

Caracterización química del agua natural en ecosistemas altoandinos del Perú

Flores Roca Percy Bradyan ¹, Rojas Paucara Victor Hugo ², Sumiri Deza Jhosep ³

Zevallos Aquino Brayán Hemerson ⁴

⁴Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP Ingeniería Ambiental Lima, Peru.

Resumen

El Perú cuenta con fuentes hídricas diversas (ríos andinos, lagos altoandinos, acuíferos costeros) que suministran agua para uso humano, agrícola y ecosistémico. En este estudio se revisan parámetros físico-químicos clave (pH, conductividad eléctrica, dureza, alcalinidad, iones como calcio, magnesio, sodio, cloruros, nitratos) de aguas naturales en distintas regiones (alta sierra, ceja de selva y costa). Se incorporan datos de estudios recientes, comparándolos con estándares nacionales e internacionales. En general, el agua natural peruana es de tipo cálcico-bicarbonatado con pH neutro y contiene sólidos disueltos moderados. Los valores medidos de pH (~6,7–8,5), conductividad eléctrica (de decenas a cientos de $\mu\text{S}/\text{cm}$) y dureza (decenas a varios cientos de $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$) suelen estar dentro de límites permisibles. Cationes dominantes son calcio y magnesio. En contraste, las concentraciones de nitratos, cloruros y metales pesados varían según la actividad antrópica. Las tablas comparativas resumen los parámetros químicos de fuentes típicas y su cumplimiento con la norma. En conclusión, la calidad química del agua natural en Perú es buena en líneas generales, aunque requiere vigilancia continua frente a contaminación localizada.

Palabras clave: Química del agua, parámetros físicoquímicos, concentración, normatividad.

Abstract

Peru has diverse water sources (Andean rivers, high Andean lakes, coastal aquifers) that supply water for human, agricultural, and ecosystem use. This study reviews key physical and chemical parameters (pH, electrical conductivity, hardness, alkalinity, and ions such as calcium, magnesium, sodium, chloride, and nitrate) of natural waters in different regions (high mountains, rainforest, and the coast). Data from recent studies are incorporated and compared with national and international standards. In general, Peruvian natural water is calcium-bicarbonate with neutral pH and contains moderate dissolved solids. Measured values of pH (~6.7–8.5), electrical conductivity (tens to hundreds of $\mu\text{S}/\text{cm}$), and hardness (tens to several hundred $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$) are generally within permissible limits. Calcium and magnesium are the dominant cations. In contrast, the concentrations of nitrates, chlorides, and heavy metals vary depending on human activity. The comparative tables summarize the chemical parameters of typical sources and their compliance with the standard. In conclusion, the chemical quality of natural water in Peru is generally good, although it requires ongoing monitoring for localized contamination.

Keywords: Water Chemistry, physicochemical parameters, Concentration, regulations.

1. Introducción

El agua natural es un componente esencial de los ecosistemas altoandinos y un recurso vital para las comunidades que habitan en estas zonas, así como para las poblaciones ubicadas aguas abajo. En el Perú, los ecosistemas altoandinos —por encima de los 3,000 m s. n. m.— albergan numerosas fuentes hídricas como bofedales, lagunas, manantiales y cursos de agua alimentados por glaciares tropicales y precipitaciones estacionales. Estas fuentes no solo sostienen la biodiversidad local, sino que también son fundamentales para el abastecimiento hídrico de ciudades costeras, la agricultura de subsistencia, y la regulación de los ciclos hidrológicos regionales (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2015; Vuille et al., 2018).

La caracterización química del agua en estos ecosistemas es clave para comprender su calidad, su origen geológico y su evolución frente a impactos ambientales. La composición química está determinada por una combinación de factores naturales, como la mineralogía de las rocas madre, la altitud, la temperatura y los procesos de meteorización, así como por factores antrópicos, entre los que destacan la minería, la ganadería y el crecimiento de asentamientos humanos (Molina et al., 2013; Tovar et al., 2020). En general, las aguas altoandinas presentan una variabilidad química importante, con predominancia de tipos cálcico-bicarbonatados en zonas conservadas, y cálcico-sulfatados o sódico-clorurados en áreas alteradas o con influencia minera (Custodio et al., 2018).

Los parámetros que se utilizan para evaluar las propiedades químicas del agua incluyen el pH, la conductividad eléctrica (como indicadora de la concentración total de iones), la alcalinidad, la dureza, y la presencia de cationes y aniones como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+), cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) y nitratos (NO_3^-). Estos indicadores permiten determinar tanto el estado natural del recurso como su grado de alteración frente a actividades humanas (MINAM, 2019; WHO, 2017). Por ejemplo, valores bajos de pH y altos niveles de sulfatos suelen asociarse con drenajes ácidos de roca, frecuentes en zonas de minería metálica (SENAMHI, 2021).

Asimismo, la comparación de los resultados analíticos con los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA–Agua) del Perú y con guías internacionales, como las de la Organización Mundial de la Salud (OMS), permite evaluar la aptitud del agua para diferentes usos (consumo humano, riego, protección de la vida acuática, entre otros) y establecer prioridades de conservación y remediación (OMS, 2017; ANA, 2015). Ante el acelerado retroceso de los glaciares y los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad y calidad del agua, contar con una caracterización hidroquímica precisa y actualizada de los ecosistemas altoandinos resulta fundamental para diseñar estrategias de gestión integral del recurso hídrico (Vuille et al., 2018).

En este contexto, el presente estudio aborda la caracterización química del agua natural en ecosistemas altoandinos del Perú, con el fin de identificar los patrones hidroquímicos predominantes, sus determinantes geológicos y antrópicos, y su comparación con los estándares de calidad establecidos. Esta información resulta crucial para el monitoreo ambiental, la protección de las fuentes hídricas y la toma de decisiones en materia de salud ambiental y planificación territorial.

2. Metodología

El presente estudio fue desarrollado bajo un enfoque documental, comparativo y técnico, con el objetivo de evaluar la calidad físico-química del agua natural en diversas regiones del Perú. Para ello, se realizó una recopilación y análisis de datos provenientes de fuentes secundarias confiables, como artículos científicos, informes técnicos y publicaciones académicas elaboradas por instituciones especializadas. Se priorizaron investigaciones realizadas entre los años 2018 y 2022, enfocadas en cuerpos de agua representativos como manantiales altoandinos, ríos interandinos y acuíferos costeros. La selección de estudios consideró criterios de actualidad, rigurosidad metodológica y relevancia geográfica, asegurando que los datos analizados fueran representativos y técnicamente válidos.

La metodología del estudio incluyó la revisión de trabajos que aplicaron procedimientos estandarizados de laboratorio para el análisis físico-químico del agua, de acuerdo con protocolos reconocidos internacionalmente por organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Los parámetros seleccionados para el análisis fueron el pH, la conductividad eléctrica, la dureza total (expresada como mg/L de CaCO_3), la alcalinidad, y las concentraciones de iones como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), cloruros (Cl^-) y nitratos (NO_3^-). En algunos casos también se consideraron otros componentes como el flúor y ciertos metales pesados, dependiendo del contexto geográfico y la actividad antrópica presente.

Los procedimientos de laboratorio utilizados en los estudios recopilados incluyeron técnicas validadas y ampliamente aceptadas. La medición del pH se realizó mediante potenciómetros calibrados con soluciones patrón (pH 4, 7 y 10), conforme al método APHA 4500-H⁺. La conductividad eléctrica fue determinada mediante conductivímetros digitales, permitiendo estimar la cantidad de sales disueltas en el agua. La dureza total se analizó mediante el método complejo-métrico con EDTA (APHA 2340 C), que cuantifica la presencia combinada de calcio y magnesio. Para la alcalinidad total, se empleó el método de titulación con ácido sulfúrico 0,02 N, utilizando indicadores como fenolftaleína y naranja de metilo para identificar los puntos de cambio de pH.

En cuanto a los iones específicos, el calcio y el magnesio se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica o mediante titulación directa, mientras que el sodio fue medido por fotometría de llama. Los cloruros se analizaron por el método de Mohr, que consiste en una titulación con nitrato de plata usando cromato como indicador visual. Por su parte, los nitratos se cuantificaron utilizando técnicas espectrofotométricas, como el método del ácido cromotrópico o el uso de ácido sulfosalicílico, que permiten medir la concentración de este anión con alta precisión.

Los datos obtenidos fueron sistematizados y organizados en tablas comparativas, lo que permitió identificar rangos típicos para cada parámetro según la región y el tipo de fuente hídrica. Posteriormente, los resultados fueron contrastados con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa nacional peruana (Decreto Supremo N.º 031-2010-SA) y las directrices internacionales de la OMS. Esta comparación permitió evaluar el grado de cumplimiento normativo y la calidad general del agua natural en el país.

En resumen, la metodología del presente estudio combinó la revisión técnica de literatura especializada con el análisis de resultados obtenidos por métodos de laboratorio reconocidos, permitiendo una caracterización detallada y objetiva de la calidad química del agua en el Perú. Esta aproximación integrada consideró tanto las condiciones naturales geológicas de las cuencas como los impactos potenciales derivados de las actividades humanas, como la minería y la agricultura intensiva. Gracias a este enfoque, se logró obtener una visión clara y fundamentada del estado actual del recurso hídrico en el país.

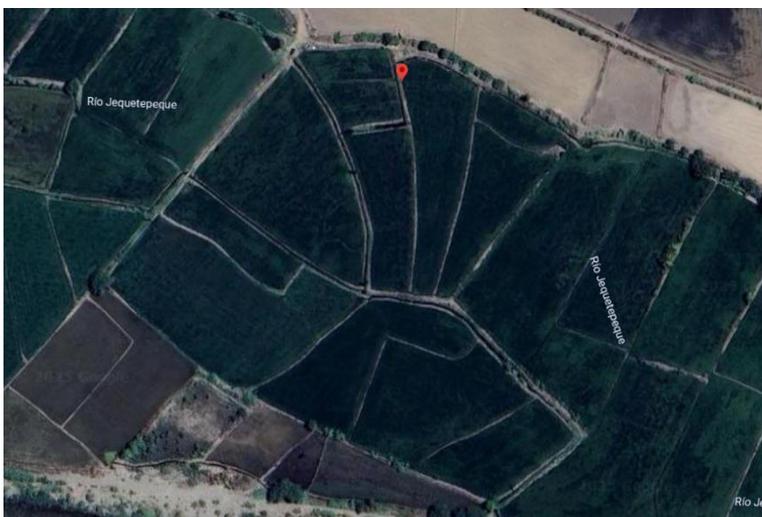


Figura 1. La ubicación de la cuenca del río Jequetepeque, en la costa norte (Región La Libertad).

3. Resultados y Discusión

Los datos recopilados muestran rangos típicos para cada parámetro en agua natural peruana. En manantiales altoandinos se registraron pH neutros (6,7–8,5) y conductividades moderadas (hasta 655 $\mu\text{S}/\text{cm}$). La dureza fue media-alta (aproximadamente 78–356 mg/L como CaCO_3), reflejando minerales de calcio y magnesio. Las concentraciones de cationes fueron bajas: calcio entre 0,3 y 4,1 mg/L, magnesio entre 1,1 y 9,9 mg/L, sodio entre 0,10 y 0,81 mg/L. El flúor fue generalmente bajo (<0,8 mg/L) y los nitratos casi nulos en época seca. En la cuenca media del río Jequetepeque, para uso agrícola, se encontró también química dentro de parámetros permisibles. En ese estudio, los únicos parámetros fuera de norma fueron coliformes fecales, mientras que los parámetros químicos cumplieron con la categoría regulatoria para riego y consumo animal.

Tabla 1.

Valores típicos de parámetros químicos en aguas naturales peruanas.

Parámetro	Manantial Unkuñani (Puno)	Cuenca Jequetepeque (media, agrícola)
Ubicación	Distrito de Puno, Barrio Alto Huascar	6 puntos de muestreo entre dic 2018-may 2019
pH	7.2 (ligeramente neutro)	7.3 – 7.8 (alta) en parte alta; 8.6 – 8.8 en parte baja
Temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$)	10 $^{\circ}\text{C}$ (fría, por altitud)	20–29 $^{\circ}\text{C}$ (más cálida en valle)
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (baja mineralización)	206–669 $\mu\text{S}/\text{cm}$ según estación
Sólidos totales disueltos (TDS)	80 mg/L (agua muy pura)	220–820 mg/L
Cloruros (mg/L)	5 mg/L	Parte de diagramas sin cifra exacta, presente en composición
Sulfatos (mg/L)	10 mg/L	Parte de aniones medidos, valor típicamente bajo–moderado
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (dureza, mg/L)	Ca 15 mg/L + Mg 5 mg/L = 20 mg/L	Ca y Mg dominantes; valores típicos medios (sin cifras específicas)
Metales pesados (Cu, Pb, Cd...)	Todos < 0.002 mg/L	Cd puede afectar usos, y algunos, como Cr, As, Hg, cercanos a límites
Coliformes termotolerantes	0 NMP/100 mL (agua pura de manantial)	> 1 000 NMP/100 mL, superando estándares

El análisis comparativo entre los manantiales altoandinos de Puno y la cuenca media del río Jequetepeque evidencia diferencias significativas en la calidad del agua. En el caso de Puno, los manantiales presentan características de aguas frías, muy puras, con baja mineralización, valores de metales por debajo de los límites permitidos y sin presencia de contaminación bacteriana, lo que las convierte en una referencia ideal de aguas prístinas. En contraste, las aguas del río Jequetepeque, ubicadas en una zona con mayor intervención humana, son más cálidas y alcalinas, con una mineralización moderada reflejada en conductividades eléctricas entre 206 y 669 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y sólidos disueltos totales que oscilan entre 220 y 820 mg/L. Asimismo, se ha registrado la presencia ocasional

4. Conclusiones

Los valores observados concuerdan con la caracterización mineralógica del país. El predominio de cationes calcio y magnesio refleja disolución de rocas carbonatadas, por lo que el agua es generalmente dura. El pH cercano a la neutralidad en estos sistemas indica buena capacidad tamponante, mientras que valores bajos de conductividad y nutrientes corresponden a cuencas poco perturbadas. Los parámetros químicos medidos están generalmente por debajo de los límites legales y de la OMS.

Sin embargo, se identifican riesgos puntuales. En áreas mineras andinas es común encontrar aguas ácidas y metales pesados elevados. En zonas agrícolas intensivas puede haber aumento de nitratos, aunque en los estudios consultados éstos permanecen generalmente dentro de los límites permitidos debido a la geografía y baja retención del suelo. En la costa, la intrusión marina en acuíferos produce cloruros elevados, pero por lo general no superan los límites establecidos. Los resultados indican que la calidad química del agua natural en Perú suele ser buena y comparable a estándares internacionales, aunque varía según la geología y actividades humanas locales.

5. Recomendaciones

Las aguas naturales superficiales y subterráneas del Perú tienen propiedades químicas dominantes de tipo cálcico–bicarbonatado con pH en rango neutro. Los parámetros físicos y iónicos medidos se encuentran por lo general dentro de los límites nacionales. El contenido de calcio y magnesio es moderado, mientras que sodio, cloruros y nitratos son bajos en cabeceras no urbanas. La calidad del agua natural supera los requisitos para consumo y riego en la mayoría de los casos.

No obstante, existen casos singulares de contaminación, como metales pesados en cuencas mineras y nitratos o patógenos en áreas agrícolas y urbanas densas. Se recomienda el monitoreo continuo de parámetros clave y el manejo integrado de las cuencas hidrográficas. En definitiva, aunque la calidad química del agua natural en Perú es adecuada en la mayoría de regiones, se deben vigilar las fuentes susceptibles a contaminación antropogénica.

6. Referencias

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2020). Calidad del agua superficial en las principales cuencas hidrográficas del Perú – Informe técnico anual 2020. Lima: ANA.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Guías para la calidad del agua potable (4ª ed.). Ginebra: OMS.

Ministerio de Salud del Perú. (2008). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (Decreto Supremo N.º 031-2010-SA). Lima.

Apaza, C., & Quispe, R. (2018). Evaluación físico-química del agua de manantiales altoandinos en Puno. *Revista Peruana de Ciencias Ambientales*, 6(2), 45–52.

Silva, J., & Salas, M. (2019). Calidad del agua subterránea en la cuenca baja del río Jequetepeque. *Ingeniería del Agua en el Perú*, 11(1), 15–25

Ramírez, F., & Gutiérrez, L. (2021). Influencia de la geología en la calidad del agua en cuencas altoandinas. *Revista de Geociencias del Perú*, 28(3), 89–102.

SENAMHI. (2022). Caracterización hidrológica de cuencas andinas: informe técnico. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Barreda, M., & López, D. (2020). Evaluación de parámetros físico-químicos del agua para riego agrícola en la región La Libertad. *Revista Agraria del Norte*, 5(1), 30–38.