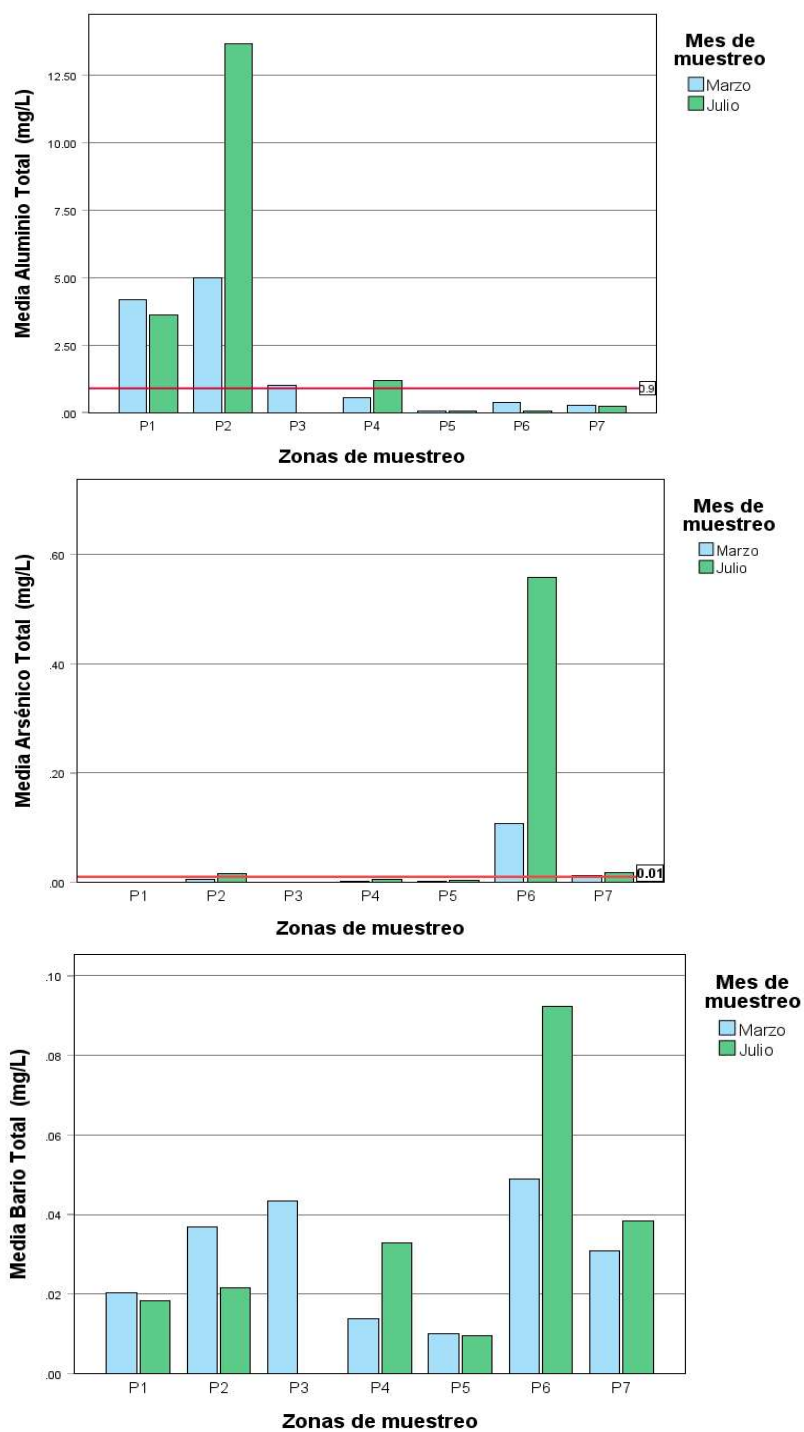


Figura 5.

Valores de aluminio, arsénico y bario en época húmeda (marzo) y seca (julio) registrado en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.

por las fuentes de los DAR. A medida que el agua de los arroyos desciende, como ocurre con P6 y P7, el pH aumenta como consecuencia de la incorporación de compuestos que se presenta en el suelo, causando la precipitación del metal como hidróxidos ($\text{Al}(\text{OH})_3$) y consecuente disminución de su concentración. En la época seca (julio), por la ausencia de lluvias el efecto de dilución sobre el aporte del DAR es menor por lo que las concentraciones de aluminio son más altas en comparación con la época húmeda (marzo). Los valores de aluminio registrados superan los valores referenciales de los ECAs de agua, por lo que su consumo representa un riesgo potencial sobre la salud humana y de los animales.

El arsénico presenta valores muy elevados en P6, tanto en la época húmeda (marzo) como en la seca (julio), siendo mucho mayor en la última. El comportamiento del arsénico es complejo, puede estar asociado a depósitos de sulfuros, su movilidad en sistemas de DAR a menudo está controlada por la adsorción que ejerce los hidróxidos de hierro que precipitan. Generalmente, el arsénico (como arsenato) es fuertemente absorbido por los precipitados de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ en un amplio rango de pH ácido a neutro (Smedley & Kinniburgh, 2002). Por lo tanto, es posible que las fuentes de los DAR (como puede ser P1, P2) liberan arsénico, cuya concentración depende de la dinámica de precipitación/adsorción del hierro.

El bario presenta sus mayores concentraciones en P6, siendo más en el mes de julio, en forma general, comparativamente entre los arroyos no se observa ninguna tendencia sobresaliente. Su concentración en aguas naturales está

determinada comúnmente por la disolución de minerales de barita (BaSO_4), que debido a las alta concentración de sulfatos generada por los DAR, la solubilidad de la barita tiende a disminuir (Izquierdo & Verástegui, 2017). Esto explica las relativas bajas concentraciones de bario en todos los puntos, especialmente en aquellos en que es más evidente el efecto del DAR (P1 y P2).

El cadmio se halla en mayores concentraciones en los arroyos P6 y P7, pese a que es muy móvil en aguas ácidas, por ello se esperaría las concentraciones más altas en P1 y P2, sin embargo, permanece soluble en un rango de pH más amplio que el hierro o el aluminio. Generalmente se encuentra asociado geoquímicamente con el zinc en minerales como la esfalerita ($(\text{Zn,Cd})\text{S}$). Su comportamiento es similar al del zinc: es muy soluble a pH bajo y su concentración debería ser máxima en P1 y P2, disminuyendo aguas abajo por dilución y adsorción. Las concentraciones en la época seca (julio) deberían ser mayores que en la húmeda (marzo). Es probable que los valores en P1 y P2 superen las normativas de calidad de agua.

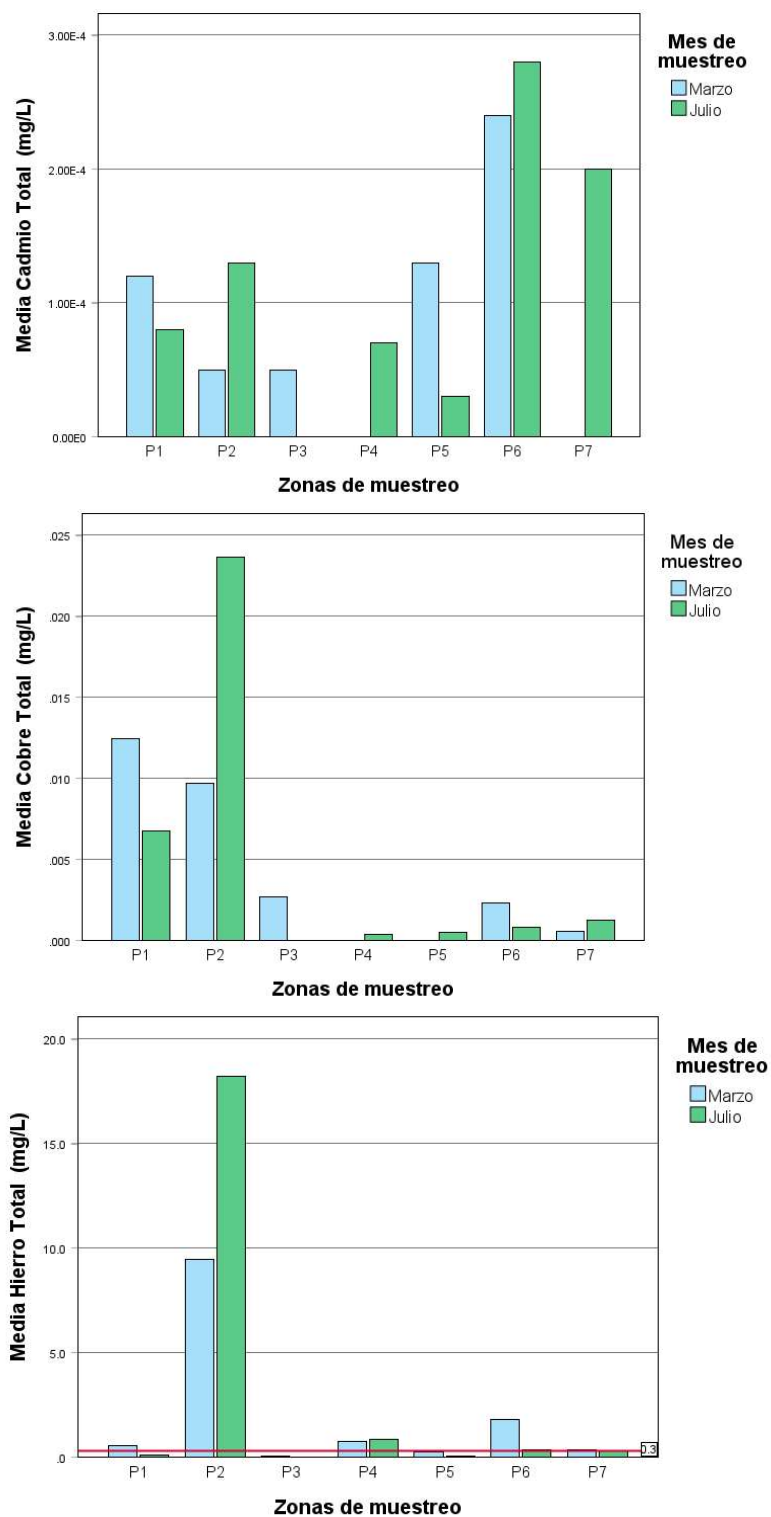


Figura 6.

Valores de cadmio, cobre y hierro en época húmeda (marzo) y seca (julio) registrado en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024

Las mayores concentraciones de cobre fueron registradas en P1 y P2, ya que es un metal característico del DAR. El cobre es un metal cuya movilidad aumenta en condiciones ácidas y es un indicador común de la contaminación por drenaje de minas o DAR, a partir de minerales como la calcopirita (CuFeS_2). La tendencia reportada confirma que las mayores concentraciones se encuentran en los puntos altos (P1, P2). La disminución de la concentración aguas abajo (hacia P6, P7) se debe a la dilución y, en menor medida que el Fe o Al, a la adsorción en hidróxidos de hierro y manganeso y materia orgánica (Gaetani & Hudson-Edwards, 2021). De acuerdo a la estacionalidad, se observa mayor concentración en la época seca (julio) como ocurre en P2.

La máxima concentración de hierro disuelto se observa en P2, que está claramente afectado por el DAR; mientras que en otros arroyos su concentración es mucho menor. Las altas concentraciones en los arroyos de cabecera, principalmente en P2, es evidencia del proceso de oxidación de la pirita. En estos puntos, el hierro se encuentra disuelto en su forma ferrosa (Fe_2^+) o férrica (Fe_3^+) debido al bajo pH. Al fluir aguas abajo, el contacto con el oxígeno atmosférico y el aumento del pH provocan su rápida oxidación y precipitación como hidróxidos de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), visibles como sedimentos de color ocre o anaranjado en el lecho del arroyo. La concentración de hierro disuelto es mayor en la época seca (julio).

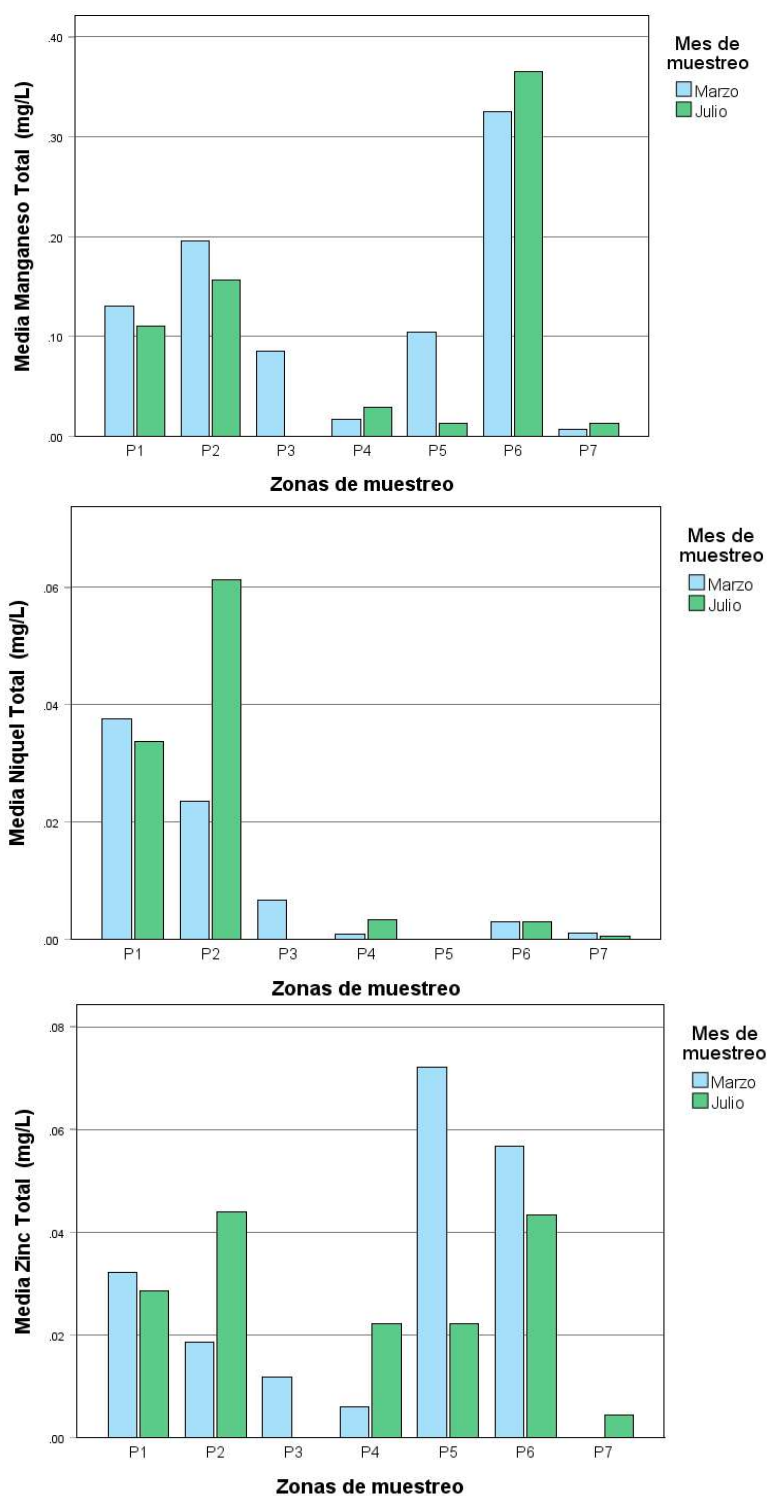


Figura 7.

Valores de manganeso, níquel y zinc en época húmeda (marzo) y seca (julio) registrado en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.

El manganeso es muy soluble en condiciones ácidas, siendo sus concentraciones elevadas en P1 y P2; sin embargo, es aún mayor en P6, tanto en época húmeda como seca. El manganeso es muy soluble en condiciones ácidas y permanece en solución a valores de pH más altos que el hierro y el aluminio. Por esta razón, el manganeso a menudo se transporta más lejos aguas abajo que otros metales en sistemas afectados por DAR (Robbins, 1999)

El níquel presenta mayores concentraciones en P1 y P2, debido a que es más móvil en aguas ácidas, al igual que el cadmio y el zinc. Su origen está ligado a la meteorización de minerales de sulfuro. De acuerdo a la época del año se espera que sus concentraciones son más altas en la época seca (julio) y más bajas en la época húmeda (marzo).

Se registró las mayores concentraciones de zinc en P5, P6, P1 y P2, probablemente debido a que es extremadamente móvil en ambientes ácidos, es un indicador clásico del DAR. Su fuente principal es la esfalerita (ZnS). Se prevé que el zinc muestre un patrón muy claro, con las concentraciones más elevadas en P1 y P2, y una disminución progresiva hacia P6 y P7 principalmente por dilución, ya que tiende a permanecer en solución hasta alcanzar pH casi neutro.

Los arroyos P1 y P2, las que se ubican a mayor altitud, funcionan como las zonas de generación y aporte principal de acidez y metales disueltos. A medida que estos arroyos fluyen hacia altitudes menores, se produce un proceso de atenuación natural, donde por factores de dilución generada por

afluentes que no presentan dicha característica y por cambios geoquímicos (principalmente el aumento del pH), generan la precipitación de metales como el hierro y aluminio, además de la disminución de las concentraciones de los metales. La estacionalidad juega un rol crucial, donde la época seca (julio) ocurre los menores valores de pH y mayores concentraciones de metales, consecuentemente, se observa un mayor riesgo ecológico en los riachuelos, debido a la reducción del caudal de los arroyos (uno de los analizados desaparece) por lo que el efecto como diluyente se reduce frente a los aportes del DAR (Gomes & Valente, 2024).

Los resultados descritos son similares a lo que se reporta en otros estudios en sistemas acuáticos altoandinos afectados por DAR natural, donde resalta la presencia de gradientes geoquímicos similares a los reportados, desde las zonas de cabecera hacia aguas abajo (Crisanto-Rojas & Iannacone, 2023). En muchos de los registros de las características físicas y químicas, así como de los metales, se observa que no se ajustan a los valores referenciales de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, resaltamos que en ese caso la presencia de una limitación natural, con importantes implicancias negativas para la biota acuática y los posibles usos del agua.

Al comparar las zonas de muestreo (arroyos) en función de la concentración de los metales hallados en sus aguas (Anexo 9), no se halló significancia estadísticas ($p > 0,05$), lo que quiere decir que son semejantes. Sin embargo, es de destacar las evidentes diferencias numéricas halladas, como por ejemplo mayor concentración de aluminio y hierro en P2, arsénico en P6. Dichos

resultados posiblemente se deban a los valores elevados de los estadísticos de dispersión, determinado principalmente por la estacionalidad de las lluvias.

En una tesis desarrollada por De La Cruz (2017) en la cuenca del río Cachi, en la que determinó características físicas-químicas del agua de tributarios del río Apacheta, muestran una clara variación con la altitud. Información que coincide con lo reportado en esta tesis. Así la zona de muestreo más altas (4200 msnm) presenta agua ácida (pH 3,98) con altas concentraciones de aluminio (6,19 mg/L), hierro y manganeso, atribuibles a la mayor solubilidad de metales en condiciones ácidas (Alloway, 2013). En contraste, los puntos de menor altitud (3200 msnm) exhiben pH ligeramente alcalino (7.57), menor aluminio y mayor conductividad eléctrica, indicando mayor mineralización. La concentración de arsénico total se incrementa hacia las zonas bajas, lo que sugiere influencia geológica o antrópica en zonas bajas (Smedley & Kinniburgh, 2002). La presencia simultánea de Al, As, Fe y Mn por encima de estándares para consumo humano implica riesgos sanitarios significativos, especialmente en comunidades rurales sin tratamiento de agua.

4.3. Relación entre las características hidromorfológicas de los arroyos con la cantidad de metales

En la figura 8 se muestra las figuras de dispersión de la altitud con los metales aluminio, arsénico, bario, cadmio y cobre. En forma general se observa ciertas tendencias, es el caso de aluminio y el cobre que se incrementa con la altitud, es decir que sus concentraciones son mayores en P2 y P1, los que probablemente están siendo afectados por el DAR.

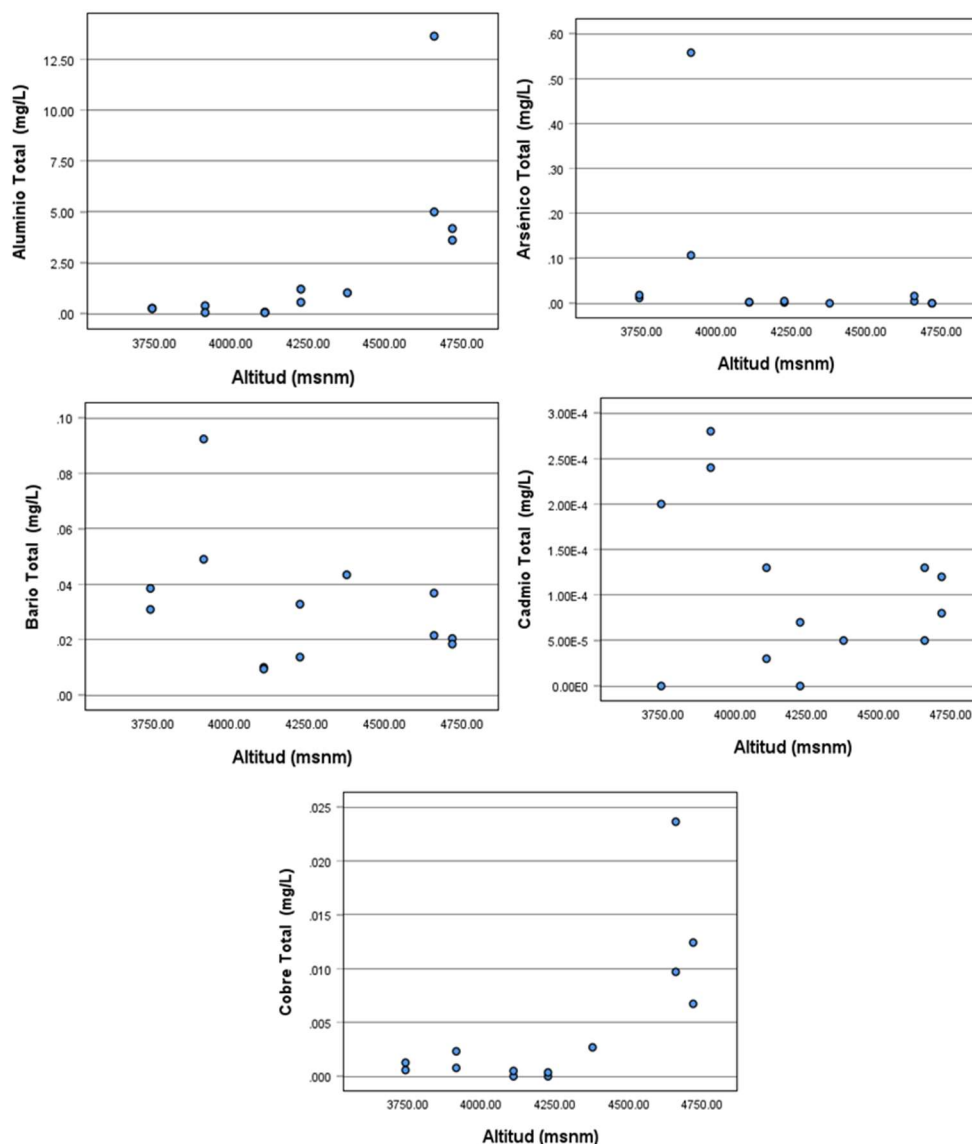


Figura 8.

Diagrama de dispersión para la relación de la altitud con la concentración de metales (aluminio arsénico, bario, cadmio y cobre) en agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.

Lo que es corroborada por los resultados de la correlación de Spearman que se muestran en el Anexo 13, donde la relación es estadísticamente significativa ($p < 0,05$). Mientras que, de acuerdo al mismo análisis estadístico (Anexo 13), el arsénico está significativamente ($p < 0,05$) relacionado con la altitud, sin

embargo, la relación es negativa, es decir que es evidente que su concentración tiende a incrementarse en los arroyos de menor altitud.

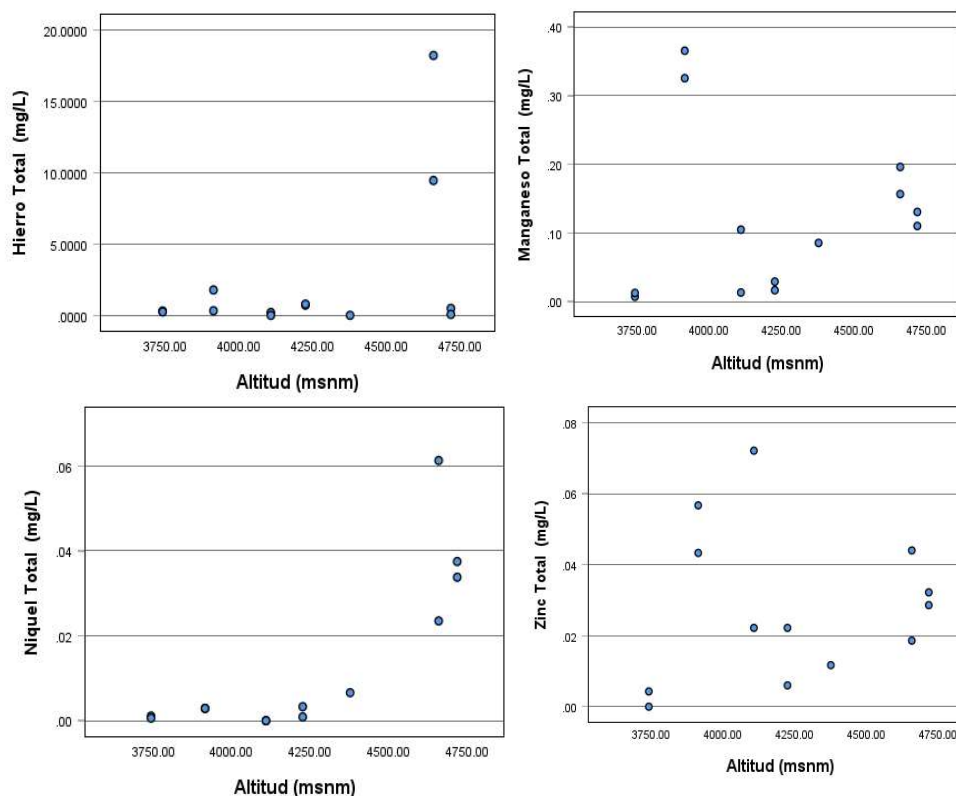


Figura 9.

Diagrama de dispersión para la relación de la altitud con la concentración de metales (hierro, manganeso, níquel y zinc) en agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.

En la figura 9 se muestra las figuras de dispersión de la variable altitud con los metales hierro, manganeso, níquel y zinc. Las tendencias que pudieran establecerse entre dichas variables, no son claras, con excepción de hierro y níquel, que tiende a incrementar su concentración a mayor altitud. Para el primer metal mencionado, el incremento es abrupto en P2 y P1, mientras que para el segundo dicho incremento es paulatino. En el Anexo 13, se halló significancia estadística ($p < 0,05$) solo para el níquel, más no así para el hierro.

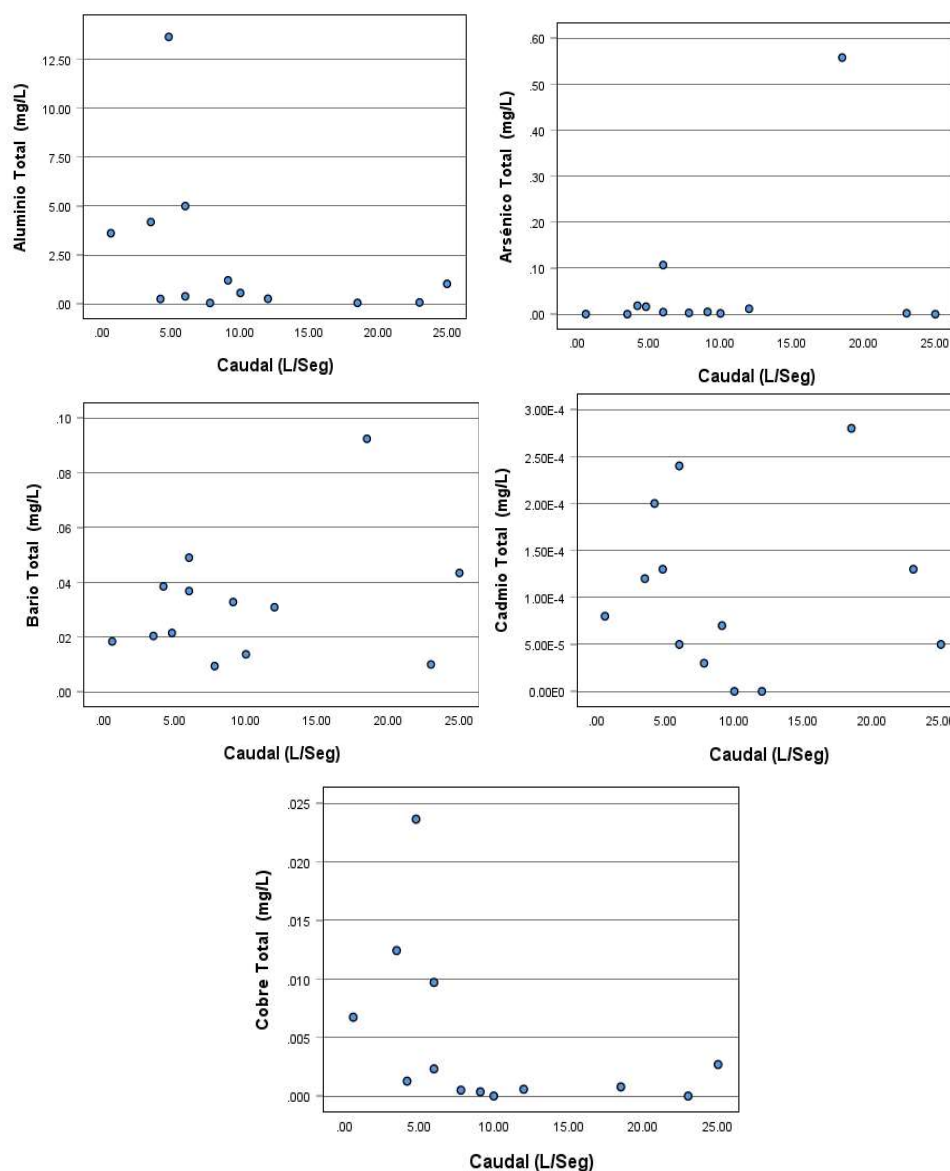


Figura 10.

Diagrama de dispersión para la relación del caudal con la concentración de metales (aluminio, arsénico, bario, cadmio y cobre) en agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024

En las Figuras 10 y 11 se muestran los diagramas de dispersión de los caudales de los arroyos con los metales considerados en el estudio. No se observa ninguna tendencia con excepción, de cobre y níquel, donde aparentemente se incrementan a menor caudal. Si embargo, en el Anexo 13, las pruebas de

Sperman no presentó significancia estadística ($p>0,05$) en ningún caso, por lo que no hay evidencia de que el caudal del agua de los arroyos condicione la concentración de los metales hallados.

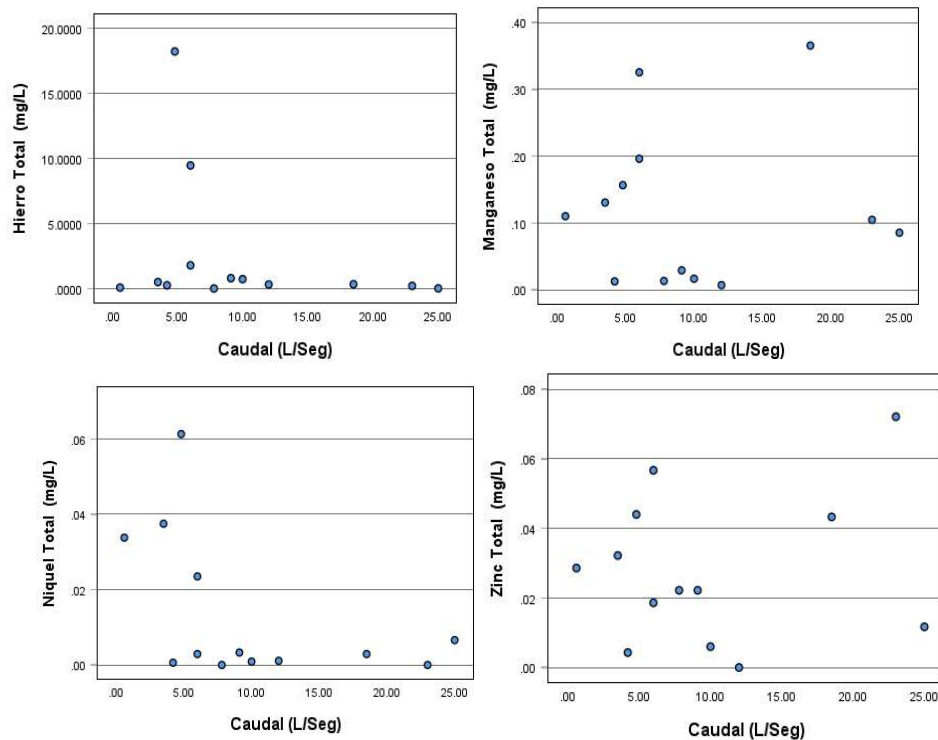


Figura 11.

Diagrama de dispersión para la relación del caudal con la concentración de metales (hierro, manganeso, níquel y zinc) en agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.

En la Figura 12 se muestra los dendogramas de similitud de los arroyos en función de las características físicas y químicas, como promedio de las dos épocas de muestreo (a), para marzo (época húmeda) y para julio (época seca). El dendograma del promedio y de julio muestran ciertas semejanzas, con la presencia de tres agrupaciones, una de ellas formada por solo P6, el segundo por P3, P7, P4 y P5, mientras que el tercer formado por los arroyos que se hallan a mayor altitud. La singularidad de P6 se debe a que presenta el mayor

caudal entre los arroyos, además de dureza total y conductividad eléctrica; mientras que P2 y P1 presenta los mayores promedios de sulfatos y los menores de pH. Se debe considerar que la ausencia de lluvias hace que los iones disueltos se concentren más. En el dendograma correspondiente a marzo (época húmeda), se puede observar dos agrupaciones, P6 que claramente el que presenta menor similitud y el resto de arroyos que conforman otra agrupación, en la que P2 y P3, se hacen más similares a los otros arroyos. Dicho comportamiento, probablemente se deba a la acción diluyente que ejerce las aguas provenientes de las lluvias, lo que disminuye los valores de la conductividad e incrementa el pH.

En la Figura 13, se muestra los dendogramas de similitud de los siete arroyos monitoreados, elaborados en base al promedio de las concentraciones de metales presentes en el agua (a), al valor registrados en marzo (b) y en julio (c). En las tres figuras, se observa prácticamente la formación de tres agrupaciones, donde P2 es el que presenta menor similitud (singular), debido a que presenta las mayores concentraciones de aluminio y hierro. P1 tiende a presentar características similares, sin embargo, los valores de los metales señalados, no son elevados. Mientras que el resto de arroyos presentan valores de los metales mucho más bajos y similares entre sí. En base a los hallazgos, podemos afirmar que el comportamiento de P2, en cuanto se refiere a metales, es similar tanto en época húmeda como seca.

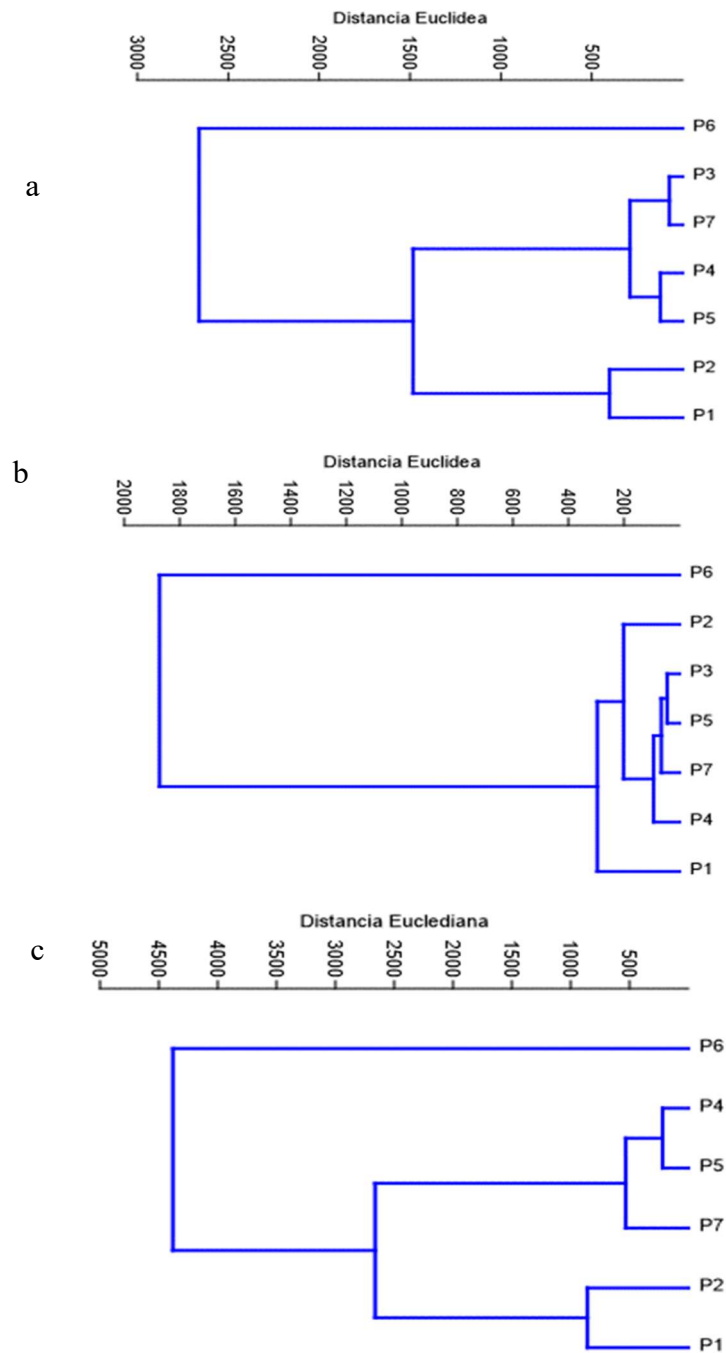


Figura 12.

Dendograma de similitud para los arroyos en base de las características físicas y químicas de sus aguas cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024. a: Para los dos meses (promedio) con; b: Para marzo (época húmeda); c. Para julio (época seca)

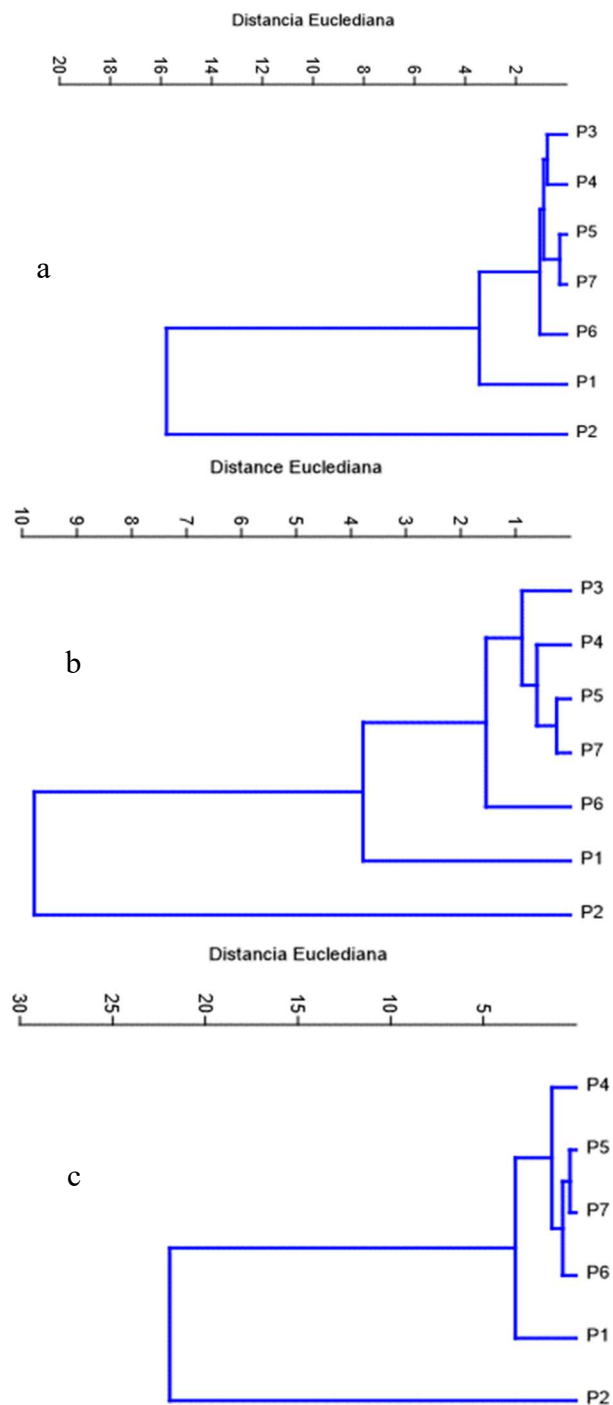


Figura 13.

Dendrograma de similitud para los arroyos en base la presencia de metales en sus aguas cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024. a: Para los dos meses (promedio) con; b: Para marzo (época húmeda); c. Para julio (época seca)

En la Figura 14 se muestra el biplot del análisis de componentes principales de los arroyos en base a las características físicas-químicas y de la concentración de metales en sus aguas. Los dos primeros componentes representados explican el 79,4 % de la varianza, por lo que dicho análisis recoge mucho de lo hallado en la investigación. En la figura en mención se observa la formación de dos agrupaciones importantes, por un lado, en el que se hallan P2 y P1 y donde se orienta los vectores de turbidez, sulfatos, hierro, cobre, níquel y aluminio, lo que indica que en las aguas de dichos arroyos se hallan en mayor cantidad o concentración, Mientras que la otra agrupación está constituida por P6, a los que se orienta manganeso, zinc, la conductividad, dureza total, cadmio, arsénico, bario y caudal.

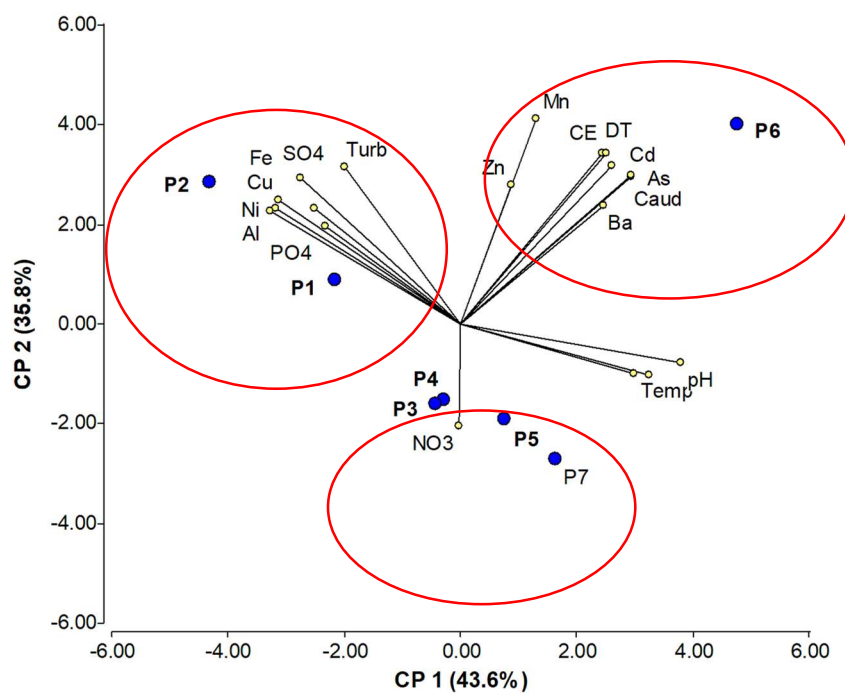


Figura 14.

Biplot para los dos primeros componentes principales para siete arroyos en base las características físicas-químicas y metales en sus aguas, cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.

La representación de los dos primeros componentes del análisis de componentes principales pone en evidencia que a la altitud donde se encuentra P2 y P1, ocurre la presencia del drenaje ácido de roca natural, ya que por dicha zona no existe la presencia de actividad minera. El DAR por lo tanto, es consecuencia de las características geoquímicas de la zona que con la presencia de agua ocurre lixiviación de metales sulfurados, más el oxígeno que permite la formación de ácidos. Por ello en dichas zonas son menores los valores de pH, con el consecuente incremento de las concentraciones de los sulfatos, aluminio, hierro y cobre. También se puede observar en la figura en mención, la agrupación de los arroyos P3, P4, P5 y P7, donde los valores de las características físicas y químicas, así como de los metales, observan concentraciones intermedias entre los dos primeros grupos.

4.4. Prueba de hipótesis

a. Las características fisicoquímicas del agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi varían significativamente.

H₀: Las características fisicoquímicas del agua de los arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi no homogéneas (no varían)

H_i: Las características fisicoquímicas del agua de los arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi es homogéneas.

Resultado estadístico: Se muestra en el Anexo 7, donde halló diferencia significativa en alcalinidad, dureza total, pH, temperatura, conductividad eléctrica, sulfatos, fosfatos, nitratos.

Decisión: Se acepta la hipótesis alterna

Interpretación: Los arroyos son diferentes en cuanto a las características fisicoquímicas con excepción de la turbidez

b. La distribución espacial de los metales pesados varía entre los arroyos

H0: La distribución espacial de los metales pesados en el agua de los arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi es semejante.

Hi: La distribución espacial de los metales pesados en el agua de los arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi es diferente.

Resultado estadístico: Se muestra en el Anexo 10, donde no se halló diferencia significativa aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc.

Decisión: Se acepta la hipótesis nula

Interpretación: Los arroyos son semejantes en cuanto a los metales aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc.

c. Relación de la concentración de metales pesados con la altitud en la que se hallan los arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi

H0: No existe relación entre la concentración de los metales pesados con la altitud a la cual se hallan los arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi con la altitud.

Hi: Existe relación entre la concentración de los metales pesados con la altitud a la cual se hallan los arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi con la altitud.

Resultado estadístico: Se muestra en el Anexo 13, donde se observa que existe relación significativa de la altitud con aluminio, arsénico, cobre y níquel.

Decisión: Se acepta la hipótesis alterna

Interpretación: La altitud en la que se hallan los arroyos está relacionado significativamente con la concentración de aluminio, arsénico, cobre y níquel presente en sus aguas.

d. Relación de la concentración de metales pesados con el caudal de los arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi

H0: No existe relación entre la concentración de los metales pesados con el caudal de los arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi con la altitud.

Hi: Existe relación entre la concentración de los metales pesados con el caudal de los arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi con la altitud.

Resultado estadístico: Se muestra en el Anexo 13, donde se observa que no existe relación significativa entre la concentración de los metales pesados con el caudal de los arroyos.

Decisión: Se acepta la hipótesis nula

Interpretación: El caudal que presenta los arroyos no está relacionado significativamente con la concentración de los metales pesados.

CONCLUSIONES

1. Las características fisicoquímicas de las aguas de los arroyos, muestran valores heterogéneos que los diferencian significativamente ($p < 0,05$) uno de otros. Se observa menores valores de alcalinidad, pH, temperatura y mayores de sulfatos para los ubicados a mayor altitud (P2 y P1), presentando correlación (Sperman) significativa con la altitud. Uno de los arroyos, P6, se comporta singularmente al presentar los mayores valores de dureza total, conductividad y caudal.
2. Las concentraciones de metales en las aguas de los arroyos son heterogéneas, con mayores valores de aluminio, cobre y níquel en aquellos ubicados a mayor altitud (P2 y P1); mientras que arsénico se comporta de manera contraria que presenta mayor concentración en un arroyo de menor altitud (P6). Los metales mencionados observan correlación significativa (Sperman) con la altitud.
3. Se registró un total de nueve metales presentes en el agua de los siete arroyos, donde P2 y P6, presentan el mayor número (8). Los arroyos pertenecen al primer orden por hallarse en la cabecera de la cuenca.

RECOMENDACIONES

1. Realizar monitoreos de la calidad de agua con mayor frecuencia, abarcando un mayor número de meses con la finalidad de detectar variaciones temporales con mayor detalle.
2. Monitorear un mayor número de arroyos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, abarcando otras zonas diferentes a la estudiada, con la finalidad de tener mayor información que permita generalizar los hallazgos en un contexto espacial.
3. Evaluar el sistema fluvial de la cabecera de la cuenca del río Cachi, considerando un mayor número de características físicas y químicas, así como de metales, con la finalidad de determinar la aptitud de dichas aguas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. Springer Science & Business Media.
- Alvarenga, P., Guerreiro, N., Simões, I., Imaginário, M. J., & Palma, P. (2021). Assessment of the Environmental Impact of Acid Mine Drainage on Surface Water, Stream Sediments, and Macrophytes Using a Battery of Chemical and Ecotoxicological Indicators. *Water*, 13(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/w13101436>
- Anawar, H. Md. (2013). Impact of climate change on acid mine drainage generation and contaminant transport in water ecosystems of semi-arid and arid mining areas. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Contamination in Water*, 58-60, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.04.002>
- APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23RD ed.). American Public Health Association.
- Arellano, J., & Guzmán, J. (2011). *Ingeniería ambiental*. Alpha Editorial.
- Arroyo, M. T. K., & Cavieres, L. A. (2013). High-Elevation Andean Ecosystems. En S. A. Levin (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)* (pp. 96-110). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00428-7>
- Autoridad Nacional del Agua. (2016, marzo). *Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales*. <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/protocolo-nacional-para-el-monitoreo-de-la-calidad-de-los-recursos-hidricos-0>
- Bálintová, M., Singovszká, E., Holub, M., & Demčák, Š. (2019). Influence of Acid Mine Drainage on Surface Water Quality. En A. M. Negm & M. Zeleňáková (Eds.), *Water Resources in Slovakia: Part I: Assessment and Development* (pp. 239-258). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/698_2017_220

- Brack, A., & Mendiola, C. (2010). *Ecología del Perú* (Tercera Edición). Bruño.
- Carrasco, C., Rayme, C., Alarcón, R. del P., Ayala, Y., Arana, J., & Aponte, H. (2020). Macroinvertebrados acuáticos en arroyos asociados con bofedales altoandinos, Ayacucho Perú. *Revista de Biología Tropical*, 68(S2), Article S2. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68iS2.44344>
- Ccanccapa-Cartagena, A., Chavez-Gonzales, F. D., Paredes, B., Vera, C., Gutierrez, G., Valencia, R., Lucia Paz Alcázar, A., Zyaykina, N. N., Filley, T. R., & Jafvert, C. T. (2023). Seasonal differences in trace metal concentrations in the major rivers of the hyper-arid southwestern Andes basins of Peru. *Journal of Environmental Management*, 344, 118493. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118493>
- Chacón, M. Y. (2017). *Análisis físico y químico de la calidad del agua*. Ediciones USTA.
- Chang, R. (2011). *Fundamentos de química*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Choque, Y., & Estremadoyro, M. B. (2024). *Contaminación ambiental por metales pesados en el río Piñog Condesuyos—Arequipa, 2022* [Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica del Perú]. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/8917>
- Crisanto-Rojas, N., & Iannacone, J. (2023). Evaluación del impacto de la acidificación en la calidad del agua de la quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(185). <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1950>
- Dashtey, A. (2024). Fate and Transport of Heavy Metals in Soil, Surface Water, and Groundwater: Implications for Environmental Management. *International Journal of Scientific Research and*

Management (IJSRM), 12(12), 202-215.
<https://doi.org/10.18535/ijssrm/v12i12.c01>

De La Cruz, F. (2017). *Impacto ambiental potencial de metales pesados en el río Apacheta por presencia de yacimientos mineros en la Región Ayacucho* [Tesis Posgrado]. Universidad Nacional de San Crsitóbal de Huamanga.

Domínguez, E., & Vega, D. (eds). (2015). *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes*.
<https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/3576>

Downing, B. W., & Jacobs, J. A. (2014). Acid Rock Drainage as Related to Permafrost, Glaciers, and Climate Change. En *Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils* (pp. 185-189). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118749197.ch15>

Dudgeon, D. (2011). *Tropical Stream Ecology*. Elsevier.

Egiebor, N. O., & Oni, B. (2007). Acid rock drainage formation and treatment: A review. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2(1), 47-62. <https://doi.org/10.1002/apj.57>

Elosegui, A. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* (1.^a ed.). Fundacion BBVA.

Encalada, A., Suarez, E., Mena, C., Lessmann, J., Guayasamin, J., Sampedro, C., Martinez, P., Ochoa-Herrera, V., Swing, K., Celinscak, M., Vieira, J., Tapia, A., Schreckinger, J., Serrano, C., Barragán Figueroa, K., Andrade, S., Alexiades, A., & Troya, M. (2019). *Los ríos de las cuencas Andino-Amazónicas: Herramientas y guía de invertebrados para el diseño efectivo de programas de monitoreo*.

Gomes, P., & Valente, T. (2024). Seasonal impact of acid mine drainage on water quality and potential ecological risk in an old sulfide exploitation. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(14), 21124-21135. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32367-1>

- Hernández, R. H. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana.
- Izquierdo, J. L., & Verástegui, S. P. (2017). *Concentración de metales pesados (As, Cd, Cr, Hg y Pb) en el agua de la cuenca baja del río Jequetepeque, en relación a los estándares de calidad del agua— Categoría 3, Cajamarca—2016* [Tesis de Licenciatura, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo]. <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/213>
- Jacobs, J. A. (2014). Acid Sulfate Soils. En *Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils* (pp. 191-196). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118749197.ch16>
- Jacobs, J. A., Lehr, J. H., & Testa, S. M. (2014). *Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation*. John Wiley & Sons.
- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). *Trace Elements From Soil to Human*.
- La Matta, F. (2020). *Influencia del drenaje ácido de roca en la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, índices bióticos de calidad de agua y grupos funcionales alimenticios en ríos y cabeceras de la Cordillera Blanca (subcuenca de Quillcay, Ancash)*. <https://repositorio.upch.edu.pe/handle/20.500.12866/8533>
- Laws, E. A. (2017). *Aquatic Pollution: An Introductory Text*. John Wiley & Sons.
- Leiva-Tafur, D., Rascón, J., Fuente, F. C. de la, Goñas, M., Torres, O. A. G., & Oliva-Cruz, M. (2024). Spatio-temporal evaluation of metals and metalloids in the water of high Andean livestock micro-watersheds, Amazonas, Peru. *Heliyon*, 10(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33013>
- Loayza, R. (2014). *Calidad de agua en cabeceras de cuencas altoandinas en el contexto de Cambio Climático (nota técnica)*. MINAM.

<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/nota-tecnica-02-calidad-agua-cabeceras-cuencas-altoandinas-contexto>

- Loayza-Muro, R. A., Duivenvoorden, J. F., Kraak, M. H. S., & Admiraal, W. (2014). Metal leaching, acidity, and altitude confine benthic macroinvertebrate community composition in Andean streams. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(2), 404-411. <https://doi.org/10.1002/etc.2436>
- Lozano-Rivas, W. (2013). *Calidad fisicoquímica del agua.: Métodos simplificados para su muestreo y análisis*. Universidad Piloto de Colombia.
- Maldonado, M. A. (2018). *Antropoceno: La política en la era humana*. Penguin Random House Grupo Editorial España.
- Manezes, M., & Bicudo, C. E. de M. (2022). *Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: Chave para identificação e descrições*. RiMa.
- Maurice-Bourgoin, L., Alanoca, L., Fraizy, P., & Vauchel, P. (2003). Sources of mercury in surface waters of the upper Madeira erosive basins, Bolivia. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 107, 855-858. <https://doi.org/10.1051/jp4:20030432>
- Molles, M. C. (2006). *Ecología: Conceptos y aplicaciones*. McGraw Hill Education, McGraw-Hill Interamericana.
- Montano, Y., Tapia, P., & Fuentealba, B. (2022). *El drenaje ácido de roca y sus potenciales impactos ambientales (folleto)*. Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña – Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (DIEM-INAIGEM). <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/dfbf0722-66de-4e1f-b226-ce40c090f313>
- Moreno-Aguirre, S. B., Vértiz-Osores, J. J., Paredes-Espinal, C. E., Meseth, E., Vélchez-Ochoa, G. L., Espino-Ciudad, J. A., & Pino, L. F. del. (2024). Ecological risk of metals in Andean water resources: A

- framework for early environmental assessment of mining projects in Peru. *Heliyon*, 0(0). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30739>
- Passarelli, I., Mora-Silva, D., Jimenez-Gutierrez, M., Logroño-Naranjo, S., Hernández-Allauca, D., Valdez, R. U., Avalos Peñafiel, V. G., Tierra Pérez, L. P., Sanchez-Salazar, M., Tobar Ruiz, M. G., Carrera-Silva, K., Straface, S., & Mestanza-Ramón, C. (2024). Hg Pollution in Groundwater of Andean Region of Ecuador and Human Health Risk Assessment. *Resources*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/resources13060084>
- Patnaik, P. (2010). *Handbook of Environmental Analysis: Chemical Pollutants in Air, Water, Soil, and Solid Wastes, Second Edition*. Taylor & Francis.
- Pérez, G., & Restrepo, J. J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Universidad de Antioquia.
- Ramírez, A. (1999). *Ecología aplicada: Diseño y análisis estadístico*. U. Jorge Tadeo Lozano.
- Rojas, J. (2002). *Calidad del agua*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Roldán Pérez, G. (1992). *Fundamentos de limnología neotropical*. Universidad de Antioquia.
- Rue, G. P., & McKnight, D. M. (2021). Enhanced Rare Earth Element Mobilization in a Mountain Watershed of the Colorado Mineral Belt with Concomitant Detection in Aquatic Biota: Increasing Climate Change-Driven Degradation to Water Quality. *Environmental Science & Technology*, 55(21), 14378-14388. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02958>
- Santos, L., & López, S. (2015). *Valoración de servicios ecosistémicos generados por la construcción de infraestructuras: Desarrollo de la metodología*. Ediciones Universidad de Salamanca.
- Sierra, C. A. (2021). *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*. Ediciones de la U.

- Simate, G. S., & Ndlovu, S. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1785-1803. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.021>
- Singh, B. R., & Steinnes, E. (1994). Soil and Water Contamination by Heavy Metals. En *Soil Processes and Water Quality*. CRC Press.
- Smith, T. M., & Smith, R. L. (2015). *Elements of Ecology* (9 ed). Pearson.
- Sojka, M., & Jaskuła, J. (2022). Heavy Metals in River Sediments: Contamination, Toxicity, and Source Identification—A Case Study from Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17). <https://doi.org/10.3390/ijerph191710502>
- Somers, L. D., & McKenzie, J. M. (2020). A review of groundwater in high mountain environments. *WIREs Water*, 7(6), e1475. <https://doi.org/10.1002/wat2.1475>
- Spitzer, P., Reichmann, E., & Tassoti, S. (2024). Acid Mine Drainage: Was schmelzender Permafrost mit Schwermetallen in Bergseen zu tun hat. *CHEMKON*, 31(8), 311-314. <https://doi.org/10.1002/ckon.202400027>
- Stevenson, R., & Sabater, S. (2010). *Global Change and River Ecosystems—Implications for Structure, Function and Ecosystem Services*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0608-8>
- Tapia, J., Schneider, B., Inostroza, M., Álvarez-Amado, F., Luque, J. A., Aguilera, F., Parra, S., & Bravo, M. (2021). Naturally elevated arsenic in the Altiplano-Puna, Chile and the link to recent (Mio-Pliocene to Quaternary) volcanic activity, high crustal thicknesses, and geological structures. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 102905. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102905>
- Tong, L., Peng, X., Chen, D., Chen, Y., Wen, Y., Wang, W., & Liu, X. (2022). Characterization and risk assessment of soil around waste rock heaps affected by acid rock drainage in an abandoned pyrite mining area.

- Tyller, G. (2006). *Essentials of Ecology*. Thomson, Brooks/Cole.
- Valdez-Núñez, L. F., Kappler, A., Ayala-Muñoz, D., Chávez, I. J., & Mansor, M. (2024). Acidophilic sulphate-reducing bacteria: Diversity, ecophysiology, and applications. *Environmental Microbiology Reports*, 16(5), e70019. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.70019>
- Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A. G., & Pigna, M. (2010). Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *Journal of soil science and plant nutrition*, 10(3), 268-292. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000100005>
- Zimmer, A., Brito, M., Oropeza, C., León, J., & Bullard, J. (2018). Implementación de dos Sistemas de Biorremediación como Estrategia para la Prevención y Mitigación de los Efectos del Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca, Perú. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. <https://doi.org/10.36580/rgem.i4.57-76>

ANEXO

Anexo 1.

Matriz de consistencia

TITULO: Distribución espacial de metales pesados en arroyos altoandinos de la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.					
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	MARCO TEORICO	METODOLOGÍA
Problema general ¿Cómo se distribuye los metales pesados espacial y temporalmente en el agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024? Problemas específicos a. ¿Cuál es la distribución espacial de metales pesados en el agua según el orden de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024? b. ¿Cuál es la relación de la concentración de metales pesados con las características hidromorfológicas de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024? c. ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024?	Objetivo general Evaluar la distribución de los metales pesados, espacial y temporalmente, en el agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024 Objetivos específicos a. Determinar la distribución espacial de metales pesados en el agua según el orden de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024. b. Estimar la relación de la concentración de metales pesados con las características hidromorfológicas de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024 c. Evaluar las características fisicoquímicas del agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024.	Hipótesis general La distribución de los metales pesados, varía espacial y temporalmente en el agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024 Hipótesis específicas a. La distribución espacial de metales pesados es significativamente variable en el agua según el orden de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024. b. Existe relación significativa entre la concentración de metales pesados con las características hidromorfológicas de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi, en el departamento de Ayacucho durante el años 2024 c. Las características fisicoquímicas del agua de arroyos altoandinos en la cabecera de la cuenca del río Cachi son variables significativamente en el departamento de Ayacucho durante el años 2024	Variable dependiente a. Metales pesados en el agua Indicadores - Aluminio - Arsénico - Hierro - Manganeso - Zinc - Plomo - Mercurio - Otros metales pesados. b. Características fisicoquímicas Indicadores - Conductividad eléctrica - Sólidos disueltos totales - Turbidez - pH - Oxígeno disuelto - Dureza total - Cloruro Variable independiente Arroyos altoandinos Dimensión e indicadores - Características hidromorfológicas (Caudal, profundidad máxima, ancho de cauce, altitud	Los sistemas fluviales altoandinos Características fisicoquímicas de los ríos altoandinos Metales pesados	Tipo de investigación: Básica Nivel de investigación: Descriptiva, Comparativa Método: Analítico Muestreo: Aleatoria Técnicas: Observación Instrumentos: Observación

Validación del instrumento

Anexo 2.

Equipos de laboratorio empleados en la recopilación de datos para la investigación

En la investigación, los instrumento empleado fue la observación, con el apoyo de los siguientes equipos de laboratorio:



Multiparámetro portátil



GPS navegador



Espectrofotómetro



Turbidímetro

Anexo 3.

Reporte de los resultados de los análisis realizado por el laboratorio SGS de la ciudad de Lima, correspondiente al mes de marzo y julio



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2416944 Rev. 0

CARRASCO BADAJOZ CARLOS EMILIO

AVENIDA AVIACIÓN 162 AYACUCHO - AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO

ENV / LB-354889-004

PROCEDENCIA : VARIOS (APACHETA - AYACUCHO Y RAZUHUILCA - HUANATA)

Fecha de Recepción SGS : 30-05-2024

Fecha de Ejecución : Del 30-05-2024 al 06-06-2024

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
P-1
P-2
P-5
P-6
P-7
P-8
P-9
M-1
M-2

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 06/06/2024

Frank M. Julcamoro Quispe
C.Q.P. 1033
Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Página 1 de 12



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2427672-0

CARRASCO BADAJOZ CARLOS EMILIO

AVENIDA AVIACIÓN 162 AYACUCHO - AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO

ENV / LB-355215-002

PROCEDENCIA : VARIOS

Fecha de Recepción SGS : 27-08-2024

Fecha de Ejecución : Del 27-08-2024 al 06-09-2024

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
P1
P2
P3
P4
P5
P7
P8

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 06/09/2024

Frank M. Julcamoro Quispe

C.Q.P. 1033

Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 10



SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao
Arequipa
Cajamarca

t (511) 517 1900
t (054) 213 505
t (078) 396 092

www.sgs.pe
o Pa.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS

Anexo 4.

Prueba de normalidad de los datos físico-químicos registrados en las aguas de siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

Características físicas y químicas	N	Parámetros normales ^{a,b}		Máximas diferencias extremas			Estad. de prueba	Sig. (bilater.)
		Med.	Desv. estándar	Absol	Posit	Negat		
Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	39	21,49	17,61	0,16	0,16	-0,11	0,16	0,01
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	39	88,74	130,24	0,32	0,32	-0,28	0,32	0,00
pH	39	5,76	1,63	0,18	0,11	-0,18	0,18	0,00
Conductividad eléctrica (uS/cm)	39	594,05	1136,96	0,38	0,38	-0,32	0,38	0,00
Turbidez (NTU)	39	20,67	9,86	0,32	0,22	-0,32	0,32	0,00
Temperatura °C	39	10,83	2,63	0,11	0,10	-0,11	0,11	,200 ^e
Sulfatos (mg/L)	39	695,89	1079,62	0,29	0,29	-0,26	0,29	0,00
Fosfatos (mg/L PO ₃)	35	2,15	3,11	0,34	0,34	-0,24	0,34	0,00
Nitratos (mg/L NO ₃)	39	0,48	0,35	0,22	0,22	-0,14	0,22	0,00
Caudal (L/Seg)	13	165,8	495,53	0,46	0,46	-0,37	0,46	0,00

a. La distribución de prueba es normal.

b. Se calcula a partir de datos.

c. Corrección de significación de Lilliefors.

Anexo 5.

Características físicas-químicas registrados en las aguas de siete arroyo andinos para marzo 2024 (época húmeda) de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

Características físicas-químicas	Zonas de muestreo						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	6,67	6,00	7,33	23,00	17,33	45,33	42,00
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	70,33	42,00	22,67	32,00	12,67	96,00	26,00
Turbidez (NTU)	21,20	21,37	22,20	21,47	22,17	23,03	25,57
Sulfatos (mg/L)	200,53	207,31	33,63	40,34	14,23	91,70	0,20
Fosfatos (mg/L PO ₃)	1,13	0,40	1,72	1,07	0,24	0,44	2,65
Nitratos (mg/L NO ₃)	0,23	0,30	0,86	0,25	0,47	0,54	1,40
Temperatura °C	8,57	12,50	11,27	10,40	10,70	13,20	16,20
Conductividad eléctrica (uS/cm)	382,00	182,00	180,33	61,00	142,67	716,67	112,00
pH	4,91	4,48	5,12	6,72	6,81	7,48	7,68
Caudal (L/Seg)	3,50	6,00	25,00	10,00	23,00	1800,00	12,00
Orden	1	1	1	1	1	1	1

Anexo 6.

Características físicas-químicas registrados en las aguas de siete arroyo andinos para julio 2024 (época seca) de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

Características físicas-químicas	Zonas de muestreo					
	P1	P2	P4	P5	P6	P7
Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	0,00	0,00	15,33	34,00	28,00	54,33
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	129,33	70,67	30,00	52,67	520,67	48,67
Turbidez (NTU)	25,77	38,83	23,20	0,40	23,20	0,33
Sulfatos (mg/L)	2686,70	3461,73	729,43	515,50	974,67	90,60
Fosfatos (mg/L PO ₃)	0,00	11,80	1,90	0,00	2,42	1,25
Nitratos (mg/L NO ₃)	0,21	0,82	0,35	0,36	0,07	0,38
Temperatura °C	6,50	6,43	9,23	11,40	12,27	12,10
Conductividad eléctrica (uS/cm)	360,00	720,67	171,00	140,00	4411,67	142,67
pH	3,72	2,70	4,34	5,81	7,83	7,26
Caudal (L/Seg)	0,60	4,80	9,10	7,80	250,00	4,20
Orden	1	1	1	1	1	1

Anexo 7.

Prueba de Kruskal-Wallis para comparar las características físicas-químicas de siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

Estadísticos de prueba^{a,b}

Características físicas y químicas	H de Kruskal-Wallis	gl	Sig, asin,
Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	33,708	6	0,000
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	28,379	6	0,000
pH	32,088	6	0,000
Turbidez (NTU)	7,738	6	0,258
Temperatura °C	25,640	6	0,000
Conductividad eléctrica (uS/cm)	32,130	6	0,000
Sulfatos (mg/L)	19,026	6	0,004
Fosfatos (mg/L PO ₃)	13,220	6	0,040
Nitratos (mg/L NO ₃)	21,853	6	0,001
Caudal (L/Seg)	10,154	6	0,118

a, Prueba de Kruskal Wallis

b, Variable de agrupación: Zonas de muestreo

Anexo 8.

Valores de metales registrados en las aguas de siete arroyo andinos para marzo (época húmeda) de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

	Zonas de muestreo						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Aluminio Total (mg/L)	4,182	4,999	1,021	0,556	0,072	0,384	0,260
Arsénico Total (mg/L)	0,000	0,004	0,000	0,002	0,002	0,107	0,012
Bario Total (mg/L)	0,020	0,037	0,043	0,014	0,010	0,049	0,031
Cadmio Total (mg/L)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cobre Total (mg/L)	0,012	0,010	0,003	0,000	0,000	0,002	0,001
Hierro Total (mg/L)	0,533	9,472	0,047	0,759	0,243	1,818	0,349
Manganeso Total (mg/L)	0,131	0,196	0,085	0,017	0,105	0,325	0,007
Niquel Total (mg/L)	0,038	0,024	0,007	0,001	0,000	0,003	0,001
Zinc Total (mg/L)	0,032	0,019	0,012	0,006	0,072	0,057	0,000
Presencia metales (n°)	7	8	6	7	6	8	7

Anexo 9.

Valores de metales registrados en las aguas de siete arroyo andinos para julio (época seca) de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024.

Metales	Zonas de muestreo					
	P1	P2	P4	P5	P6	P7
Aluminio Total (mg/L)	3,610	13,645	1,202	0,045	0,050	0,250
Arsénico Total (mg/L)	0,000	0,016	0,005	0,003	0,558	0,018
Bario Total (mg/L)	0,018	0,022	0,033	0,009	0,092	0,039
Cadmio Total (mg/L)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cobre Total (mg/L)	0,007	0,024	0,000	0,001	0,001	0,001
Hierro Total (mg/L)	0,111	18,211	0,829	0,041	0,366	0,287
Manganeso Total (mg/L)	0,110	0,157	0,029	0,013	0,365	0,013
Niquel Total (mg/L)	0,034	0,061	0,003	0,000	0,003	0,001
Zinc Total (mg/L)	0,029	0,044	0,022	0,022	0,043	0,004
Presencia metales (n°)	7	8	7	7	8	8

Anexo 10.

Prueba de Kruskal-Wallis para comparar la cantidad de metales pesados en las aguas de siete arroyo andinos de la cabecera de la cuenca Cachi, Ayacucho 2024

Estadísticos de prueba^{a,b}

	H de Kruskal- Wallis	gl	Sig, asin,
Aluminio Total (mg/L)	11,110	6	0,085
Arsénico Total (mg/L)	10,901	6	0,091
Bario Total (mg/L)	10,484	6	0,106
Cadmio Total (mg/L)	6,025	6	0,420
Cobre Total (mg/L)	11,190	6	0,083
Hierro Total (mg/L)	10,253	6	0,114
Manganeso Total (mg/L)	11,308	6	0,079
Niquel Total (mg/L)	11,006	6	0,088
Zinc Total (mg/L)	8,810	6	0,185

a, Prueba de Kruskal Wallis

b, Variable de agrupación: Zonas de muestreo

Anexo 11.

Anexo Análisis de componentes principales para siete arroyos en base a las características físicas-químicas y la concentración de metales en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024

*Datos estandarizados
Casos leídos 42*

Autovalores			
Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	8,28	0,44	0,44
2	6,8	0,36	0,79
3	2,26	0,12	0,91
4	0,91	0,05	0,96
5	0,4	0,02	0,98
6	0,35	0,02	1
7	0	0	1
8	0	0	1
9	0	0	1
10	0	0	1
11	0	0	1
12	0	0	1
13	0	0	1
14	0	0	1
15	0	0	1
16	0	0	1
17	0	0	1
18	0	0	1
19	0	0	1

Autovectores		
Variables	e1	e2
AT	0,28	-0,09
DT	0,21	0,3
Turb	-0,17	0,27
SO4	-0,24	0,25
PO4	-0,2	0,17
NO3	-2,40E-03	-0,18
Temp	0,26	-0,09
CE	0,22	0,3
pH	0,33	-0,07
Caud	0,26	0,26
Al	-0,28	0,2
As	0,25	0,26
Ba	0,21	0,21
Cd	0,23	0,28
Cu	-0,27	0,21
Fe	-0,22	0,2
Mn	0,11	0,36
Ni	-0,28	0,2
Zn	0,08	0,24

Anexo 12.

Correlación de Spearman para la altitud y caudal con las características físicas-químicas de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.

Características físicas-químicas	Estadísticos	Altitud (msnm)	Caudal (L/Seg)
Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	Coefficiente de correlación	-0,926**	0,468
	Sig, (bilateral)	0,000	0,107
	N	39	13
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	Coefficiente de correlación	0,154	-0,231
	Sig, (bilateral)	0,348	0,448
	N	39	13
Turbidez (NTU)	Coefficiente de correlación	0,126	0,149
	Sig, (bilateral)	0,444	0,628
	N	39	13
Sulfatos (mg/L)	Coefficiente de correlación	0,451**	-0,418
	Sig, (bilateral)	0,004	0,156
	N	39	13
Fosfatos (mg/L PO ₃)	Coefficiente de correlación	-0,146	0,171
	Sig, (bilateral)	0,403	0,576
	N	35	13
Nitratos (mg/L NO ₃)	Coefficiente de correlación	-0,359*	0,335
	Sig, (bilateral)	0,025	0,263
	N	39	13
Temperatura °C	Coefficiente de correlación	-0,732**	,613*
	Sig, (bilateral)	0,000	0,026
	N	39	13
Conductividad eléctrica (uS/cm)	Coefficiente de correlación	0,330*	0,017
	Sig, (bilateral)	0,040	0,957
	N	39	13
pH	Coefficiente de correlación	-0,859**	,654*
	Sig, (bilateral)	0,000	0,015
	N	39	13

*, La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral),

**, La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral),

Anexo 13.

Correlación de Spearman para la altitud y caudal con los metales presentes en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024.

Metales	Estadísticos	Altitud (msnm)	Caudal (L/Seg)
Aluminio Total (mg/L)	Coeficiente de correlación	0,795**	-0,500
	Sig, (bilateral)	0,001	0,082
	N	13	13
Arsénico Total (mg/L)	Coeficiente de correlación	-0,670*	0,333
	Sig, (bilateral)	0,012	0,266
	N	13	13
Bario Total (mg/L)	Coeficiente de correlación	-0,310	0,429
	Sig, (bilateral)	0,302	0,144
	N	13	13
Cadmio Total (mg/L)	Coeficiente de correlación	-0,171	0,119
	Sig, (bilateral)	0,576	0,700
	N	13	13
Cobre Total (mg/L)	Coeficiente de correlación	0,566*	-0,457
	Sig, (bilateral)	0,044	0,117
	N	13	13
Hierro Total (mg/L)	Coeficiente de correlación	0,169	0,000
	Sig, (bilateral)	0,581	1,000
	N	13	13
Manganeso Total (mg/L)	Coeficiente de correlación	0,357	0,176
	Sig, (bilateral)	0,231	0,566
	N	13	13
Níquel Total (mg/L)	Coeficiente de correlación	0,761**	-0,399
	Sig, (bilateral)	0,003	0,176
	N	13	13
Zinc Total (mg/L)	Coeficiente de correlación	0,219	0,173
	Sig, (bilateral)	0,472	0,571
	N	13	13

*, La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral),

**, La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral),

Anexo 14.

Registro fotográfico del proceso de investigación

Arroyo P1



Arroyo P2



Arroyo P3



Zona de muestreo P4



Zona de muestreo P5



Zona de muestreo P6



Zona de muestreo P7



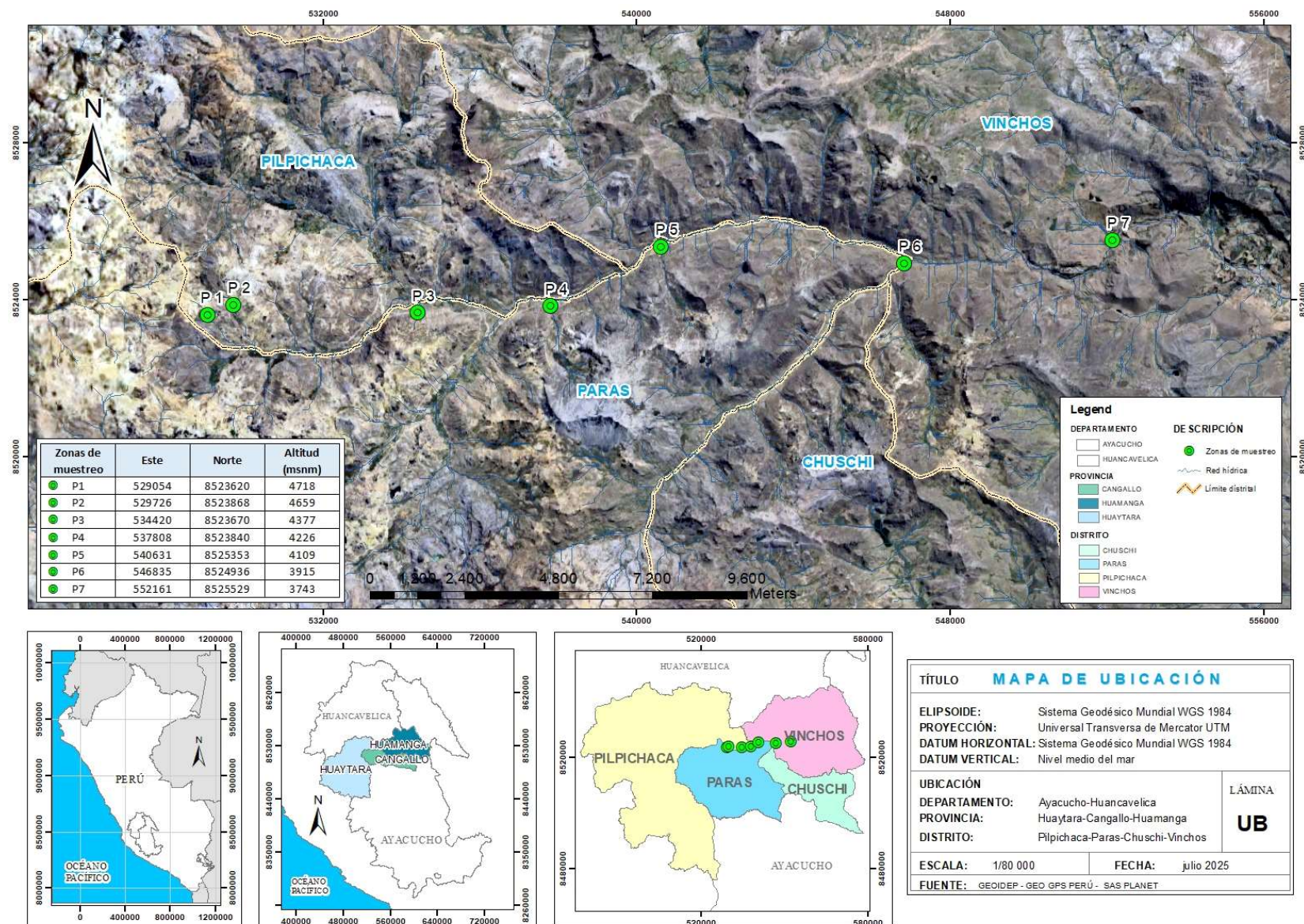
Anexo 15

Proceso de las determinaciones físicas y químicas del agua proveniente de los arroyos examinados



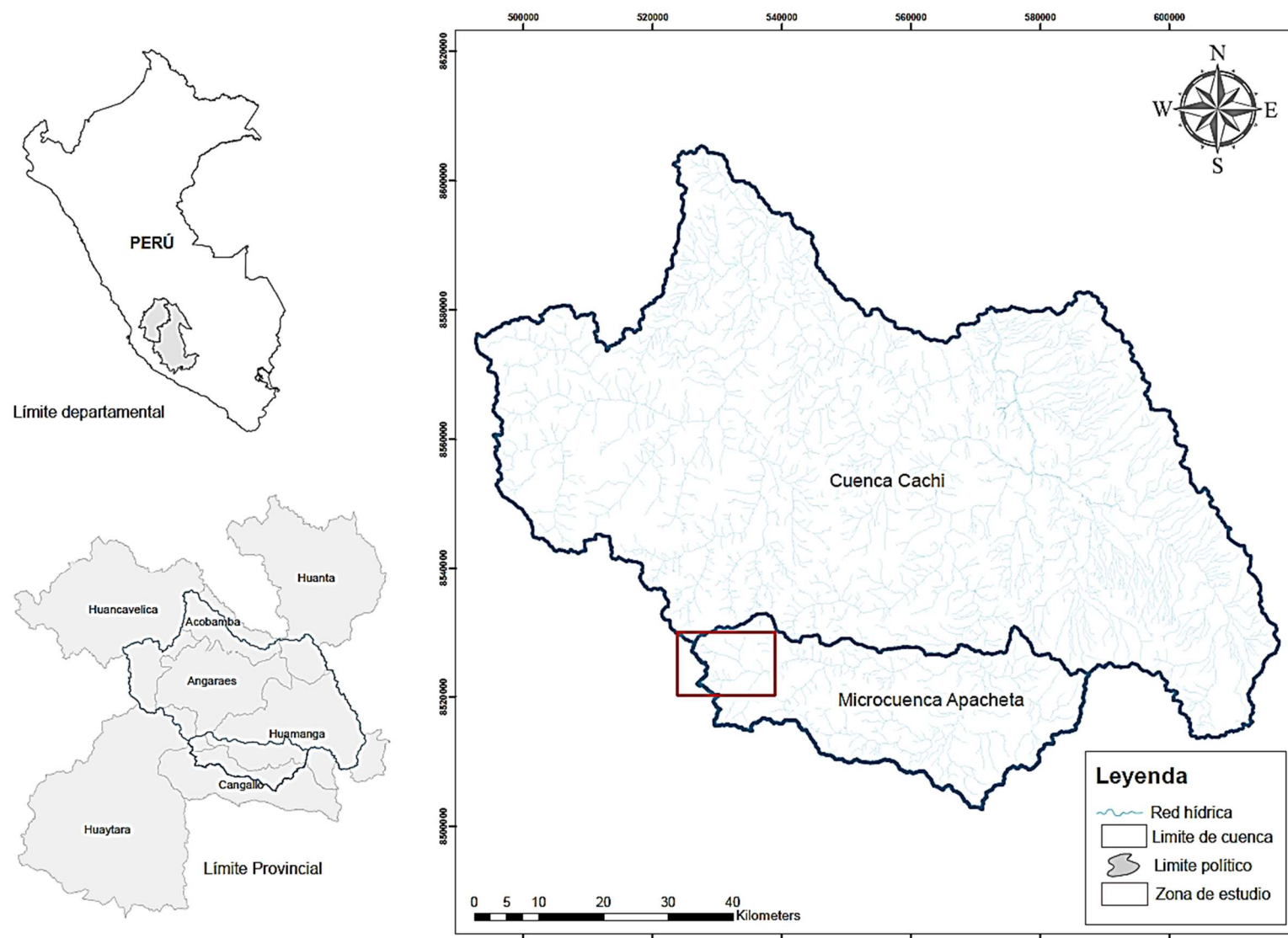
Anexo 16.

Mapa de ubicación de las zonas de muestreo



Anexo 17.

Mapa de ubicación de la cuenca del Cachi y microcuenca del Apacheta (donde se ubica la zona de estudio)



Artículo científico

Distribución espacial de metales pesados en arroyos altoandinos de la cuenta alta del río Cachi, Ayacucho 2024,

Cruzado Vásquez, Pedro¹; Carrasco Badajoz, Carlos Emilio¹; Carolina Rayme Chalco

¹ Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

RESUMEN

El agua que se genera en las cuencas altoandinas abastece a las necesidades humanas, en vista del cual es importante su monitoreo, principalmente a nivel de las cabeceras debido a las particularidades geoquímicas que presentan. Por ello se desarrolló el trabajo de investigación con la finalidad de determinar las características físicas-químicas (alcalinidad total, dureza total, turbidez, sulfatos, fosfatos, nitratos, temperatura, conductividad eléctrica y pH), así como la presencia de metales (aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc) en siete arroyos de la cabecera del río Cachi, ubicados de 3700 a 4700 msnm, las que fueron denominadas desde P1 hasta P7, donde las primeras se hallan a mayor altitud, para luego disminuir paulatinamente. Se desarrolló durante dos periodos de muestreo, en el marzo (época húmeda) y julio (época seca). Se realizaron determinaciones físicas y químicas in situ y en laboratorio, para este último fue necesario coleccionar muestras de agua. De acuerdo a las características físicas y químicas, así como de la concentración de metales pesados, se identificó que los arroyos ubicados a mayor altitud (P1 y P2), presentaron los menores valores de pH y alcalinidad, mientras que fueron mayores en sulfatos, aluminio, cobre y níquel, evidenciando que son afectados por el drenaje ácido de roca (DAR) natural. Sin embargo, existe la presencia de un arroyo ubicado a menor altitud (P6) en el que se caracteriza por presentar un mayor caudal, con mayores valores de conductividad eléctrica, arsénico, pH y caudal.

Palabras clave: cabecera de cuenca, lóticos, calidad, fisicoquímico, temporalidad

ABSTRACT

Water generated in high-Andean watersheds supplies human needs, in view of which its monitoring is important, mainly at the headwaters, due to the geochemical particularities they present. Therefore, this research was developed to determine the physicochemical characteristics (total alkalinity, total hardness, turbidity, sulfates, phosphates, nitrates, temperature, electrical conductivity, and pH), as well as the presence of metals (aluminum, arsenic, barium, cadmium, copper, iron, manganese, nickel, and zinc) in seven streams of the Cachi River headwaters. The sites, located between 3700 and 4700 m a.s.l., were designated P1 through P7, where the first

ones are at a higher altitude, gradually decreasing, The study was developed during two sampling periods: March (wet season) and July (dry season), Physical and chemical determinations were carried out in situ and in the laboratory; for the latter, it was necessary to collect water samples, According to the physicochemical characteristics, as well as the concentration of heavy metals, it was identified that the streams located at higher altitude (P2 and P2) presented the lowest values of pH and alkalinity, while they were higher in sulfates, aluminum, copper, and nickel, evidencing that they are affected by natural acid rock drainage (ARD), However, there is the presence of a stream located at a lower altitude (P6) which is characterized by presenting a greater flow, with higher values of electrical conductivity, arsenic, pH, and flow,

Keywords: headwater, lotic, quality, physicochemical, temporality

INTRODUCCIÓN

Los arroyos altoandinos son ecosistemas dinámicos, sensibles a las variaciones estacionales y al cambio climático, que altera los regímenes de precipitación y acelera el retroceso glaciar, afectando la disponibilidad y calidad del agua en las cabeceras de cuenca, Su agua es vital para la biodiversidad y usos humanos (consumo, riego, acuicultura), pero enfrenta amenazas por la presencia de metales pesados, Aunque frecuentemente asociada a la minería, esta contaminación también puede tener origen natural, vinculado a la geología local y procesos generados por el DAR (drenaje ácido de roca), En zonas de gran altitud, factores como el pH, la materia orgánica y la textura del suelo regulan la movilidad de metales; bajo condiciones ácidas, metales como aluminio, cobre o hierro se vuelven más solubles y tóxicos, Estos pueden bioacumularse en organismos acuáticos y representar riesgos sanitarios, especialmente en zonas rurales sin tratamiento de agua, Este estudio se enfocó en la cabecera de la cuenca del río Cachi (Ayacucho, Perú), por encima de los 4000 msnm, donde suelos con colores rojizos sugieren alteración geoquímica por minerales sulfurados, Se evaluó la presencia de metales pesados en época húmeda (marzo) y seca (junio) de 2024, con el objetivo de determinar si su distribución responde a factores naturales (especialmente el DAR) y no a actividades antropogénicas, dado que no hay minería activa en la zona, Los hallazgos aportan

información clave para entender los procesos que afectan la calidad del agua en ecosistemas altoandinos y para mejorar su gestión en contextos vulnerables,

MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en siete arroyos de primer orden ubicados en la cabecera de la cuenca del río Cachi, específicamente en la microcuenca del río Apacheta, en los departamentos de Ayacucho y Huancavelica (Perú). Las zonas de muestreo se distribuyeron a lo largo de la “Vía Los Libertadores”, entre los 3743 y 4718 msnm (Tabla 1). Esta zona se caracteriza por la ausencia de actividad minera actual, lo que permite evaluar el impacto de procesos geoquímicos naturales (como el drenaje ácido de roca) sobre la calidad del agua,

Tabla 1, Ubicación geográfica de las zonas de muestreo en los siete arroyos monitoreados

N°	Zona muestreo	Ubicación (UTM)			Departamento	Provincia	Distrito
		X	Y	Altitud (msnm)			
1	P1	529054	8523620	4718	Huancavelica	Huaytará	Pilpichaca
2	P2	529726	8523868	4659	Huancavelica	Huaytará	Pilpichaca
3	P3	534420	8523670	4377	Ayacucho	Paras	Cangallo
4	P4	537808	8523840	4226	Ayacucho	Paras	Cangallo
5	P5	540631	8525353	4109	Ayacucho	Paras	Cangallo
6	P6	546835	8524936	3915	Ayacucho	Paras	Cangallo
7	P7	552161	8525529	3743	Ayacucho	Huamanga	Vinchos

Diseño del estudio

Se empleó un enfoque cuantitativo, descriptivo y transversal. La investigación se clasifica como no experimental, ya que no se manipularon variables, sino que se observaron y registraron las condiciones naturales del agua en dos periodos

climáticos contrastantes: época húmeda (marzo) y época seca (julio) del año 2024, Este diseño permitió comparar la variabilidad espacial y temporal de las características fisicoquímicas del agua y la concentración de metales pesados,

Muestreo

Se recolectaron 14 muestras de agua (dos por arroyo: una en marzo y otra en julio), La selección de los arroyos fue determinística, priorizando aquellos ubicados por encima de los 3700 msnm y accesibles desde la vía principal, siguiendo criterios de la Autoridad Nacional del Agua (2016) y recomendaciones de Ramírez (1999), Las muestras se tomaron en zonas “río arriba”, alejadas de fuentes antropogénicas directas (como caminos o viviendas),

Para el análisis de metales pesados, se utilizaron frascos de polietileno de 120 mL, previamente enjuagados con agua del arroyo y acidificados con seis gotas de ácido nítrico concentrado para preservar los metales en solución, Las muestras fueron transportadas en refrigeración ($5^{\circ}\text{C} \pm 2$) al Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de Información Geográfica (BioSIG) de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, y posteriormente enviadas al Laboratorio SGS en Lima para su análisis mediante espectrometría de absorción atómica, Se consideraron únicamente los metales con valores numéricos reportados (no censurados con “<”),

Para las variables fisicoquímicas, se recolectaron muestras adicionales en frascos de 750 mL, siguiendo el mismo protocolo de cadena de custodia, Las mediciones in situ (pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos disueltos totales) se realizaron con un multiparámetro portátil (marca Hanna), Las determinaciones de laboratorio (dureza total, cloruros, sulfatos, nitratos, fosfatos y turbidez) se ejecutaron dentro de las 24 horas posteriores al muestreo, siguiendo los métodos estandarizados de APHA (2017) y Chacón (2017),

Además, se registraron características hidromorfológicas en cada punto: caudal (método del flotador), profundidad máxima (regla graduada), ancho del cauce (distanciómetro) y altitud (GPS navegador),

Análisis estadístico

Los datos se organizaron en matrices en Excel y se analizaron con los programas SPSS 25 e InfoStat, Primero, se evaluó la normalidad mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, Al confirmarse la no normalidad en la mayoría de las variables, se aplicaron pruebas no paramétricas,

Se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para comparar diferencias entre arroyos, Para explorar relaciones entre variables, se calcularon coeficientes de correlación de Spearman entre la altitud, el caudal y las variables fisicoquímicas/metales,

Además, se aplicaron técnicas multivariadas, siendo éstas análisis de conglomerados (cluster): para agrupar arroyos según similitudes en sus características fisicoquímicas y metálicas, También se llevó a cabo el análisis de componentes principales (ACP): para identificar las variables que explican la mayor proporción de la variabilidad entre los puntos de muestreo,

En todos los casos, se consideró un nivel de confianza del 95% ($p < 0,05$),

RESULTADOS

Los siete arroyos muestreados (P1 a P7), ubicados entre 3743 y 4718 msnm en la cabecera de la cuenca del río Cachi, mostraron una marcada heterogeneidad en sus propiedades fisicoquímicas, especialmente entre los puntos de mayor altitud (P1 y P2) y los de menor altitud (P6 y P7),

Los valores de pH fueron notablemente bajos en P1 y P2, con mínimos de 2,72 (P2, julio) y 3,72 (P1, julio), mientras que en P6 y P7 el pH superó la neutralidad, alcanzando 7,63 (P7, marzo), Esta tendencia inversa con la altitud fue estadísticamente significativa ($r = -0,62$, $p < 0,05$, correlación de Spearman),

La alcalinidad total fue nula en P1, P2 y P3 durante ambos periodos, lo que confirma la ausencia de capacidad de amortiguamiento frente a la acidez, En contraste, los arroyos de menor altitud (P5–P7) presentaron alcalinidades entre 12 y 48 mg/L como CaCO_3 , indicando una mayor influencia de minerales carbonatados en zonas bajas,

Los sulfatos mostraron una clara relación directa con la altitud ($r = 0,71$, $p < 0,01$), Las concentraciones más altas se registraron en P2: 3461,7 mg/L (marzo) y 2686,7 mg/L (julio), mientras que en P7 fueron casi indetectables (0,2 mg/L en marzo), Este

patrón es consistente con la oxidación de minerales sulfurados (principalmente pirita) en zonas altas,

La conductividad eléctrica varió de forma heterogénea, Los valores más altos correspondieron a P6 en julio (4411,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$), atribuibles probablemente a aportes termohidrológicos, seguido por P2 en julio (720,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$), asociado al drenaje ácido de roca (DAR), En general, la conductividad fue significativamente mayor en época seca ($p < 0,05$), reflejando la menor dilución por lluvias,

La turbidez fue más elevada en P1 y P2 (hasta 12,3 NTU), coincidiendo con la presencia de precipitados de hidróxidos de hierro, visibles como sedimentos ocre en el lecho, Este fenómeno es típico en sistemas afectados por DAR, donde el hierro disuelto precipita al aumentar ligeramente el pH aguas abajo,

El caudal mostró una disminución drástica en época seca, En julio, el arroyo P3 dejó de fluir por completo, mientras que P6 mantuvo el mayor caudal en ambos periodos (12,4 L/s en marzo y 3,1 L/s en julio), lo que lo convierte en el principal tributario del río Apacheta,

Con respecto a los metales pesados, se detectaron en concentraciones cuantificables: aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni) y zinc (Zn), Sus patrones de distribución revelaron dos comportamientos distintos, vinculados a la altitud y al origen geoquímico,

Los metales asociados al DAR en zonas altas (P1 y P2) fueron aluminio, alcanzó 6,19 mg/L en P2 (julio), superando ampliamente el ECA para consumo animal (0,2 mg/L), su solubilidad aumenta en $\text{pH} < 5$, lo que explica su concentración máxima en los puntos más ácidos, Cobre: con 0,18 mg/L en P2 (julio), también excedió el ECA para riego (0,02 mg/L), Hierro: llegó a 12,4 mg/L en P2 (julio), valor extremadamente alto, típico de sistemas con oxidación de pirita, Níquel: mostró una correlación positiva significativa con la altitud ($r = 0,58$, $p < 0,05$), con máximos en P1 y P2,

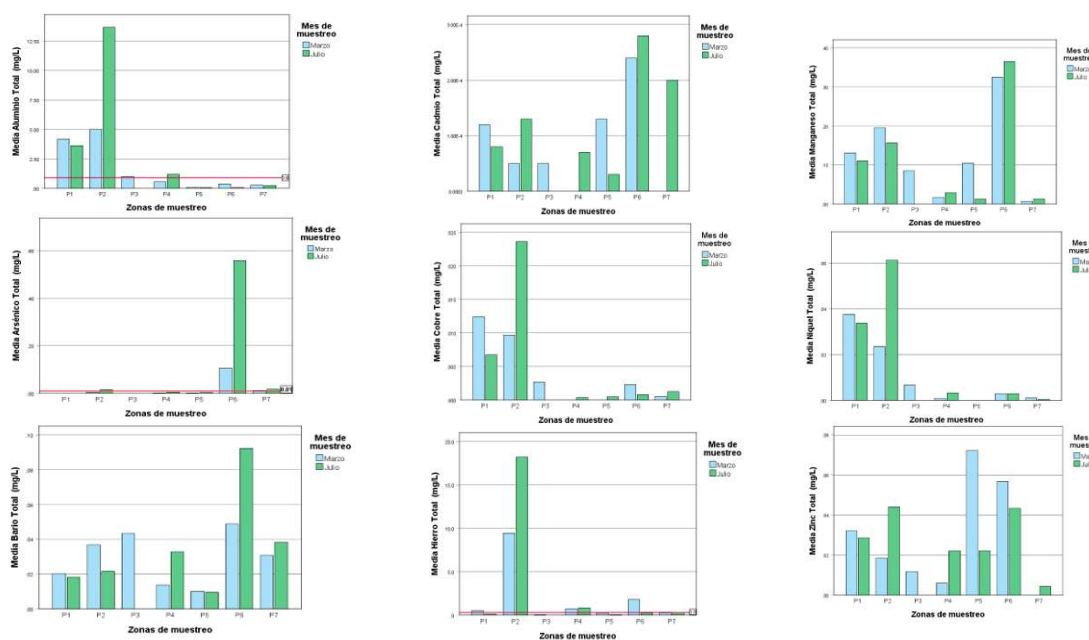


Figura 1, Valores de metales pesados en época húmeda (julio) y seca (marzo) registrado en el agua de siete arroyos en la cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024,

Los metales con comportamiento atípico o en zonas bajas, El arsénico presentó su mayor concentración en P6 (0,048 mg/L en julio), superando el ECA para consumo humano (0,01 mg/L), Este patrón inverso con la altitud ($r = -0,64$, $p < 0,01$) sugiere fuentes geológicas locales o procesos de desorción en zonas menos ácidas, El manganeso, fue alto tanto en P2 (0,82 mg/L) como en P6 (0,91 mg/L), lo que refleja su mayor movilidad en un rango más amplio de pH en comparación con el hierro o el aluminio,

En general, las concentraciones de metales fueron más elevadas en época seca (julio), debido a la reducción del caudal y la menor capacidad de dilución, Por ejemplo, el aluminio en P2 fue 3,2 veces mayor en julio que en marzo, Aunque la prueba de Kruskal-Wallis no mostró diferencias estadísticamente significativas entre arroyos para la mayoría de los metales ($p > 0,05$), los dendrogramas de similitud (Figura 13) revelaron claramente que P2 se comporta de forma singular, con una composición metálica distintiva en ambas épocas,

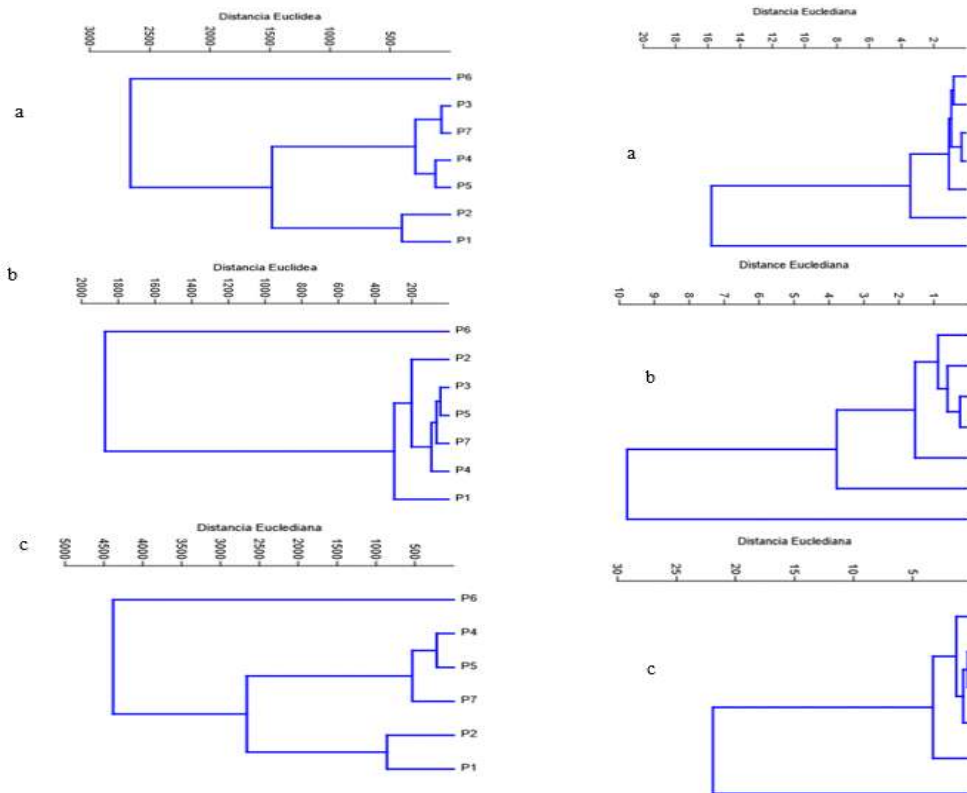


Figura 2, Dendrograma de similitud para los arroyos en base la presencia de metales en sus agua cuenca alta del río Cachi, Ayacucho 2024, a: Para los dos meses (promedio) con ; b: Para marzo (época húmeda): c, Para julio (época seca)

El análisis multivariado (ACP y cluster) confirmó la existencia de tres grupos distintos de arroyos: Grupo DAR (P1 y P2): pH ácido (< 4), altos sulfatos, Al, Cu, Fe y Ni, Grupo intermedio (P3–P5, P7): pH cercano a neutro, bajas concentraciones de metales, Grupo singular (P6): pH alcalino, alta conductividad, dureza, caudal, y altos As, Mn, Zn y Cd, La estacionalidad tuvo un efecto modulador, en época húmeda (marzo), las diferencias entre grupos se atenuaron por el efecto diluyente de las lluvias; en época seca (julio), los contrastes se acentuaron, especialmente en P2, donde el pH descendió a 2,72 y los metales alcanzaron sus máximos,

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman que la distribución espacial y temporal de metales pesados en los arroyos altoandinos de la cabecera de la cuenca del río Cachi está fuertemente condicionada por procesos geoquímicos naturales, en particular por el drenaje ácido de roca (DAR), y no por actividades antropogénicas como la minería, que están ausentes en la zona. Esta conclusión se sustenta en tres líneas de evidencia convergentes: (1) el patrón espacial de pH, alcalinidad y sulfatos; (2) la distribución de metales asociados a ambientes ácidos; y (3) los resultados del análisis multivariado que agrupan claramente los arroyos según su origen geoquímico,

En primer lugar, los arroyos ubicados a mayor altitud (P1 y P2) presentan valores extremadamente bajos de pH (hasta 2,72), alcalinidad nula y concentraciones muy elevadas de sulfatos (>2600 mg/L). Este patrón es característico del DAR natural, generado por la oxidación de minerales sulfurados —especialmente pirita (FeS_2)— expuestos por la acción del deshielo, la erosión o el retroceso glaciar (Downing & Jacobs, 2014; Zimmer et al., 2018). La ausencia de actividad minera en la zona descarta el drenaje ácido de mina (DAM) como fuente, lo que refuerza la interpretación de un origen geológico natural, tal como se ha documentado en otras regiones altoandinas como la Cordillera Blanca (Loayza-Muro et al., 2014) o en la subcuenca de Quillcay (Loayza, 2014),

Este fenómeno tiene consecuencias directas sobre la movilidad de metales pesados. Como se esperaba teóricamente (Singh & Steinnes, 1994; Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007), bajo condiciones ácidas, metales como aluminio, cobre, hierro y níquel se vuelven altamente solubles. Los valores máximos de estos metales en P1 y P2 —especialmente el aluminio (6,19 mg/L en P2, julio)— no solo superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para riego y consumo animal, sino que también coinciden con los patrones reportados en sistemas afectados por DAR en los Andes peruanos (Crisanto-Rojas & Iannacone, 2023; De La Cruz, 2017). Esto confirma que el pH es un control maestro de la especiación y movilidad metálica en estos ecosistemas,

Sin embargo, no todos los metales siguen este patrón. El arsénico, por ejemplo, alcanza sus concentraciones más altas en P6, un arroyo de menor altitud con pH

neutro a alcalino, Este comportamiento aparentemente contradictorio se explica por la química del arsénico: en sistemas ácidos, tiende a adsorberse fuertemente sobre los hidróxidos de hierro que precipitan aguas abajo del foco de DAR (Smedley & Kinniburgh, 2002), Pero en zonas donde el pH es más alto —como en P6—, o donde existen fuentes geológicas locales ricas en arsenopirita u otros minerales arsenicales, el arsénico puede movilizarse de forma independiente del DAR, Este hallazgo sugiere que, si bien el DAR domina en las zonas altas, otros procesos edafológicos o hidrotermales influyen en la calidad del agua en sectores medios de la cuenca, tal como se ha observado en microcuencas de Amazonas (Leiva-Tafur et al., 2024),

La estacionalidad también juega un papel modulador clave, En época seca (julio), la reducción del caudal disminuye la capacidad de dilución del agua, lo que amplifica tanto la acidez como las concentraciones metálicas en P1 y P2, Este efecto estacional ha sido documentado en otras cuencas andinas (Ccanccapa-Cartagena et al., 2023) y refuerza la idea de que el riesgo ecológico y sanitario es mayor durante los meses de estiaje, cuando el agua de estos arroyos podría ser utilizada sin tratamiento para riego o consumo animal,

El análisis multivariado (ACP y dendrogramas) ofrece una visión sintética de estos procesos, El biplot del ACP (Figura 14) muestra claramente dos agrupaciones distintas:

Grupo DAR: P1 y P2, asociados a pH bajo, sulfatos, Al, Cu, Fe y Ni,

Grupo hidrotermal/geológico local: P6, ligado a alta conductividad, dureza, As, Mn y Zn,

Este patrón corrobora que la heterogeneidad en la calidad del agua no responde a una única fuente de contaminación, sino a la interacción de múltiples factores geológicos y climáticos, La singularidad de P6 —con el mayor caudal y conductividad— sugiere una posible influencia de aguas subterráneas o emanaciones termohidrológicas, como se ha propuesto en estudios similares en zonas volcánicas o tectónicamente activas (Tapia et al., 2021),

La investigación confirma que la distribución espacial y temporal de metales pesados en los arroyos altoandinos de la cabecera de la cuenca del río Cachi está influenciada principalmente por procesos geoquímicos naturales, en particular el drenaje ácido de roca (DAR), y no por actividades antropogénicas como la minería. Los arroyos de mayor altitud (P1 y P2) presentan pH extremadamente bajo (hasta 2,72), nula alcalinidad y altas concentraciones de sulfatos, aluminio, cobre, hierro y níquel, características típicas del DAR generado por la oxidación natural de minerales sulfurados. En contraste, el arroyo P6, ubicado a menor altitud, muestra pH neutro a alcalino, alta conductividad y elevadas concentraciones de arsénico, probablemente por influencia geológica local o hidrotermal. La época seca intensifica estos patrones debido a la menor dilución. Varios metales superan los Estándares de Calidad Ambiental para riego y consumo animal, lo que representa un riesgo para la salud y los ecosistemas. Estos hallazgos subrayan la necesidad de diferenciar entre contaminación antropogénica y alteración geoquímica natural en la gestión del agua en los Andes.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Alvarenga, P., Guerreiro, N., Simões, I., Imaginário, M, J., & Palma, P, (2021), Assessment of the Environmental Impact of Acid Mine Drainage on Surface Water, Stream Sediments, and Macrophytes Using a Battery of Chemical and Ecotoxicological Indicators, *Water*, 13(10), Article 10, <https://doi.org/10.3390/w13101436>

Anawar, H, Md, (2013), Impact of climate change on acid mine drainage generation and contaminant transport in water ecosystems of semi-arid and arid mining areas, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 58-60, 13-21, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.04.002>

APHA, (2017), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23RD ed.), American Public Health Association,

Arellano, J., & Guzmán, J, (2011), *Ingeniería ambiental*, Alpha Editorial,

Arroyo, M, T, K., & Cavieres, L, A, (2013), High-Elevation Andean Ecosystems, En S, A, Levin (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity* (Second Edition) (pp, 96-110), Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00428-7>

Autoridad Nacional del Agua, (2016, marzo), *Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales*,

<https://www.ana.gob.pe/publicaciones/protocolo-nacional-para-el-monitoreo-de-la-calidad-de-los-recursos-hidricos-0>

Bálintová, M., Singovszká, E., Holub, M., & Demčák, Š, (2019), Influence of Acid Mine Drainage on Surface Water Quality, En A, M, Negm & M, Zeleňáková (Eds.), Water Resources in Slovakia: Part I: Assessment and Development (pp, 239-258), Springer International Publishing, https://doi.org/10.1007/698_2017_220

Brack, A., & Mendiola, C, (2010), Ecología del Perú (Tercera Edición), Bruño,

Carrasco, C., Rayme, C., Alarcón, R, del P., Ayala, Y., Arana, J., & Aponte, H, (2020), Macroinvertebrados acuáticos en arroyos asociados con bofedales altoandinos, Ayacucho Perú, Revista de Biología Tropical, 68(S2), Article S2, <https://doi.org/10.15517/rbt.v68iS2.44344>

Ccancapa-Cartagena, A., Chavez-Gonzales, F, D., Paredes, B., Vera, C., Gutierrez, G., Valencia, R., Lucia Paz Alcázar, A., Zyaykina, N, N., Filley, T, R., & Jafvert, C, T, (2023), Seasonal differences in trace metal concentrations in the major rivers of the hyper-arid southwestern Andes basins of Peru, Journal of Environmental Management, 344, 118493, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118493>

Chacón, M, Y, (2017), Análisis físico y químico de la calidad del agua, Ediciones USTA,

Chang, R, (2011), Fundamentos de química, McGraw-Hill Interamericana de España S,L,

Choque, Y., & Estremadoyro, M, B, (2024), Contaminación ambiental por metales pesados en el río Piñog Condesuyos—Arequipa, 2022 [Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica del Perú], <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/8917>

Crisanto-Rojas, N., & Iannacone, J, (2023), Evaluación del impacto de la acidificación en la calidad del agua de la quebrada Quilcayhuanca, Ancash, Perú, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 47(185), <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1950>

Dashtey, A, (2024), Fate and Transport of Heavy Metals in Soil, Surface Water, and Groundwater: Implications for Environmental Management, International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM), 12(12), 202-215, <https://doi.org/10.18535/ijssrm/v12i12,c01>

De La Cruz, F, (2017), Impacto ambiental potencial de metales pesados en el río Apacheta por presencia de yacimientos mineros en la Región Ayacucho [Tesis Posgrado], Universidad Nacional de San Crsitóbal de Huamanga,

Domínguez, E., & Vega, D, (eds), (2015), Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes, <https://biblioteca.inia.cl/handle/20,500,14001/3576>

Downing, B, W., & Jacobs, J, A, (2014), Acid Rock Drainage as Related to Permafrost, Glaciers, and Climate Change, En Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils (pp, 185-189), John Wiley & Sons, Ltd, <https://doi.org/10,1002/9781118749197,ch15>

Dudgeon, D, (2011), Tropical Stream Ecology, Elsevier,

Egiebor, N, O., & Oni, B, (2007), Acid rock drainage formation and treatment: A review, Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2(1), 47-62, <https://doi.org/10,1002/apj,57>

Elosegui, A, (2009), Conceptos y técnicas en ecología fluvial (1,a ed,), Fundacion BBVA,

Encalada, A., Suarez, E., Mena, C., Lessmann, J., Guayasamin, J., Sampedro, C., Martinez, P., Ochoa-Herrera, V., Swing, K., Celinscak, M., Vieira, J., Tapia, A., Schreckinger, J., Serrano, C., Barragán Figueroa, K., Andrade, S., Alexiades, A., & Troya, M, (2019), Los ríos de las cuencas Andino-Amazónicas: Herramientas y guía de invertebrados para el diseño efectivo de programas de monitoreo,

Gomes, P., & Valente, T, (2024), Seasonal impact of acid mine drainage on water quality and potential ecological risk in an old sulfide exploitation, Environmental Science and Pollution Research, 31(14), 21124-21135, <https://doi.org/10,1007/s11356-024-32367-1>

Hernández, R, H, (2018), Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta, McGraw-Hill Interamericana,

Izquierdo, J, L., & Verástegui, S, P, (2017), Concentración de metales pesados (As, Cd, Cr, Hg y Pb) en el agua de la cuenca baja del río Jequetepeque, en relación a los estándares de calidad del agua—Categoría 3, Cajamarca—2016 [Tesis de Licenciatura, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrello], <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/213>

Jacobs, J, A, (2014), Acid Sulfate Soils, En Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils (pp, 191-196), John Wiley & Sons, Ltd, <https://doi.org/10,1002/9781118749197,ch16>

Jacobs, J, A., Lehr, J, H., & Testa, S, M, (2014), Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation, John Wiley & Sons,

Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A, B, (2007), Trace Elements From Soil to Human,

La Matta, F, (2020), Influencia del drenaje ácido de roca en la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, índices bióticos de calidad de agua y grupos funcionales alimenticios en ríos y cabeceras de la Cordillera Blanca (subcuenca de Quillcay, Ancash), <https://repositorio.upch.edu.pe/handle/20,500,12866/8533>

Laws, E, A, (2017), Aquatic Pollution: An Introductory Text, John Wiley & Sons,

Leiva-Tafur, D,, Rascón, J,, Fuente, F, C, de la, Goñas, M,, Torres, O, A, G,, & Oliva-Cruz, M, (2024), Spatio-temporal evaluation of metals and metalloids in the water of high Andean livestock micro-watersheds, Amazonas, Peru, Heliyon, 10(12), <https://doi.org/10,1016/j,heliyon,2024,e33013>

Loayza, R, (2014), Calidad de agua en cabeceras de cuencas altoandinas en el contexto de Cambio Climático (nota técnica), MINAM, <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/nota-tecnica-02-calidad-agua-cabeceras-cuencas-altoandinas-contexto>

Loayza-Muro, R, A,, Duivenvoorden, J, F,, Kraak, M, H, S,, & Admiraal, W, (2014), Metal leaching, acidity, and altitude confine benthic macroinvertebrate community composition in Andean streams, Environmental Toxicology and Chemistry, 33(2), 404-411, <https://doi.org/10,1002/etc,2436>

Lozano-Rivas, W, (2013), Calidad fisicoquímica del agua,: Métodos simplificados para su muestreo y análisis, Universidad Piloto de Colombia,

Maldonado, M, A, (2018), Antropoceno: La política en la era humana, Penguin Random House Grupo Editorial España,

Manezes, M,, & Bicudo, C, E, de M, (2022), Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: Chave para identificação e descrições, RiMa,

Maurice-Bourgoin, L,, Alanoca, L,, Fraizy, P,, & Vauchel, P, (2003), Sources of mercury in surface waters of the upper Madeira erosive basins, Bolivia, Journal de Physique IV (Proceedings), 107, 855-858, <https://doi.org/10,1051/jp4:20030432>

Molles, M, C, (2006), Ecología: Conceptos y aplicaciones, McGraw Hill Education, McGraw-Hill Interamericana,

Montano, Y,, Tapia, P,, & Fuentealba, B, (2022), El drenaje ácido de roca y sus potenciales impactos ambientales (folleto), Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña – Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (DIEM-INAIGEM), <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/dfbf0722-66de-4e1f-b226-ce40c090f313>

Moreno-Aguirre, S, B,, Vértiz-Osores, J, J,, Paredes-Espinal, C, E,, Meseth, E,, Vílchez-Ochoa, G, L,, Espino-Ciudad, J, A,, & Pino, L, F, del, (2024), Ecological risk of metals in Andean water resources: A framework for early environmental

assessment of mining projects in Peru, Heliyon, 0(0), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30739>

Passarelli, I., Mora-Silva, D., Jimenez-Gutierrez, M., Logroño-Naranjo, S., Hernández-Allauca, D., Valdez, R, U., Avalos Peñafiel, V, G., Tierra Pérez, L, P., Sanchez-Salazar, M., Tobar Ruiz, M, G., Carrera-Silva, K., Straface, S., & Mestanza-Ramón, C, (2024), Hg Pollution in Groundwater of Andean Region of Ecuador and Human Health Risk Assessment, Resources, 13(6), Article 6, <https://doi.org/10.3390/resources13060084>

Patnaik, P, (2010), Handbook of Environmental Analysis: Chemical Pollutants in Air, Water, Soil, and Solid Wastes, Second Edition, Taylor & Francis,

Pérez, G., & Restrepo, J, J, (2008), Fundamentos de limnología neotropical, Universidad de Antioquia,

Ramírez, A, (1999), Ecología aplicada: Diseño y análisis estadístico, U, Jorge Tadeo Lozano,

Rojas, J, (2002), Calidad del agua, Escuela Colombiana de Ingeniería,

Roldán Pérez, G, (1992), Fundamentos de limnología neotropical, Universidad de Antioquia,

Rue, G, P., & McKnight, D, M, (2021), Enhanced Rare Earth Element Mobilization in a Mountain Watershed of the Colorado Mineral Belt with Concomitant Detection in Aquatic Biota: Increasing Climate Change-Driven Degradation to Water Quality, Environmental Science & Technology, 55(21), 14378-14388, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02958>

Santos, L., & López, S, (2015), Valoración de servicios ecosistémicos generados por la construcción de infraestructuras: Desarrollo de la metodología, Ediciones Universidad de Salamanca,

Sierra, C, A, (2021), Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico, Ediciones de la U,

Simate, G, S., & Ndlovu, S, (2014), Acid mine drainage: Challenges and opportunities, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2(3), 1785-1803, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.021>

Singh, B, R., & Steinnes, E, (1994), Soil and Water Contamination by Heavy Metals, En Soil Processes and Water Quality, CRC Press,

Smith, T, M., & Smith, R, L, (2015), Elements of Ecology (9 ed), Pearson,

Somers, L, D., & McKenzie, J, M, (2020), A review of groundwater in high mountain environments, WIREs Water, 7(6), e1475, <https://doi.org/10.1002/wat2.1475>

Spitzer, P., Reichmann, E., & Tassoti, S, (2024), Acid Mine Drainage: Was schmelzender Permafrost mit Schwermetallen in Bergseen zu tun hat, CHEMKON, 31(8), 311-314, <https://doi.org/10,1002/ckon,202400027>

Stevenson, R., & Sabater, S, (2010), Global Change and River Ecosystems—Implications for Structure, Function and Ecosystem Services, <https://doi.org/10,1007/978-94-007-0608-8>

Tapia, J., Schneider, B., Inostroza, M., Álvarez-Amado, F., Luque, J, A., Aguilera, F., Parra, S., & Bravo, M, (2021), Naturally elevated arsenic in the Altiplano-Puna, Chile and the link to recent (Mio-Pliocene to Quaternary) volcanic activity, high crustal thicknesses, and geological structures, *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 102905, <https://doi.org/10,1016/j.jsames,2020,102905>

Tong, L., Peng, X., Chen, D., Chen, Y., Wen, Y., Wang, W., & Liu, X, (2022), Characterization and risk assessment of soil around waste rock heaps affected by acid rock drainage in an abandoned pyrite mining area, *Frontiers in Environmental Science*, 10, <https://doi.org/10,3389/fenvs,2022,1017809>

Tyller, G, (2006), *Essentials of Ecology*, Thomson, Brooks/Cole,

Valdez-Nuñez, L, F., Kappler, A., Ayala-Muñoz, D., Chávez, I, J., & Mansor, M, (2024), Acidophilic sulphate-reducing bacteria: Diversity, ecophysiology, and applications, *Environmental Microbiology Reports*, 16(5), e70019, <https://doi.org/10,1111/1758-2229,70019>

Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A, G., & Pigna, M, (2010), Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments, *Journal of soil science and plant nutrition*, 10(3), 268-292, <https://doi.org/10,4067/S0718-95162010000100005>

Zimmer, A., Brito, M., Oropeza, C., León, J., & Bullard, J, (2018), Implementación de dos Sistemas de Biorremediación como Estrategia para la Prevención y Mitigación de los Efectos del Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca, Perú, *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, <https://doi.org/10,36580/rgem,i4,57-76>



ESCUELA DE

POSGRADOUNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N°0088-2026-UNSCH-EPG/KBA**

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de Posgrado en segunda instancia para la **Escuela de Posgrado – UNSCH**; en cumplimiento a la Resolución Directoral N°002-2026-UNSCH-EPG/D, Reglamento de Originalidad de trabajos de Investigación de la UNSCH, otorga lo siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

AUTOR	Bach. PEDRO NILTON CRUZADO VASQUEZ
DENOMINACIÓN DEL PROGRAMA DE ESTUDIOS	MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
GRADO ACADÉMICO QUE OTORGA	MAESTRO
DENOMINACIÓN DEL GRADO ACADÉMICO	MAESTRO(A) EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE
TÍTULO DE TESIS	Distribución espacial de metales pesados en arroyos altoandinos de la cuenca alta del río Cachi Ayacucho 2024
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD	15% de similitud
N° DE TRABAJO	3011535130
FECHA	12 de agosto de 2026

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es procedente otorgar la constancia de originalidad con depósito.

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado para los fines que crea conveniente.

12 de agosto de 2026.


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
ESCUELA DE POSGRADO
Mg. Kelvis BERTOCAL ARGUMEDO
Sub Director de Investigación

CC.
Archivo
KBA/

Distribución espacial de metales pesados en arroyos altoandinos de la cuenca alta del río Cachi Ayacucho 2024

por Pedro Nilton CRUZADO VASQUEZ

Fecha de entrega: 12-ago-2026 07:19a. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 3011535130

Nombre del archivo: Pedro_Nilton_CRUZADO_VASQUEZ_T.docx (1.77M)

Total de palabras: 22520

Total de caracteres: 124378

Distribución espacial de metales pesados en arroyos altoandinos de la cuenca alta del río Cachi Ayacucho 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%	16%	9%	8%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsch.edu.pe	5%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.inaigem.gob.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
4	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	1%
	Trabajo del estudiante	
5	orcid.org	1%
	Fuente de Internet	
6	docs.google.com	1%
	Fuente de Internet	
7	www.inaigem.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	es.wikipedia.org	<1%
	Fuente de Internet	
9	wwflac.awsassets.panda.org	<1%
	Fuente de Internet	
10	repositorio.upsc.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
11	repositorio.uap.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
12	alicia.concytec.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
13	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes	<1%
	Trabajo del estudiante	
14	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez	<1%
	Trabajo del estudiante	

15	Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
17	Humpiri Ramos, Isaac. "Concentración de los metales pesados y propuestas de recuperación en la Sub-cuenca del rio Crucero", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	<1 %
18	Huisa Mamani, Fidel. "Dren anóxico calizo para el tratamiento de aguas ácidas de mina - Acumulación Los Rosales", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	<1 %
19	portal-academico.upads.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1 %
21	Vasquez Villafana, Glibver Jose. "Desarrollo de un sensor quimico a base de nanoparticulas de oro para la determinacion de Hg2+ en muestras de agua utilizando dispersion Rayleigh de resonancia.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2021 Publicación	<1 %
22	repositorio.unas.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
23	Cornejo Olarte, Dalmiro Aurelio. "Evaluacion de metales toxicos en la cuenca del Rio Coata Puno - Peru", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru), 2025 Publicación	<1 %
24	Flores Ponce, Grover Linder. "Influencia de la materia orgánica y la granulometría en la distribución y disponibilidad de metales pesados esenciales en los sedimentos del lago Rinconada, Puno", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru), 2025 Publicación	<1 %
25	Submitted to Universidad Católica San Pablo Trabajo del estudiante	<1 %
26	www.aneas.com.mx Fuente de Internet	<1 %

Exclur citas
Exclur bibliografia

Activo
Activo

Exclur coincidencias

< 30 words

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR
EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO(A) EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN GERENCIA DE
PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE
RESOLUCIÓN DIRECTORAL N°00628 - 2026-UNSCH-EPG/D.

Siendo las 06:00 p.m. del 13 de julio de 2026 se reunieron en el auditorium de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, el Jurado Examinador y Calificador de Tesis, presidido por el **Dr. JOHNNY ALDO TINCO JAYO** Director (e) de la Escuela de Posgrado, el **Mg. EDMUNDO CANCHARI GUTIERREZ** Director de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, e integrado por los siguientes miembros: **Dr. ANDRES PORTUGAL PAZ** y el **Mg. KELVIS BERROCAL ARGUMEDO**; para la sustentación oral y pública de la tesis titulada: **DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE METALES PESADOS EN ARROYOS ALTOANDINOS DE LA CUENCA ALTA DEL RIO CACHI AYACUCHO 2024**, presentado por el **Bach. PEDRO NILTON CRUZADO VASQUEZ**. Teniendo como asesor al **Dr. CARLOS EMILIO CARRASCO BADAJOZ**.

Acto seguido se procedió a la exposición de la tesis, con el fin de optar el Grado Académico de **MAESTRO(A) EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE**. Formuladas las preguntas, éstas fueron absueltas por el graduando.

A continuación, el Jurado Examinador y Calificador de Tesis procedió a la votación, la que dio como resultado el siguiente calificativo: DIECISIETE (17).

CALIFICACION (x)	
Aprobado(a) por Unanimidad.	
Aprobado(a) por Mayoría.	X
Desaprobado(a) por Unanimidad.	
Desaprobado(a) por Mayoría.	

Marcar con un aspa (x).

Luego, el presidente del Jurado recomienda que la Escuela de Posgrado proponga que se le otorgue al **Bach. PEDRO NILTON CRUZADO VASQUEZ**, el Grado Académico de **MAESTRO(A) EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN GERENCIA DE PROYECTOS Y MEDIO AMBIENTE**. Siendo las 7:35 pm hrs. se levanta la sesión.

Se extiende el acta en la ciudad de Ayacucho, a las 7:45 pm hrs. del 13 de julio de 2026.

.....
Dr. JOHNNY ALDO TINCO JAYO
Director de la Escuela de Posgrado.

.....
Mg. EDMUNDO CANCHARI GUTIERREZ
Director de la UPG-FIMGC.

.....
Dr. ANDRES PORTUGAL PAZ
Miembro.

.....
Mg. KELVIS BERROCAL ARGUMEDO
Miembro.

.....
Dr. ENRIQUE JAVIER AGUILAR FELICES
Secretario Docente.

Observaciones:

.....

.....