

REPORTE

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL AGUA SUPERFICIAL DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA (UH) PUCAVADO



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL AGUA SUPERFICIAL DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA (UH) PUCAVADO

Autor

Yeidy Montano Chávez y Junior Figueroa Miranda

Revisor

Mirtha Camacho Hernández

Subdirectora de Riesgos Asociados al Cambio Climático en Ecosistemas de Montaña

Editado por

© Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)

Sede central: Av. Centenario 2656 - Sector Palmira, Independencia, Huaraz - Áncash - Perú

Teléfono: (043) 64 3460

Correo electrónico: diem@inaigem.gob.pe

Elaboración de mapas

Eduardo Sanchez Carrión

Técnico en Sistema de Información Geográfica

Revisión de estilo

Jorge Coaguila y Mirtha Camacho Hernández

Diseño y diagramación

Kipu Visual

Fotografías

Yeidy Montano Chávez

1ra edición

Noviembre 2025

Depósito legal del libro N° 2025-15591

INAIGEM (2025).. Evaluación de la concentración de metales en el agua superficial de la unidad hidrográfica (UH) Pucavado (Reporte). Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña - Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (DIEM-INAIGEM), Huaraz, Perú.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
GLOSARIO	6
PRESENTACIÓN	8
INTRODUCCIÓN	9
1. ASPECTOS GENERALES DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA (UH) PUCAVADO	10
2. MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA UH PUCAVADO	11
2.1. Metodología	11
2.2. Equipos y materiales	13
2.3. Red de puntos de monitoreo	14
3. RESULTADOS DEL MONITOREO	16
3.1. Análisis de resultados	20
3.2. Mapa de resultados	26
4. CONCLUSIONES	28
5. RECOMENDACIONES	28
LISTADO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	29
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
ANEXOS	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características principales de la UH Pucavado	10
Tabla 2. Frecuencia de análisis, laboratorio y método de análisis	12
Tabla 3. Resultados de los parámetros evaluados en la UH Pucavado de 2020 a 2024	18
Tabla 4. Recurrencia de parámetros que incumplen el ECA en la UH Pucavado (2020-2024)	26
Tabla 5. Estándar de calidad para el agua de la categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales (parámetros usados en el reporte)	32
Tabla 6. Estándar de calidad para el agua de la categoría 4: conservación del ambiente acuático, E2: ríos (parámetros usados en el reporte)	33
Tabla 7. Ubicación y descripción de los puntos de evaluación	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la UH Pucavado	11
Figura 2. Toma de muestra de agua en el punto 6 y 5 de la UH Pucavado	13
Figura 3. Medición de parámetros fisicoquímicos en el punto 8 de la UH Pucavado	14
Figura 4. Mapa de puntos de monitoreo en la UH Pucavado	15
Figura 5. Evaluación del pH en el punto 1 de la UH Pucavado (2020-2024)	17
Figura 6. Evolución de la concentración de Fe (mg/L) para el periodo 2020-2024	20
Figura 7. Diagrama de calor de la concentración anual de hierro (Fe) en el periodo 2020-2024	21
Figura 8. Evolución de la concentración de Mn (mg/L) para el periodo 2020-2024	22
Figura 9. Diagrama de calor de la concentración anual de manganeso (Mn) en el periodo 2020-2024	22
Figura 10. Evolución de la concentración de Al (mg/L) para el periodo 2020-2024	23
Figura 11. Diagrama de calor de la concentración anual de aluminio (Al) en el periodo 2020-2024	24
Figura 12. Evolución de los valores de pH (Und.) para el periodo 2020-2024	25
Figura 13. Mapa de resultados obtenidos de la evaluación de parámetros fisicoquímicos y concentración de metales	27
Figura 14. Imágenes de la zona de muestreo del punto 5	34
Figura 15. Imágenes de la zona de muestreo del punto 6	35
Figura 16. Imágenes de la zona de muestreo del punto 7	36
Figura 17. Imágenes de la zona de muestreo del punto 8	37
Figura 18. Imágenes de la zona de muestreo del punto 9	38

GLOSARIO

- » **Calidad del agua:** conjunto de características químicas, físicas y biológicas que determinan su idoneidad para un uso específico. Se evalúa comparando los valores medidos de parámetros fisicoquímicos y biológicos con los límites establecidos en los estándares de calidad ambiental (UNEP, 2016).
- » **Cambio climático:** modificación significativa y de larga duración de los patrones climáticos, a escala global o regional, atribuible directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera y que se superpone a la variabilidad natural del clima (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023).
- » **Conductividad eléctrica:** medida de la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, directamente relacionada con la concentración total de iones disueltos (sales, minerales y otros compuestos iónicos). Se expresa usualmente en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (De Matos et al., 2023).
- » **Drenaje ácido de roca (DAR):** es un proceso geoquímico natural que puede verse favorecido por el retroceso glaciar cuando lechos rocosos con minerales sulfurados (por ejemplo, pirita, FeS_2). Al exponerse al oxígeno y al agua, estos minerales se oxidan, generan acidez y liberan metales (hierro, aluminio, cobre, zinc) al agua de deshielo, así como a ríos y lagos proglaciares. Este proceso se intensifica con la aceleración del cambio climático (Santofimia et al., 2017).
- » **Drenaje ácido de mina (DAM):** problema ambiental, generado durante las actividades mineras por la oxidación natural de minerales sulfurados —principalmente pirita (FeS_2)— al exponerse al agua y al oxígeno. En contextos mineros, este proceso se intensifica y produce efluentes ácidos con altas concentraciones de sulfatos y metales pesados, que pueden contaminar las aguas superficiales y subterráneas (Pozo-Antonio et al., 2014).
- » **Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua:** niveles de concentración de elementos y sustancias, así como de parámetros físicos, químicos y biológicos, que no deben excederse para proteger la salud humana y el ambiente. Además, establecen el nivel máximo permitido de contaminantes o sustancias en un cuerpo de agua, según su uso (Minam, 2017).
- » **Muestreo:** procedimiento de campo que consiste en recolectar una porción representativa de un medio (agua, suelo, aire, sedimento) o de una población biológica, con el fin de obtener información sobre las características del medio evaluado (DES, 2018).
- » **Parámetros fisicoquímicos:** conjunto de propiedades medibles que describen el estado físico y las características químicas de una muestra de agua, suelo o aire. Incluyen, entre otras, temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, turbidez y salinidad (Misman et al., 2023).

- » **pH:** medida de la acidez o basicidad de una solución acuosa. Se define como el logaritmo decimal negativo de la actividad (aprox. concentración) de iones hidrógeno (H^+). La escala varía de 0 a 14: valores < 7 son ácidos, 7 es neutro y > 7 son básicos o alcalinos. Es un parámetro fundamental en procesos biológicos y químicos (Rahmanian et al., 2015).
- » **Punto de monitoreo:** ubicación geográfica específica y predefinida donde se toman muestras o se realizan mediciones *in situ* de variables ambientales (por ejemplo, parámetros fisicoquímicos o biológicos) para evaluar la calidad de cuerpos de agua, suelos o aire (ONU, 2006).
- » **Turbidez:** medida óptica que expresa el grado de dispersión de la luz causado por el material particulado en suspensión (por ejemplo, arcillas, limos, materia orgánica y detritos vegetales) en una muestra de agua. Indica la falta de claridad o transparencia de la muestra y se expresa en unidades nefelométricas de turbidez (NTU) (Yaakub et al., 2018).
- » **Unidad hidrográfica:** área de territorio delimitada naturalmente por un parteaguas o divisoria de aguas, dentro de la cual todas las escorrentías superficiales confluyen a través de una red de arroyos y ríos hasta un único punto de salida (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN SUR], 2008).

PRESENTACIÓN

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (Inaigem) es el ente rector de la investigación científica sobre glaciares y ecosistemas de montaña en el Perú. Su objetivo principal es generar conocimiento científico y tecnológico que promueva una gestión sostenible de estos ecosistemas en beneficio de las poblaciones vinculadas.

La Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM) desarrolla estudios sobre calidad del agua y dinámicas socioambientales en zonas de montaña, a fin de evaluar los posibles impactos del drenaje ácido de roca (DAR) asociados al cambio climático.

El presente reporte, denominado «Evaluación de la concentración de metales en el agua superficial de la Unidad Hidrográfica (UH) Pucavado», presenta los resultados del monitoreo realizado de 2020 a 2024. El estudio incluye el análisis de parámetros fisicoquímicos y de metales en la zona alta de esta unidad hidrográfica, con el objetivo de evaluar la calidad del agua conforme a los estándares de calidad ambiental (ECA) e identificar posibles áreas afectadas por procesos de generación de DAR.

El estudio constituye una línea de base científica para futuras investigaciones y un insumo técnico para los tomadores de decisión. Sus resultados se enfocan en detectar los impactos del DAR en los parámetros vinculados a la calidad del agua.

Este trabajo refleja el compromiso del Inaigem con la investigación y la gestión sostenible de los recursos hídricos en los ecosistemas de montaña. Los resultados están a disposición de autoridades locales, investigadores y demás actores clave, con el fin de impulsar acciones de adaptación frente al cambio climático.

INTRODUCCIÓN

La cordillera Blanca, ubicada en el departamento de Áncash, Perú, concentra aproximadamente el 40,45 % de los glaciares del país (Inaigem, 2023). Su rasgo geomorfológico más relevante es su desarrollo sobre una superficie escarpada atravesada por la falla de la cordillera Blanca, de carácter activo, que ha modelado significativamente el relieve (Macharé et al., 2003). En las últimas décadas, la superficie glaciar ha retrocedido de forma progresiva, lo que se evidencia en el aumento del número y la extensión de lagunas glaciares. Este fenómeno incrementa la exposición de la población a diversos riesgos asociados al retroceso glaciar (Emmer & Vilímek, 2013; Georges, 2004).

En la actualidad, la cordillera experimenta los impactos del cambio climático, expresados en la reducción de la masa de hielo, con efectos directos sobre la oferta hídrica y, por ende, sobre actividades como la agricultura, la ganadería y el consumo humano de las comunidades que dependen de este recurso (Pozada-Rengifo et al., 2023).

La UH Pucavado forma parte de la cuenca del río Marañón, en la vertiente amazónica (Instituto Andino de Montaña [IDM], 2023). Se ubica en el distrito de Chavín de Huántar, provincia de Huari (Áncash). Es una de las unidades hidrográficas menos estudiadas y existe escasa información sobre su calidad de agua.

El drenaje ácido de roca (DAR) se intensifica con el retroceso glaciar, al exponerse rocas ricas en pirita, las reacciones con oxígeno y agua generan acidez (disminuye el pH del agua) y aumentan la concentración de metales pesados. Este proceso también se ha reportado en otras cordilleras glaciares, aunque su identificación requiere más estudios (Montano Chávez et al., 2022; Santofimia et al., 2017; Zimmer et al., 2018).

Este reporte, elaborado por la Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM), compila datos de 2021 a 2024. En este periodo se evaluaron parámetros de calidad de agua —pH, conductividad eléctrica y concentraciones de metales (Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn, Cr y Hg)— y se compararon con los estándares de calidad ambiental (ECA) establecidos en el Decreto Supremo N.º 004-2017-Minam.

El monitoreo se realizó en nueve puntos. Del punto 1 al 4 se mantuvieron dentro de los rangos de la normativa vigente. En contraste, del punto 5 al 9 se presentaron incumplimientos respecto a los ECA para agua en diversos parámetros. En estos puntos se observaron pH con tendencia ácida y concentraciones elevadas de aluminio, cobre, manganeso, plomo y zinc. En particular, el punto 7 mostró los promedios más altos de conductividad eléctrica (1 657,75 $\mu\text{S}/\text{cm}$), aluminio (54,674 mg/L), cobre (0,28273 mg/L) y manganeso (7,4846 mg/L), superando los límites normativos en todos los registros (promedio, mínimo y máximo). Este punto corresponde a un socavón antiguo vinculado a la extracción de carbón, actualmente inactivo.

Estos resultados subrayan la urgencia de implementar estrategias de gestión sostenible para mejorar la calidad del agua y proteger tanto los ecosistemas acuáticos como a las comunidades que dependen de este recurso.

1. ASPECTOS GENERALES DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA (UH) PUCAVADO

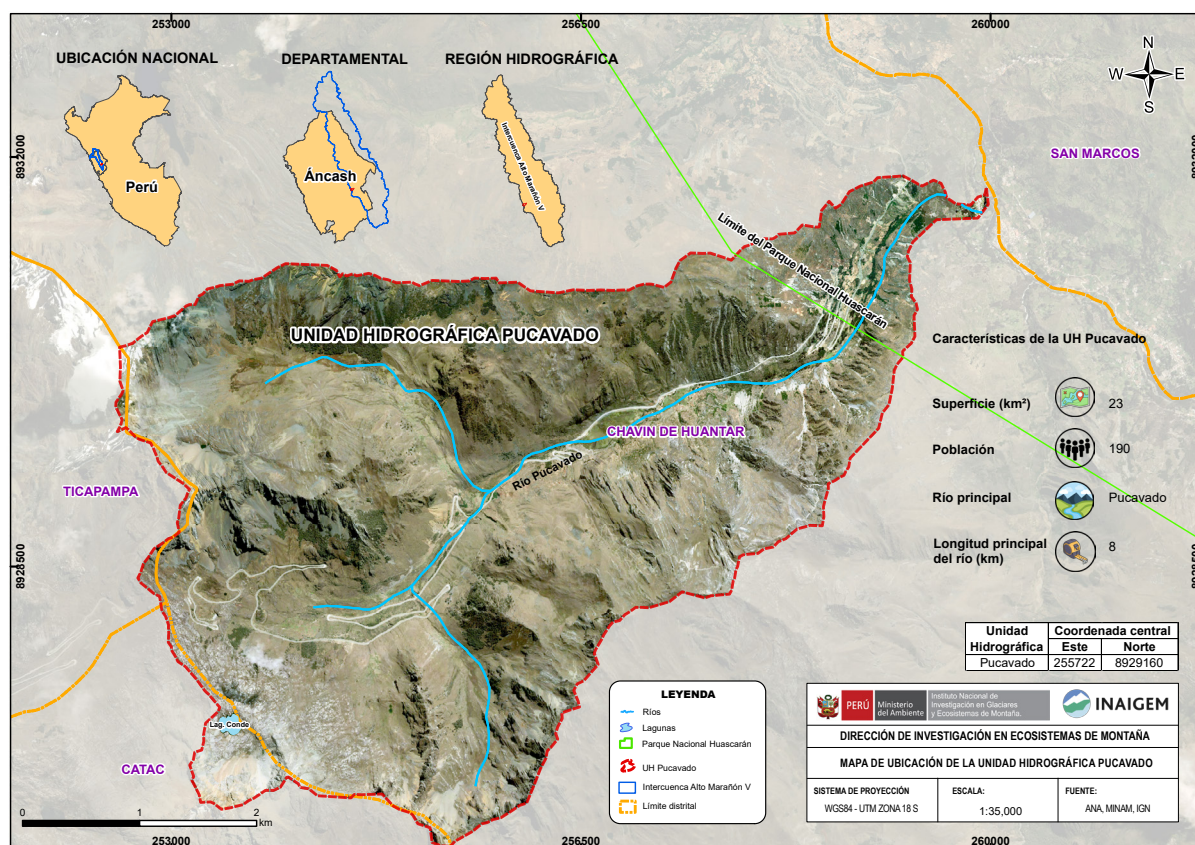
La Unidad Hidrográfica Pucavado se ubica en el distrito de Chavín de Huántar, provincia de Huari, departamento de Áncash. Tiene una extensión aproximada de 23 155 914,24 m² y un perímetro de 24 608,42 m (IDEP, 2022). Sus aguas confluyen en el río Mosna, perteneciente a la vertiente del río Marañón (Ingemmet, 1998). Abarca los centros poblados de Shirapa, Tambillos y Cristo Rey de Quelleyaco, con una población aproximada de 190 habitantes (INEI, 2025).

Hidrográficamente, se encuentra dentro de la subcuenca Puchka, parte de la cuenca del río Marañón en la vertiente del Amazonas. Limita al norte con la quebrada Hualpish, al oeste con la quebrada Cotush y al sureste con la quebrada Tayash. Su zona de vida corresponde al páramo húmedo, donde predominan pastizales, arbustos y algunas especies arbóreas; se registra la presencia de especies exóticas como pino y eucalipto. Cuenta con dos humedales (bofedales) utilizados para el pastoreo del ganado, los cuales presentan pH ácido (~5,7) y una profundidad de turba > 100 cm (Fuentealba & Mejía, 2017).

Tabla 1. Características principales de la UH Pucavado

Características		Descripción
Nombre de la UH		Pucavado
Clasificación	Nivel	9
	Código pfaftetter	498996938
Ubicación	Política	Distrito de Chavín de Huántar, provincia de Huari, departamento de Áncash
	Geográfica	9° 40' 48,28" S y 77° 13' 34,43" W
Vertiente hidrográfica		Río Marañón, Amazonas
Superficies (kilómetros cuadrados)		23
Río principal (km)		8
Altitud (m s. n. m.)		3 400-5 200 m s.n.m.
Población aproximada		190
Principales usos		Ganadería y agricultura

Figura 1. Mapa de ubicación de la UH Pucavado



2. MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA UH PUCAVADO

2.1. METODOLOGÍA

Para el monitoreo de la calidad del agua en la UH Pucavado se tomó como referencia el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales-Resolución Jefatural N.° 010-2016-ANA. El proceso se desarrolló en tres etapas claves:

a) Diseño de la red de puntos de monitoreo:

El diseño se basó en una evaluación técnica orientada a priorizar la identificación de áreas con potenciales impactos de drenaje ácido de roca (DAR). Para su definición se consideraron los siguientes criterios: i) Representatividad espacial, asegurando que los puntos reflejen la configuración de la red hidrográfica. ii) Accesibilidad y seguridad para el personal de campo. iii) Ubicación en cursos de agua de régimen permanente, a fin de garantizar la continuidad de las mediciones en el tiempo. iv) Generación de información sistemática sobre el estado de las aguas superficiales. Bajo este enfoque, la red de monitoreo se consolida como herramienta clave para la caracterización de la posible presencia de DAR, objetivo principal del estudio.

b) Ejecución del trabajo de campo:

La fase de campo se realizó en estricta observancia del protocolo establecido y de las directrices de cada laboratorio, a fin de garantizar la precisión, trazabilidad y representatividad de los datos. Las principales actividades incluyeron:

- » Mediciones *in situ*: registro de parámetros fisicoquímicos fundamentales (pH, conductividad eléctrica y turbidez) con equipos multiparámetro y turbidímetros previamente calibrados.
- » Muestreo para análisis de laboratorio: recolección de muestras de agua para la determinación de 11 metales: aluminio (Al), arsénico (As), boro (B), cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), plomo (Pb), zinc (Zn), cromo (Cr) y mercurio (Hg), siguiendo las especificaciones del laboratorio acreditado.

c) Evaluación y análisis de datos

Los resultados se procesaron y compararon con los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua establecidos en el Decreto Supremo N.º 004-2017-Minam. Este procedimiento permitió identificar puntos críticos de monitoreo y generar información de base para futuras investigaciones y para la toma de decisiones.

A continuación, en la tabla 2 se presenta la frecuencia de monitoreo, el laboratorio que realizó los análisis de metales y el método analítico empleado.

Tabla 2. Frecuencia de análisis, laboratorio y método de análisis

Número de evaluación	Fecha	Laboratorio	Método de análisis
1	Setiembre de 2020	SGS del Perú ⁱ	ICP-MS ⁱⁱ
2	Mayo de 2021		
3	Agosto de 2021		
4	Mayo de 2022		
5	Setiembre de 2022		
6	Abril de 2024		
7	Agosto de 2024		

ⁱ SGS del Perú S. A. C., ubicado en la ciudad Lima. Acreditado en todos los parámetros analizados.

ⁱⁱ Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

Figura 2. Toma de muestra de agua en el punto 6 y 5 de la UH Pucavado



2.2. EQUIPOS Y MATERIALES

Para garantizar la confiabilidad de los resultados del monitoreo de la calidad del agua en la UH Pucavado, se emplearon equipos y materiales adecuados a las exigencias del trabajo de campo y de los análisis posteriores. Las muestras se recolectaron en frascos de polietileno de 100 mL, cumpliendo los requisitos del laboratorio y utilizando guantes de látex para evitar contaminación externa.

Las mediciones *in situ* se realizaron con instrumentos portátiles de campo. Se utilizó un multiparámetro para el registro simultáneo de temperatura, pH y conductividad eléctrica, indicadores fundamentales para la evaluación preliminar de la calidad del agua, y un turbidímetro para determinar la concentración de partículas en suspensión. Todos los parámetros se midieron directamente en cada punto de muestreo, asegurando la representatividad y la precisión de los datos recolectados.

Figura 3. Medición de parámetros fisicoquímicos en el punto 8 de la UH Pucavado

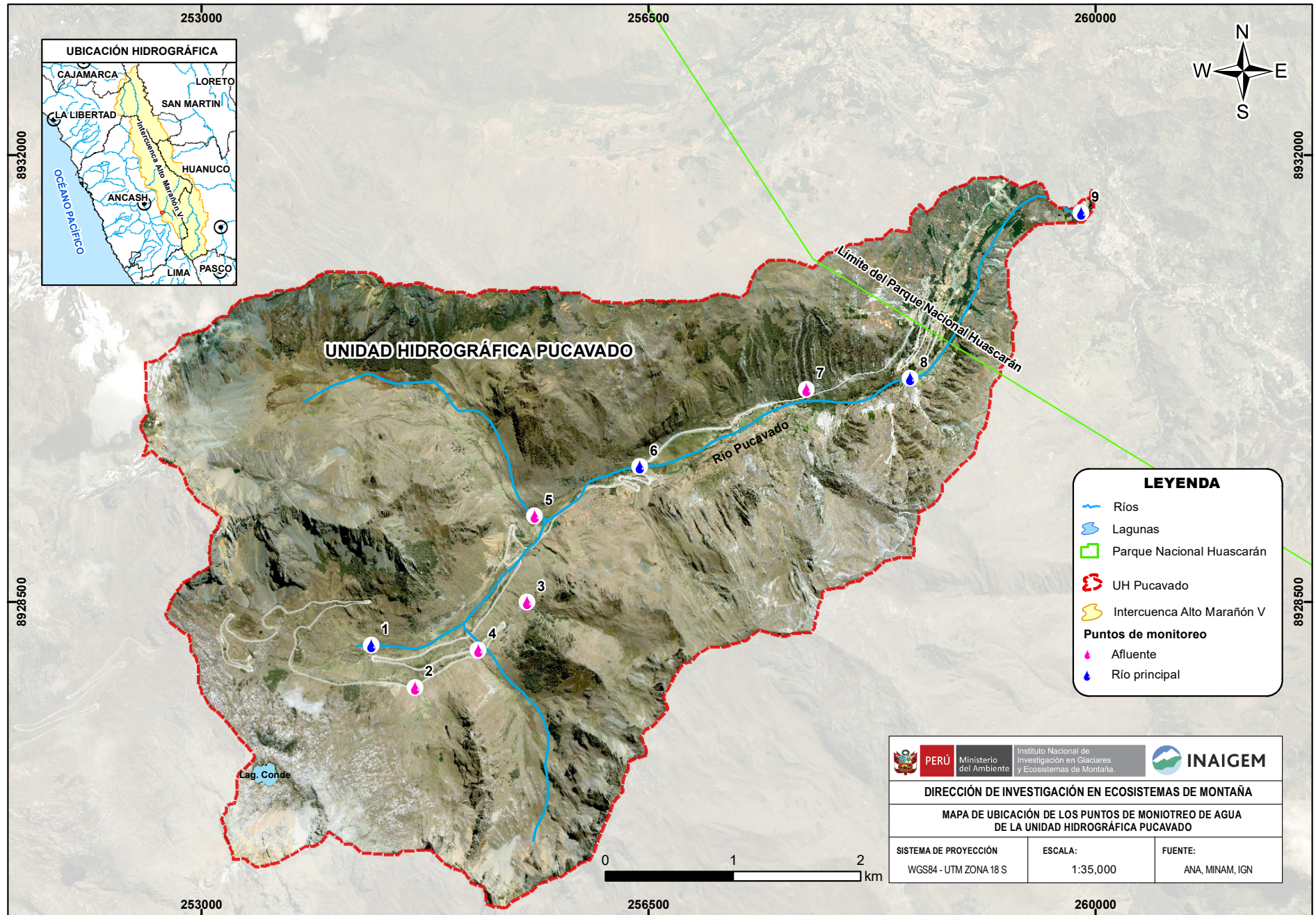


2.3. REDES DE PUNTO DE MONITOREO

En la figura 4 se presentan los nueve puntos de monitoreo establecidos en la UH Pucavado: cuatro en el cauce principal y cinco en sus afluentes. La selección respondió a criterios hidrológicos y ambientales, considerando la permanencia de los cauces y su vinculación con áreas potencialmente con presencia de drenaje ácido de roca (DAR), para garantizar la representatividad de las condiciones hidrológicas y detectar evidencias de DAR en distintos momentos del año.

Además, se priorizaron sitios accesibles y seguros para reducir riesgos en campo y asegurar la continuidad de las campañas de monitoreo. En esta UH se evaluó un punto en un socavón antiguo vinculado a la extracción de carbón, actualmente inactivo (punto 7). Aunque este sitio no figura como pasivo ambiental en la Resolución Ministerial N.º 510-2023-MINEM/DM, su inclusión se justificó por encontrarse dentro del área de estudio y por su relevancia para la caracterización integral del DAR.

Figura 4. Mapa de puntos de monitoreo en la UH Pucavado



3. RESULTADOS DEL MONITOREO

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a la evaluación de la concentración de metales en el agua superficial de la UH Pucavado, 2020-2024. La información se organiza por parámetro y por punto de monitoreo, mostrando primero los datos del cauce principal y luego los de sus afluentes. Cabe señalar que en 2023 no se realizaron campañas de campo, por lo que no hay datos para ese año.

En la tabla 3 se presentan los resultados de los parámetros medidos *in situ* —pH, conductividad eléctrica (CE) y turbidez—, así como de once metales: aluminio (Al), arsénico (As), boro (B), cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), plomo (Pb), zinc (Zn), cromo (Cr) y mercurio (Hg). Para cada parámetro se reportan los valores promedio, mínimo y máximo registrados durante el periodo de estudio.

Los resultados se compararon con los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua del Decreto Supremo N.º 004-2017-Minam, específicamente con:

- » Categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales (subcategorías D1 y D2).
- » Categoría 4: conservación del ambiente acuático (subcategoría E2: ríos de la costa y sierra).

Dado que estas categorías aplican a los cuerpos de agua del área de estudio, los puntos 1 al 8 se ubican dentro de un área natural protegida. En contraste, el punto 9 se localiza fuera del Parque Nacional Huascarán, en la franja de amortiguamiento, donde el uso del recurso hídrico está más vinculado a actividades productivas (ganadería y agricultura).

En los resultados se observa que los puntos 5 al 9 presentan valores de pH (promedio, mínimo y máximo) por debajo del rango establecido en los ECA. Los promedios registrados fueron: 3,37 (punto 5), 4,65 (punto 6), 2,64 (punto 7), 4,09 (punto 8) y 4,34 (punto 9).

Respecto a la conductividad eléctrica (CE), el punto 7 registró promedios, mínimos y máximos superiores a lo establecido para la categoría 4, subcategoría E2 (ríos de costa y sierra), con un promedio de 1 657,75 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Respecto al aluminio (Al), se identificaron incumplimientos del ECA para agua en la categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales), subcategorías D1 y D2, el punto 7 superó los límites en valores promedio, mínimo y máximo; el punto 5 en promedio y máximo; y el punto 6 en el valor máximo, registrándose los promedios más altos en el punto 5 (5,725 mg/L) y en el punto 7 (54,674 mg/L).

En cuanto al cadmio (Cd), el punto 7 incumplió la subcategoría D1 (riego de vegetales) de la categoría 3 tanto en el promedio como en el máximo, con una concentración promedio de 0,01055 mg/L. De igual forma, para el cobre (Cu), el punto 7 presentó incumplimientos respecto al ECA en la subcategoría D1 de la categoría 3 y en la subcategoría E2 (ríos) de la categoría 4, también en promedio y máximo, con un promedio de 0,28273 mg/L.

Respecto al manganeso (Mn), los puntos 5, 6, 7, 8 y 9 registraron concentraciones (promedio, mínimo y máximo) por encima de los valores permitidos del ECA para agua (categoría 3: D1 y D2), con promedios de 1,295 mg/L (punto 5), 0,606 mg/L (punto 6), 7,4846 mg/L (punto 7), 0,5945 mg/L (punto 8) y 0,5831 mg/L (punto 9), siendo el punto 7 el de mayor valor.

En el caso del plomo (Pb), los puntos 8 y 9 (promedio, mínimo y máximo), el punto 7 (promedio y máximo) y el punto 6 (máximo) registraron concentraciones superiores a los límites del ECA para agua, categoría 4, subcategoría E2. Los valores promedio fueron 0,00756 mg/L en el punto 7, 0,01167 mg/L en el punto 8 y 0,00856 mg/L en el punto 9.

Respecto al zinc (Zn), los puntos 5, 6, 7, 8 y 9 presentaron concentraciones elevadas (promedio, mínimo y máximo) que incumplen el ECA para agua, categoría 4, subcategoría E2. Los promedios registrados fueron 0,389 mg/L (punto 5), 0,171 mg/L (punto 6), 1,712 mg/L (punto 7), 0,394 mg/L (punto 8) y 0,384 mg/L (punto 9).

Del análisis conjunto de los nueve puntos se identificaron dos grupos. El grupo 1 (puntos 5, 6, 7, 8 y 9) presentó incumplimientos en pH, conductividad eléctrica, Al, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn; dentro de este grupo, el punto 7 destacó por exceder promedios, mínimos y máximos en la mayoría de parámetros según el ECA. Por su parte, el grupo 2 (puntos 1, 2, 3 y 4) se mantuvo dentro de los límites establecidos, evidenciando mejor calidad en comparación con el grupo 1.

A continuación, se muestra la figura 5 una representación gráfica de los resultados de la tabla 3. Como ejemplo, se muestran los valores de pH del punto 1, donde los promedios, mínimos y máximos se ubican dentro del rango permitido por el ECA para agua en la categoría 4, subcategoría E2: ríos, y en la categoría 3, subcategorías D1 (riego de vegetales) y D2 (bebida de animales), cuyos rangos permitidos van de 6,5 a 9.

Figura 5. Evaluación del pH en el punto 1 de la UH Pucavado (2020-2024)

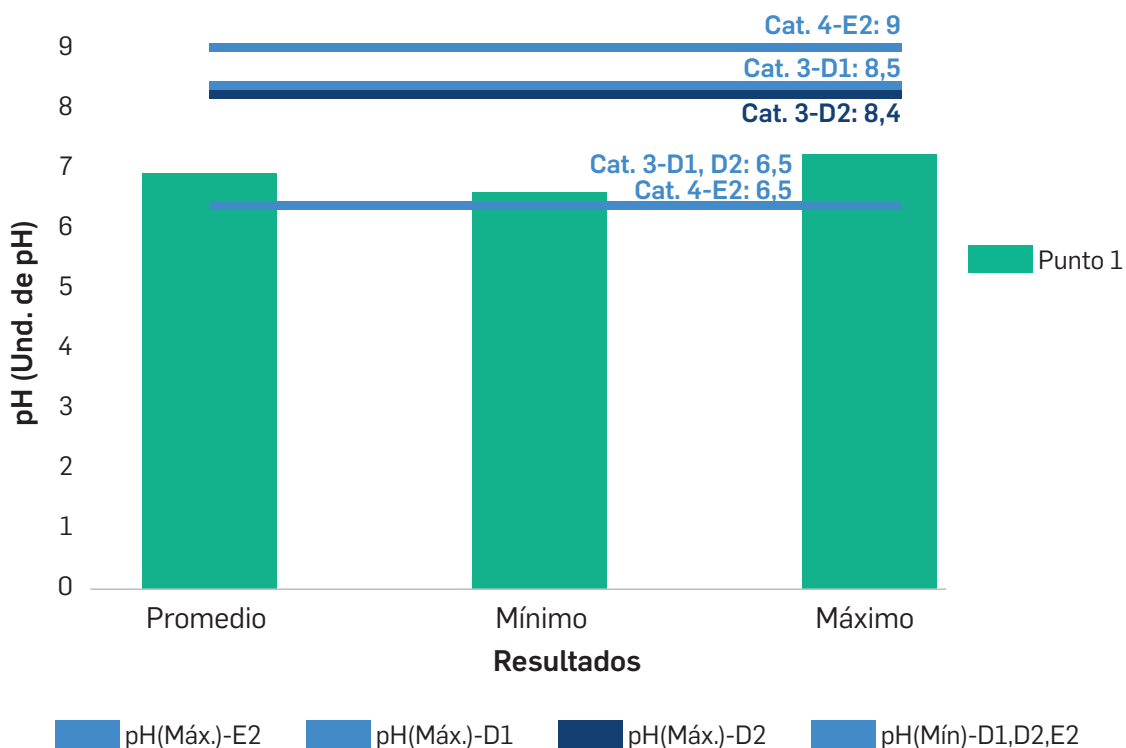


Tabla 3. Resultados de los parámetros evaluados en la UH Pucavado de 2020 a 2024

Zona de estudio	Puntos de monitoreo	pH (Unidad de pH)			Conductividad Eléctrica (uS/cm)			Turb. (NTU)			Al (mg/L)			
		V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	
Unidad hidrográfica Pucavado	Río principal	1	6,88	6,56	7,20	94,00	74,38	113,62	8,74	7,65	9,83	0,399	0,268	0,531
		6	4,65	4,34	4,97	238,67	163,91	313,43	9,95	8,72	11,18	3,194	1,168	5,220
		8	4,09	3,87	4,31	227,67	160,33	295,01	10,94	10,21	11,67	2,371	1,456	3,286
		9	4,34	4,16	4,51	217,17	155,26	279,08	11,92	11,19	12,65	2,142	1,458	2,827
	Afluentes	2	7,43	7,13	7,72	74,75	48,68	100,82	6,45	5,43	7,46	0,024	0,015	0,033
		3	7,28	6,91	7,65	31,00	24,85	37,15	5,79	4,53	7,05	< 0,003*	< 0,003*	< 0,003*
		4	7,18	7,04	7,32	33,00	22,05	43,95	7,24	6,22	8,26	0,027	0,005	0,049
	5	3,37	3,17	3,57	557,17	364,20	750,13	8,57	7,29	9,84	5,725	3,850	7,601	
	7	2,64	2,46	2,82	1657,75	1166,68	2148,82	9,30	8,19	10,41	54,674	16,308	93,039	
ECA para el agua (categoría 3 - D1)		6,5 - 8,5			2500			-----			5			
ECA para el agua (categoría 3 - D2)		6,5 - 8,4			5000			-----			5			
ECA para el agua (categoría 4 - E2)		6,5 - 9,0			1000			-----			-----			

■ Incumple las tres subcategorías.

■ Incumple de una a dos subcategorías.

□ Cumple con todas las subcategorías.

* Los valores obtenidos se encuentran por debajo del valor de cuantificación.

Zona de estudio	Puntos de monitoreo	As (mg/L)			Cd (mg/L)			Cu (mg/L)			Fe (mg/L)			
		V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	
Unidad hidrográfica Pucavado	Río principal	1	0,0014	0,0001	0,0027	0,00050	0,00042	0,00058	0,00025	0,00004	0,00046	0,053	0,047	0,059
		6	0,0050	0,0000	0,0123	0,00033	0,00027	0,00038	0,00173	0,00066	0,00280	2,897	0,000	6,796
		8	0,0017	0,0013	0,0022	0,00129	0,00114	0,00144	0,00228	0,00178	0,00277	1,168	0,593	1,742
		9	0,0003	0,0000	0,0006	0,00128	0,00115	0,00141	0,00187	0,00146	0,00228	0,547	0,230	0,865
	Afluentes	2	0,0051	0,0028	0,0074	< 0,00003*	< 0,00003*	< 0,00003*	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*	0,027	0,013	0,042
		3	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,00003*	< 0,00003*	< 0,00003*	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*	0,041	0,019	0,064
		4	0,0012	0,0000	0,0031	0,00006	0,00001	0,00011	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*	0,115	0,067	0,163
	5	0,0010	0,0000	0,0019	0,00054	0,00046	0,00061	0,00148	0,00127	0,00168	1,884	0,754	3,013	
	7	0,0010	0,0004	0,0015	0,01055	0,00728	0,01381	0,28273	0,18930	0,37617	84,599	56,781	112,418	
ECA para el agua (categoría 3 - D1)		0,1			0,01			0,2			5			
ECA para el agua (categoría 3 - D2)		0,2			0,05			0,5			-----			
ECA para el agua (categoría 4 - E2)		0,15			-----			0,1			-----			

■ Incumple de una a dos subcategorías.

□ Cumple con todas las subcategorías.

* Los valores obtenidos se encuentran por debajo del valor de cuantificación.

Zona de estudio	Puntos de monitoreo	Mn (mg/L)			Pb (mg/L)			Zn (mg/L)			
		V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	
Unidad hidrográfica Pucawado	Río principal	1	0,0729	0,0490	0,0969	0,00066	0,00053	0,00079	0,070	0,049	0,090
		6	0,6060	0,3959	0,8161	0,00171	0,00046	0,00297	0,171	0,127	0,216
		8	0,5945	0,4125	0,7765	0,01167	0,00948	0,01386	0,394	0,307	0,481
		9	0,5831	0,4249	0,7413	0,00856	0,00713	0,00998	0,384	0,307	0,460
	Afluentes	2	0,0014	0,0006	0,0022	< 0,0006*	< 0,0006*	< 0,0006*	0,006	0,000	0,013
		3	0,0080	0,0036	0,0124	< 0,0006*	< 0,0006*	< 0,0006*	0,009	0,005	0,013
		4	0,0444	0,0308	0,0581	< 0,0006*	< 0,0006*	< 0,0006*	0,022	0,003	0,041
5		1,2950	0,8396	1,7505	0,00076	0,00058	0,00093	0,389	0,278	0,500	
7	7,4846	4,2026	10,7667	0,00756	0,00246	0,01266	1,712	1,135	2,289		
ECA para el agua (categoría 3 - D1)			0,2			0,05		2			
ECA para el agua (categoría 3 - D2)			0,2			0,05		24			
ECA para el agua (categoría 4 - E2)			----			0,0025		0,12			

■ Incumple de una a dos subcategorías.

□ Cumple con todas las subcategorías.

*Los valores obtenidos se encuentran por debajo del valor de cuantificación.

Zona de estudio	Puntos de monitoreo	B (mg/L)			Cr (mg/L)			Hg (mg/L)			
		V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	V. prom.	V. mín.	V. máx.	
Unidad hidrográfica Pucawado	Río principal	1	< 0,006*	< 0,006*	< 0,006*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*
		6	< 0,006*	< 0,006*	< 0,006*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*
		8	< 0,006*	< 0,006*	< 0,006*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*
		9	0,0061	0,0059	0,0064	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*
	Afluentes	2	< 0,006*	< 0,006*	< 0,006*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*
		3	< 0,006*	< 0,006*	< 0,006*	0,00032	0,00028	0,00036	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*
		4	< 0,006*	< 0,006*	< 0,006*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*
5		< 0,006*	< 0,006*	< 0,006*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,0003*	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*	
7	< 0,006*	< 0,006*	< 0,006*	0,0053	0,0026	0,0079	< 0,00009*	< 0,00009*	< 0,00009*		
ECA para el agua (categoría 3 - D1)			1			0,1		0,001			
ECA para el agua (categoría 3 - D2)			5			1		0,01			
ECA para el agua (categoría 4 - E2)			----			----		0,0001			

□ Cumple con todas las subcategorías

* Los valores obtenidos se encuentran por debajo del valor de cuantificación.

3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

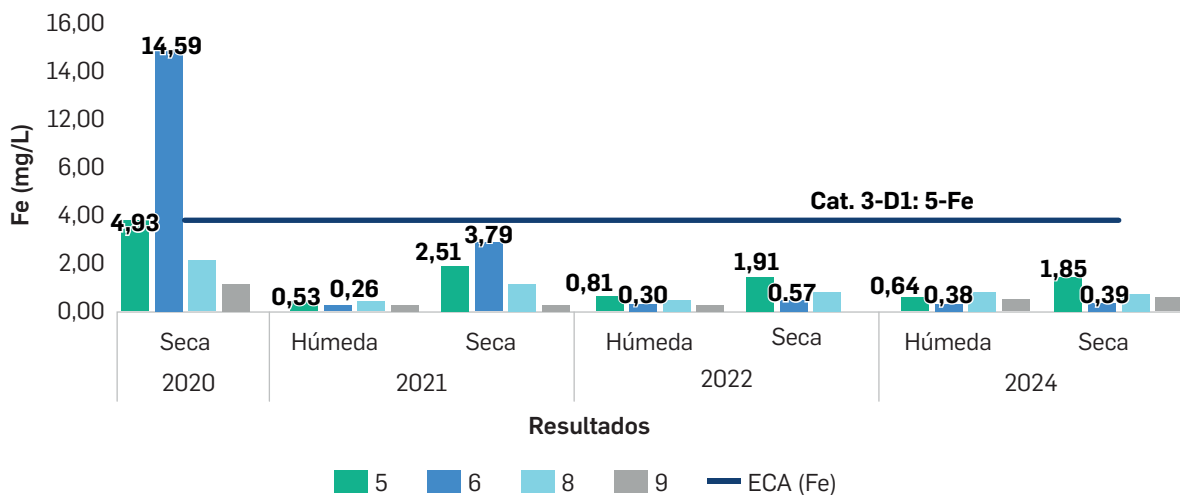
Este apartado presenta el análisis de los puntos de monitoreo que superaron los valores del ECA en alguna de las épocas evaluadas (húmeda o seca) durante todo el periodo de estudio. Cabe precisar que el punto 7 no fue considerado, por tratarse de un socavón antiguo asociado a la extracción de carbón —actualmente inactivo— y no de un sitio afectado por drenaje ácido de roca (DAR) de origen natural.

En la figura 6 se muestran las concentraciones de hierro (Fe) registradas en los puntos 5, 6, 8 y 9, comparadas con el límite de 5 mg/L establecido en el ECA. Los resultados evidencian concentraciones más altas en la época seca. El punto 6 alcanzó 14,59 mg/L en la época seca de 2020, casi el triple del límite, seguido del punto 5, que en el mismo periodo reportó 4,93 mg/L, valor próximo al umbral normativo.

A partir de 2021, las concentraciones de hierro (Fe) no superaron el valor establecido en el ECA para la categoría 3. Sin embargo, se observa una marcada variación estacional: las concentraciones disminuyen en época húmeda y aumentan de forma recurrente en época seca, especialmente en los puntos 5 y 6. En los últimos años de monitoreo, durante la época seca, se registraron 0,57-1,91 mg/L en 2022 y 0,39-1,85 mg/L en 2024.

Este patrón estacional, con picos en periodos de menor precipitación, es consistente con el mecanismo típico del DAR: la reducción del caudal limita la capacidad de dilución de los metales liberados de manera natural desde el sustrato rocoso.

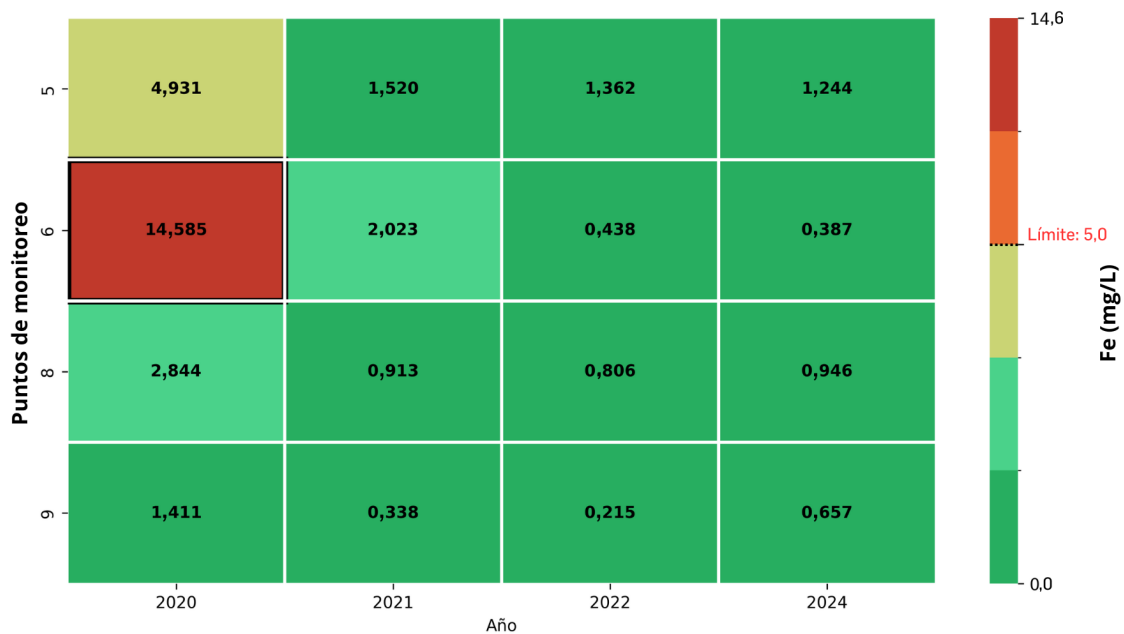
Figura 6. Evolución de la concentración de Fe (mg/L) para el periodo 2020-2024



La figura 7 presenta el diagrama de calor de las concentraciones anuales de hierro (Fe) para el periodo 2020-2024. Este recurso permite comparar, de forma conjunta, las variaciones temporales y espaciales entre los puntos de monitoreo. Se observa un patrón de mayores concentraciones en los primeros años de evaluación y una tendencia general a la disminución en los años posteriores, especialmente en los puntos más impactados.

Asimismo, el diagrama muestra que los puntos 8 y 9 mantuvieron concentraciones relativamente estables y dentro de los rangos normativos, en contraste con los puntos 5 y 6, que exhibieron las mayores fluctuaciones. Este comportamiento refuerza la influencia del drenaje ácido de roca (DAR) como factor predominante al inicio del periodo y su progresiva atenuación en los años siguientes.

Figura 7. Diagrama de calor de la concentración anual de hierro (Fe) en el periodo 2020-2024

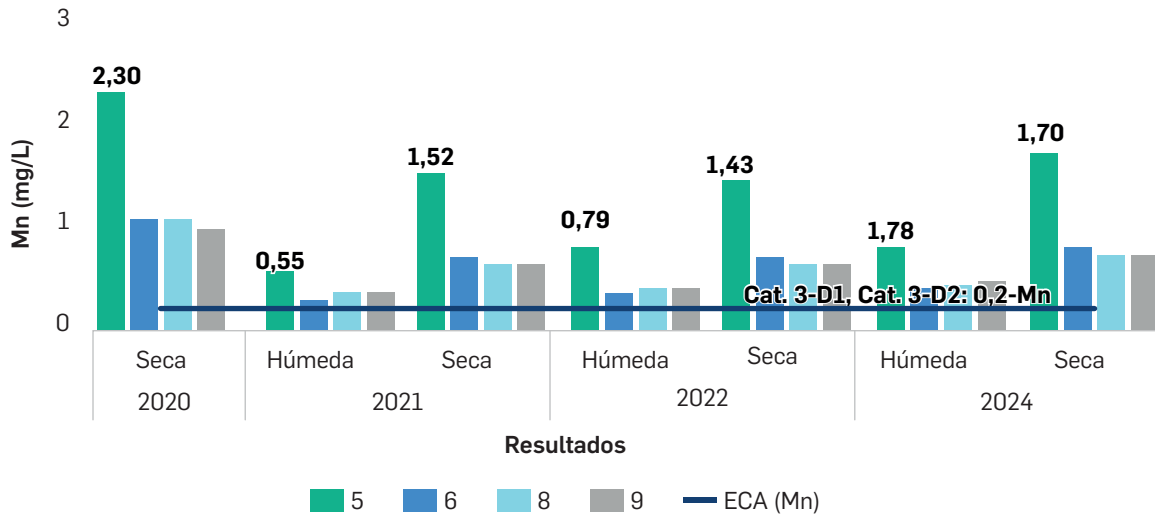


La figura 8 presenta los resultados de manganeso (Mn) para el periodo 2020-2024. Se observa que todos los puntos de monitoreo (5, 6, 8 y 9) superan el límite de 0,2 mg/L establecido en el ECA para agua, categoría 3, subcategorías D1 (riego de vegetales) y D2 (bebida de animales), tanto en época húmeda como en época seca.

El punto 5 constituye el caso más crítico: en la época seca de 2020 alcanzó 2,30 mg/L (once veces el valor normativo) y, aun con mayor caudal —época húmeda de 2022— registró 0,79 mg/L, más de tres veces el límite. Los puntos 6, 8 y 9, aunque con concentraciones relativamente menores, mantienen un patrón estacional marcado, con valores superiores a lo establecido en ambas temporadas.

Estos resultados evidencian la influencia continua del drenaje ácido de roca (DAR) en la movilización natural del manganeso, un fenómeno persistente y generalizado que se manifiesta con mayor intensidad durante los periodos de menor precipitación.

Figura 8. Evolución de la concentración de Mn (mg/L) para el periodo 2020-2024

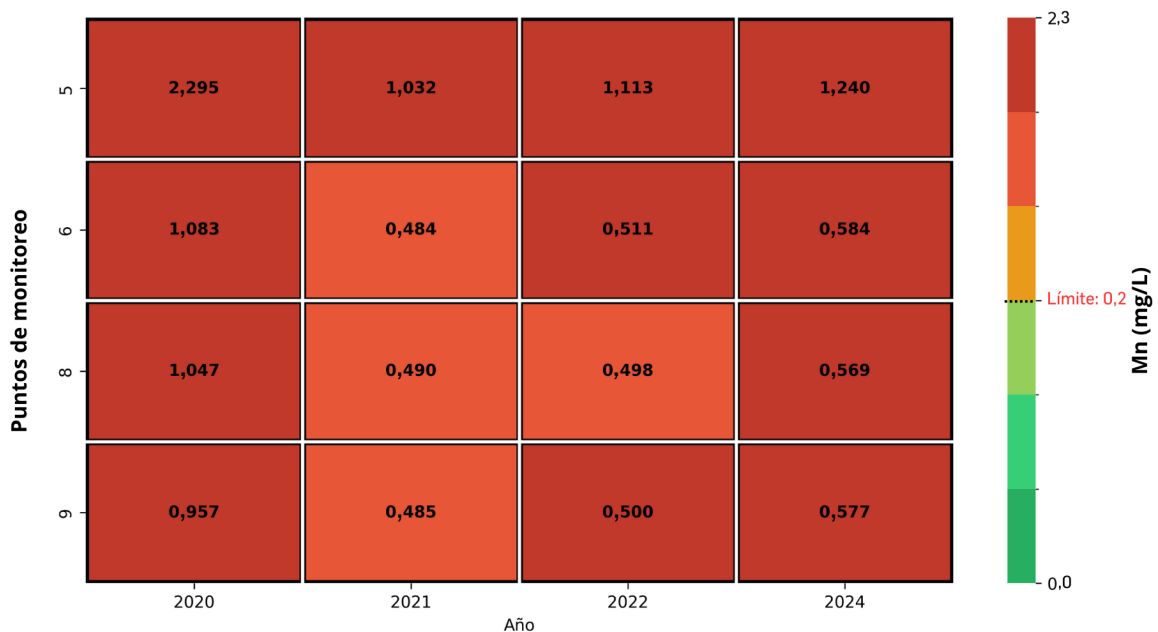


La figura 9 presenta el mapa de calor de las concentraciones de manganeso (Mn) registradas de 2020 a 2024. La visualización permite identificar la magnitud y la persistencia del incumplimiento del ECA-Agua (0,2 mg/L; categoría 3, subcategorías D1 y D2) en todos los puntos de monitoreo.

Se observa un patrón espacial definido: el punto 5 concentra de manera consistente las concentraciones más elevadas del período, con un máximo de 2,295 mg/L en 2020, mientras que los puntos 6, 8 y 9 mantienen valores intermedios (0,484-1,083 mg/L), que superan el límite regulatorio entre dos y cinco veces.

A diferencia de otros parámetros que muestran una disminución interanual, el Mn se mantiene relativamente estable en el tiempo, sin variaciones significativas entre años, lo que confirma la persistencia del drenaje ácido de roca (DAR) como fuente continua de aporte metálico en el área evaluada.

Figura 9. Diagrama de calor de la concentración anual de manganeso (Mn) en el periodo 2020-2024

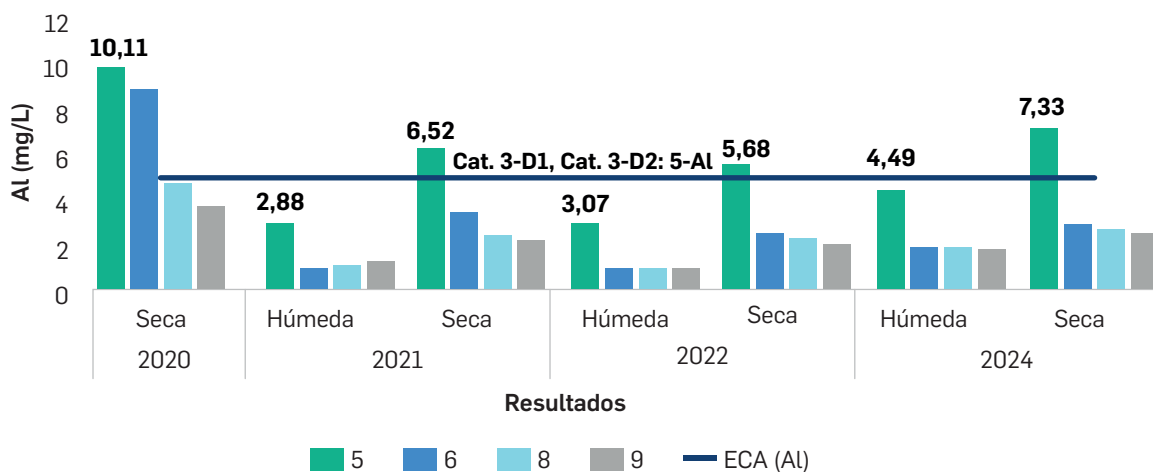


La figura 10 presenta los resultados de aluminio (Al) para el periodo 2020-2024. El valor del ECA-Agua para categoría 3, subcategorías D1 (riego de vegetales) y D2 (bebida de animales), fijado en 5 mg/L, se supera en múltiples ocasiones, principalmente durante las temporadas secas.

El punto 5 concentra las mayores concentraciones, con un máximo de 10,11 mg/L en la época seca de 2020 —el doble del límite— y promedios elevados en todos los periodos secos (6,52 mg/L en 2021; 5,68 mg/L en 2022; 7,33 mg/L en 2024). De forma similar, los puntos 6, 8 y 9 también registran incumplimientos en época seca, destacando la concentración de 9,07 mg/L en el punto 6 en 2020.

En contraste, durante las épocas húmedas las concentraciones tienden a disminuir y se sitúan cerca o por debajo del umbral del ECA, lo que refleja la mayor disponibilidad hídrica y su efecto de dilución sobre los metales movilizados. Este patrón estacional —picos en la estación seca y reducciones en la húmeda— es característico del drenaje ácido de roca (DAR) en cuerpos de agua superficiales: la disminución del caudal intensifica las concentraciones de aluminio y otros metales, manteniendo un riesgo sostenido para el uso del recurso hídrico.

Figura 10. Evolución de la concentración de Al (mg/L) para el periodo 2020-2024

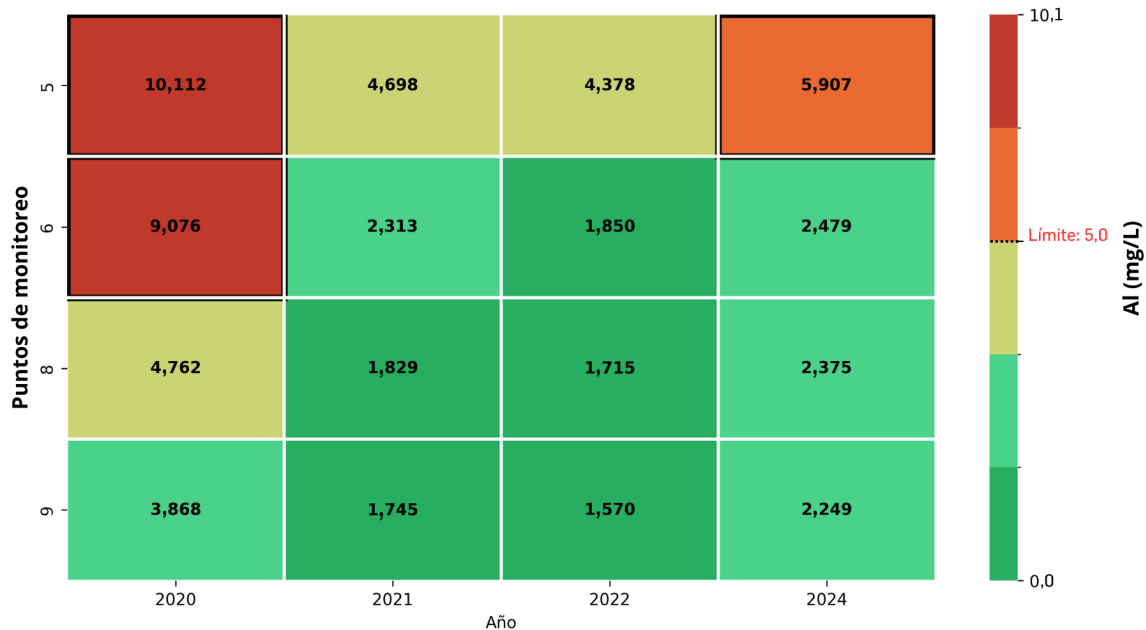


En la figura 11 se muestran las concentraciones de aluminio (Al) durante el período 2020–2024, comparadas con el valor límite del ECA para agua en (5 mg/L, categoría 3, subcategorías D1 y D2).

La representación evidencia dos aspectos relevantes: la distribución espacial y la tendencia temporal. En términos espaciales, se observa un gradiente decreciente desde el punto 5 hacia los puntos 8 y 9, lo que sugiere la existencia de una fuente de aporte de aluminio aguas arriba del punto 5, con una posterior reducción progresiva de las concentraciones a medida que el agua fluye por el cauce, producto de procesos de dilución natural y sedimentación de partículas.

En cuanto al comportamiento temporal, si bien las concentraciones tienden a disminuir en la mayoría de los puntos hacia 2021 y 2022, se identifican incrementos notables en los extremos del período (2020 y 2024). De este modo, se puede visualizar cómo la intensidad del impacto se atenúa aguas abajo, sin dejar de representar una amenaza ambiental en toda la unidad hidrográfica.

Figura 11. Diagrama de calor de la concentración anual de aluminio (Al) en el periodo 2020-2024

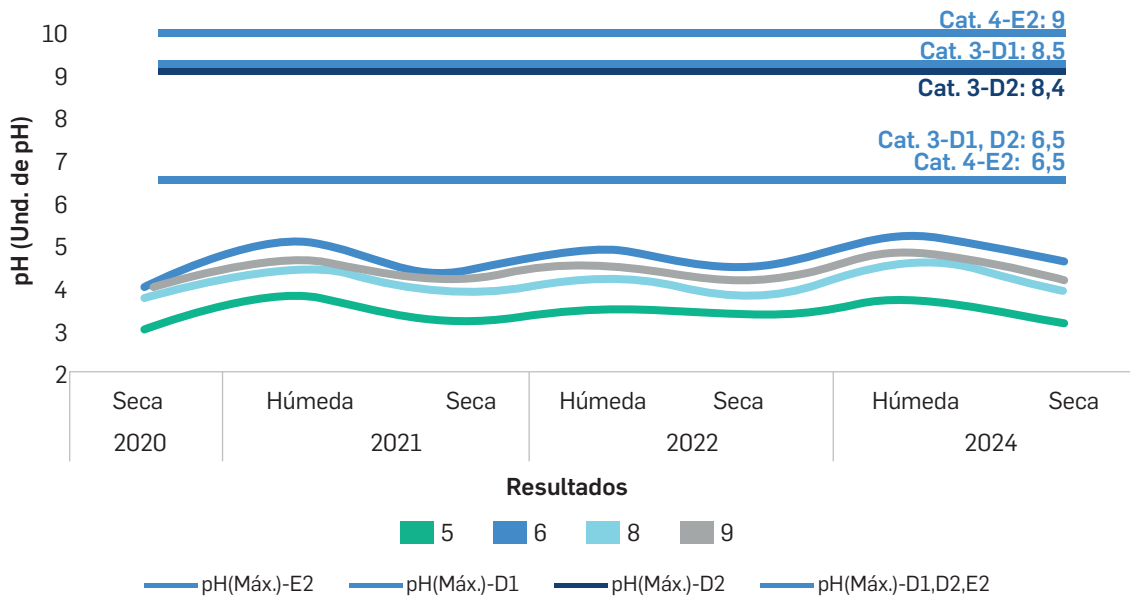


En la figura 12 se presentan los valores de pH registrados en los puntos de monitoreo 5, 6, 8 y 9 de 2020 a 2024. Los resultados muestran un incumplimiento de los límites establecidos en el ECA-agua para las subcategorías D1 (riego de vegetales), D2 (bebida de animales) y la categoría E2 (ríos de la costa y sierra), cuyo rango permitido oscila de 6,5 a 9,0.

En todo el periodo evaluado, los valores se mantienen en un rango ácido, entre 3,04 (punto 5, época seca-2020) y 5,20 (punto 6, época húmeda-2024), sin que en ningún caso se alcance el umbral mínimo de la normativa. La distribución espacial evidencia que el punto 5 concentra las condiciones más severas de acidez (3,04-3,71), seguido por los puntos 8 y 9 (3,77-4,56), mientras que el punto 6 presenta los valores relativamente menos ácidos (4,01-5,20), aunque igualmente fuera de normativa.

La persistencia de esta acidificación, tanto en época secas como húmedas, revela que los procesos del DAR mantienen un efecto continuo en la red hidrográfica, sin señales de recuperación natural. Estas condiciones no solo imposibilitan el cumplimiento ambiental, sino que además configuran un escenario de alta vulnerabilidad ecológica, dado que el pH registrado se encuentra muy por debajo del rango de tolerancia para los usos establecidos en el ECA.

Figura 12. Evolución de los valores de pH (Und.) para el periodo 2020-2024



En la tabla 4 se observa una recurrencia moderada de incumplimientos frente a los valores establecidos por el ECA-agua, principalmente en las categorías y subcategorías: D1 (riego de vegetales), D2 (bebida de animales) y E2 (ríos de la costa y sierra, conservación del ambiente acuático).

Del total de 53 monitoreos realizados, los parámetros con mayor nivel de incumplimiento corresponden al pH y manganeso, cada uno con un 62,3% de registros fuera del estándar normativo. Estos resultados reflejan condiciones de acidez persistente y una fuerte presencia de metales en el sistema hídrico. Otro metal que registra un valor alto de incumplimiento pero que no superar a los valores antes mencionados, es el zinc con 58,5%.

Otros parámetros también presentan incumplimientos, aunque en menor proporción: el plomo con un 37,7%, el aluminio con un 18,9 %, el cobre y el hierro con un 9,4%, la conductividad eléctrica con un 7,5%, y, por último, el cadmio con un 5,7%. Si bien estos porcentajes son más bajos, su presencia refuerza el diagnóstico de afectación de la calidad del agua.

El patrón observado confirma la influencia de los procesos del DAR en los puntos 5, 6, 8 y 9, asociados principalmente al retroceso glaciar en la zona, que expone minerales de sulfuros responsables de la generación de acidez y la consecuente movilización de metales. En contraste, en el punto 7 predomina la influencia del drenaje ácido de mina (DAM), siendo el único punto que no presenta causas naturales de generación de acidez y la liberación de metales.

Tabla 4. Recurrencia de parámetros que incumplen el ECA en la UH Pucavado (2020-2024)

Parámetros	Valor ECA Agua	Recurrencia (%)
pH (Unid)	6,5-8,5 (Cat 3-D1) 6,5-8,4 (Cat 3-D2) 6,5-9,0 (Cat 4-E2)	62,3%
Conductividad (uS/cm)	≥ 1 000 (Cat 4-E2)	7,5%
Aluminio (Al)	≥ 5 mg/L (Cat 3-D1) ≥ 5 mg/L (Cat 3-D2)	18,9%
Cadmio (Cd)	≥ 0,01 mg/L (Cat 3-D1) ≥ 0,05 mg/L (Cat 3-D2)	5,7%
Cobre (Cu)	≥ 0,01 mg/L (Cat 4-E2)	9,4%
Hierro (Fe)	≥ 5 mg/L (Cat 3-D1)	9,4%
Manganeso (Mn)	≥ 0,2 mg/L (Cat 3-D1) ≥ 0,2 mg/L (Cat 3-D2)	62,3%
Plomo (Pb)	≥ 0,0025 mg/L (Cat 4-E2)	37,7%
Zinc (Zn)	≥ 0,12 mg/L (Cat 4-E2)	58,5%

3.2. MAPA DE RESULTADOS

En la figura 13 se presenta el mapa de resultados del monitoreo en la UH Pucavado, elaborado a partir de los datos de parámetros fisicoquímicos y metales totales obtenidos de 2020 a 2024. Cabe señalar que en 2023 no se realizaron campañas de campo, por lo que la información corresponde únicamente a los años con registros disponibles.

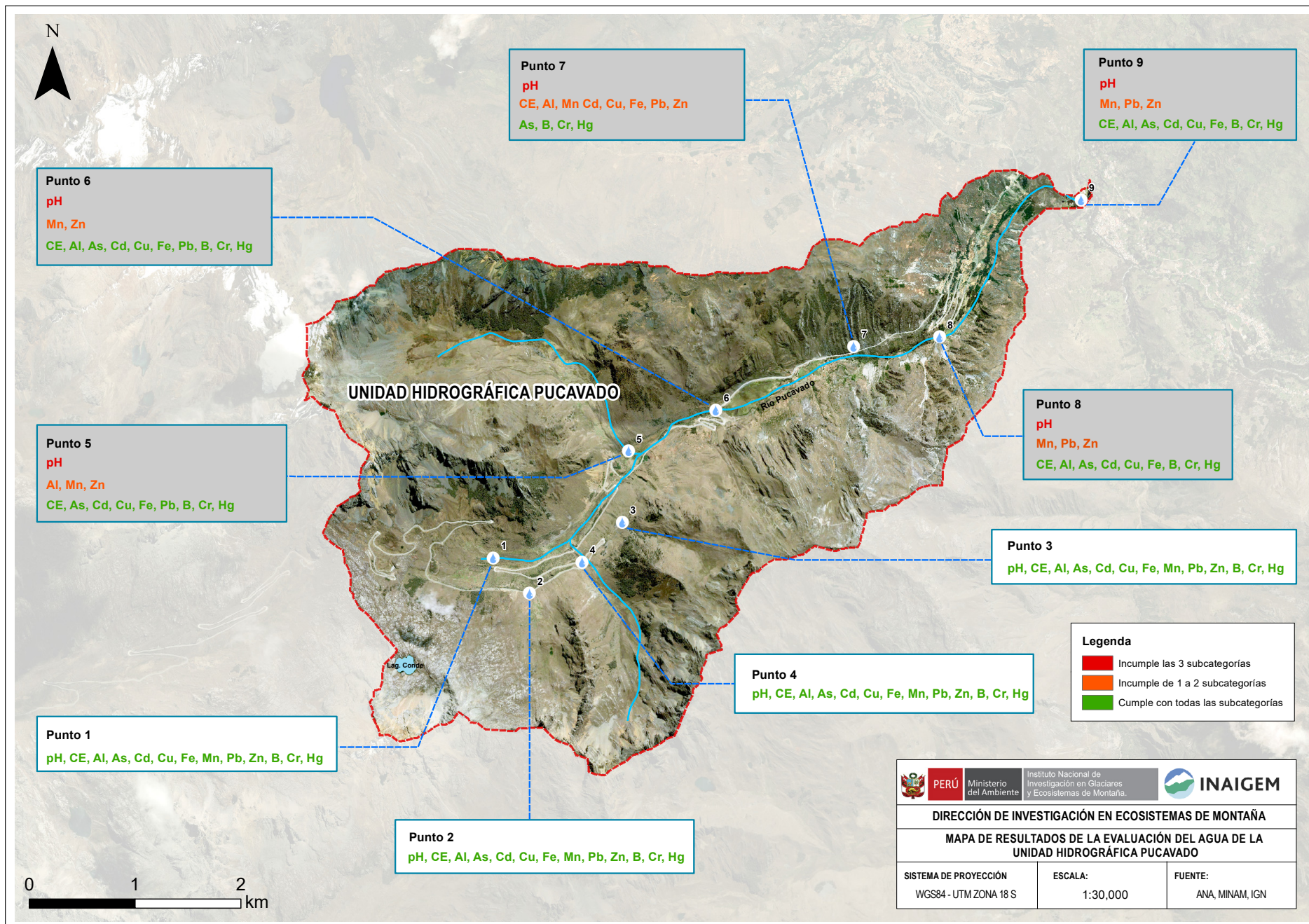
Para la interpretación, se aplicó un código de colores que refleja el nivel de cumplimiento respecto al ECA-agua: rojo (incumplimiento en las tres subcategorías evaluadas), anaranjado (incumplimiento en una o dos subcategorías) y verde (cumplimiento en las tres subcategorías).

Los resultados evidencian que el pH incumple de manera recurrente los valores normativos establecidos tanto para la categoría 4, subcategoría E2 (conservación del ambiente acuático), como para la categoría 3, subcategorías D1 (riego de vegetales) y D2 (bebida de animales). Este incumplimiento afecta principalmente a los puntos 5, 6, 7, 8 y 9, donde se registran condiciones de acidez persistente.

El análisis comparativo permite diferenciar dos fuentes principales de afectación. En los puntos 5, 6, 8 y 9, los incumplimientos están asociados al drenaje ácido de roca (DAR), vinculado al retroceso glaciar y la exposición natural de sulfuros en el sustrato rocoso, lo que favorece la movilización de metales como Mn, Al, Pb y Zn. En contraste, el punto 7 presenta un patrón distinto: además de mostrar los mismos parámetros excedidos, registra la mayor cantidad de incumplimientos y concentraciones más altas, situación atribuida al drenaje ácido de mina (DAM), producto de antiguas labores extractivas de carbón actualmente inactivas.

En conjunto, los resultados reflejan un escenario mixto de afectación, donde el DAR actúa como un proceso natural que impacta de manera continua los cuerpos de agua de la cuenca, mientras que el DAM intensifica localmente la contaminación en el punto 7, diferenciándolo del resto por su origen antrópico.

Figura 13. Mapa de resultados obtenidos de la evaluación de parámetros fisicoquímicos y concentración de metales



4. CONCLUSIONES

Los resultados del monitoreo evidencian un impacto ambiental significativo en la unidad hidrográfica evaluada, con variaciones espaciales que permiten diferenciar entre fuentes difusas y puntuales de contaminación.

En los puntos 5, 6, 8 y 9 se identificó un patrón de alteración característico del drenaje ácido de roca (DAR), manifestado en valores de pH por debajo de lo establecido y concentraciones elevadas de metales como aluminio, manganeso y zinc, los cuales exceden los límites del ECA para las categorías de riego y conservación de la vida acuática. Este deterioro refleja procesos naturales de lixiviación de metales desde formaciones geológicas expuestas, que acidifican los cuerpos de agua y movilizan contaminantes de manera difusa a lo largo del cauce.

Cabe resaltar que en el año 2020 se registraron las concentraciones más elevadas: hierro en el punto 6 (14,58 mg/L), manganeso en el punto 5 (2,29 mg/L) y aluminio también en el punto 5 (10,112 mg/L). En contraste, los puntos 1, 2, 3 y 4 mostraron una tendencia general de estabilidad, manteniéndose por debajo de los valores máximos establecidos en el ECA.

Por otro lado, el punto 7 presenta una condición claramente diferenciada, evidenciada por los valores más extremos de acidez (pH promedio de 2,64), conductividad eléctrica (1 657,75 μ S/cm) y concentraciones de metales, entre los que destacan aluminio (54,674 mg/L) y cobre (0,28273 mg/L). Estas características corresponden a un proceso de drenaje ácido de mina (DAM), atribuible a actividades mineras abandonadas en la zona, donde se observó visualmente la presencia de efluentes ácidos, con un efecto significativamente mayor que el resto de los puntos evaluados, que son de origen natural.

5. RECOMENDACIONES

- » Resulta prioritario profundizar en la problemática de la contaminación por metales pesados, principalmente hierro y manganeso, mediante un enfoque integral y multisectorial. Estos elementos impactan de manera significativa la salud pública y los ecosistemas acuáticos. Desde la investigación se sugiere considerar la aplicación de tecnologías de remediación (humedales artificiales, filtración con materiales alcalinos, entre otras) junto con soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de bofedales y vegetación ribereña. Estas opciones deben analizarse en concordancia con los planes de gestión de recursos hídricos y las estrategias regionales de adaptación climática, a fin de contribuir con evidencias técnicas para la toma de decisiones.
- » En relación con la sostenibilidad de este tipo de medidas, se recomienda explorar y difundir las oportunidades de financiamiento climático internacional y nacional, destacando la importancia de que los actores competentes (autoridades locales y regionales y entidades rectoras en materia ambiental) incorporen acciones de remediación dentro de sus instrumentos de gestión. Asimismo, es relevante promover el diseño de un sistema de monitoreo permanente, que permita evaluar la eficacia de las tecnologías aplicadas y provea información actualizada sobre la calidad del agua en las cuencas afectadas.
- » Es conveniente fortalecer las capacidades locales en temas asociados al drenaje ácido de roca (DAR), fomentando la participación activa de comunidades y autoridades locales en actividades de monitoreo comunitario, caracterización de fuentes de contaminación y validación de resultados. Ello contribuirá a generar conocimiento compartido, facilitar el aprendizaje adaptativo y apoyar la actualización periódica de planes de adaptación y gestión ambiental en los territorios.

LISTADO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
Cond.	Conductividad eléctrica
DAR	Drenaje ácido de roca
DAM	Drenaje ácido de mina
DIEM	Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña
ECA	Estándar de Calidad Ambiental
ICP-MS	Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente
Inaigem	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
Minam	Ministerio del Ambiente
Minem	Ministerio de Energía y Minas
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
pH	Potencial de hidrógeno
Turb.	Turbidez
UH	Unidad hidrográfica
UTM	Universal Transverse Mercator (Proyección Universal Transversa de Mercator)
WGS84	World Geodetic System 1984 (Sistema Geodésico Mundial de 1984)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- » De Matos, D. T., De Carvalho, F. S., & Dos Santos, F. M. (2023). Electrical conductivity and total organic carbon analysis of water in Brazilian industrial pharmaceutical formulations. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 13(1), 187–192. <https://doi.org/10.7324/JAPS.2023.130118>
- » DES. (2018). *Monitoring and Sampling Manual Environmental Protection (Water) Policy*. https://environment.des.qld.gov.au/___data/assets/pdf_file/0031/89914/monitoring-sampling-manual-2018.pdf
- » Emmer, A., & Vilímek, V. (2013). Review article: Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: An example from the Cordillera Blanca. In *Natural Hazards and Earth System Sciences* (Vol. 13, Issue 6, pp. 1551–1565). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1551-2013>
- » Fuentealba, B., & Mejía, M. (2017). Caracterización ecológica y social de humedales altoandinos del Parque Nacional Huascarán. *Aporte Santiaguino*, 9(2), pág. 303-316. <https://doi.org/10.32911/as.2016.v9.n2.203>
- » Georges, C. (2004). 20th-Century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Perú. In *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* (Vol. 36, Issue 1, pp. 100–107). Institute of Arctic and Alpine Research. <http://www.jstor.org/stable/1552433>
- » IDEP. (2022). *Datos Geoespaciales Fundamentales, Instituto Geográfico Nacional*. <https://www.idep.gob.pe/geovisor/VisorDeMapas-3D/>
- » IDM. (2023). *Ecosistemas y análisis de riesgos en la Reserva de Biosfera Huascarán*. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/16427>
- » INAIGEM. (2023). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar 2023* (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña). <https://doi.org/10.36580/inaigem.document17>
- » INEI. (2017). *Sistema de Consulta de Centros Poblados*. <http://sige.inei.gob.pe/test/atlas/>
- » Ingemmet. (1998). *Estudio de evaluación ambiental territorial y de planteamientos para la reducción o eliminación de la contaminación de origen minero de la cuenca del río Mosna*. Biblioteca-Ingemmet Koha. <https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=10927>
- » IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, Y. Park, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- » Macharé, J., Fenton, C. H., Machette, M. N., Lavenu, A., Costa, C., & Dar, R. L. (2003). *Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Perú and its Offshore Region*.
- » Minam. (2017, Junio 7). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>.

- » Mismán, N. A., Sharif, M. F., Chowdhury, A. J. K., & Azizan, N. H. (2023). Water pollution and the assessment of water quality parameters: a review. *Desalination and Water Treatment*, 294, 79–88. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29433>
- » Montano Chavez, Y. N., Tapia, P. M., Quispe, C., & Fuentealba, B. (2022). *El Drenaje Ácido de Roca y sus Potenciales Impactos Ambientales (Folleto)* (Diciembre). Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña – Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (DIEM-INAIGEM). <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/441>
- » ONU. (2006). *Strategies for monitoring and assessment of transboundary rivers, lakes and groundwaters* (First Edition). United Nations.
- » Pozada-Rengifo, R., Bravo-Toledo, L., & Iparraguirre, J. (2023). Glacier retreat and the value of ecosystem services associated with water resources in the Paron basin-Huascarán National Park (Cordillera Blanca), 2009-2018. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 14(6), 76–121. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-06-03>
- » Pozo-Antonio, S., Puente-Luna, I., Lagüela-López, S., & Veiga-Ríos, M. (2014). Techniques to correct and prevent acid mine drainage: A review. *DYNA*, 81(184), 73–80.
- » Rahmanian, N., Ali, S. H. B., Homayoonfard, M., Ali, N. J., Rehan, M., Sadeq, Y., & Nizami, A. S. (2015). Analysis of physiochemical parameters to evaluate the drinking water quality in the state of perak, Malaysia. *Journal of Chemistry*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/716125>
- » Santofimia, E., López-Pamo, E., Palomino, E. J., González-Toril, E., & Aguilera, Á. (2017). Acid rock drainage in Nevado Pastoruri glacier area (Huascarán National Park, Perú): hydrochemical and mineralogical characterization and associated environmental implications. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32), 25243–25259. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0093-0>
- » UICN SUR. (2008). *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas*.
- » UNEP. (2016). *A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a global assessment*. www.unep.org
- » Yaakub, N., Raoff, M. N. A., Haris, M. N., Halim, A. A. A., & Kamarudin, M. K. A. (2018). Water quality index assesment around industrial area in Kuantan, Pahang. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(2S), 731. <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i2s.45>
- » Zimmer, A., K. Brito Rodríguez, M., J. Alegre Oropeza, C., W. Sánchez León, J., & Recharte 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*, 4. <https://doi.org/10.36580/rgem.i4.57-76>

ANEXOS

ANEXO 1. Categoría del estándar de calidad ambiental (ECA) para agua-Decreto Supremo N.º 004-2017-Minam

Tabla 5. Estándar de calidad para el agua de la categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales (parámetros usados en el reporte)

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido ⁱ	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS-QUÍMICOS				
Conductividad	(μ S/cm)		2 500	5 000
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH		6,5-8,5	6,5-8,5
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/L		5	5
Arsénico	mg/L		0,1	0,2
Boro	mg/L		1	5
Cadmio	mg/L		0,01	0,05
Cobre	mg/L		0,2	0,5
Cromo	mg/L		0,1	1
Hierro	mg/L		5	**
Manganeso	mg/L		0,2	0,2
Mercurio	mg/L		0,001	0,01
Plomo	mg/L		0,05	0,05
Zinc	mg/L		2	24

ⁱ Para el riego de parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales, solo aplican los parámetros microbiológicos y parasitológicos del tipo de riego no restringido. ** El parámetro no aplica para esta subcategoría.

Fuente: Decreto Supremo N.º 004-2017-Minam, Estándar de calidad ambiental (ECA) para agua.

Tabla 6. Estándar de calidad para el agua de la categoría 4: conservación del ambiente acuático, E2: ríos (parámetros usados en el reporte)

Parámetros	Unidad de medida	E2: ríos
		Costa y sierra
FÍSICOS-QUÍMICOS		
Conductividad	(μ S/cm)	1 000
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 a 9,0
INORGÁNICOS		
Arsénico	mg/L	0,15
Cobre	mg/L	0,1
Mercurio	mg/L	0,0001
Plomo	mg/L	0,0025
Zinc	mg/L	0,12

Fuente: D.S.N.° 004-2017-Minam, Estándar de calidad ambiental (ECA) para Agua.

ANEXO 2. Ubicación de los puntos de evaluación de la UH Pucavado

Tabla 7. Ubicación y descripción de los puntos de evaluación

Código del punto de muestreo	Coordenadas UTM		Altitud	Descripción
	Este	Norte	m s.n.m.	
1	254 326	8 928 097	3 998	Río principal (naciente del río Pucavado).
2	254 672	8 927 829	4 072	Aportante al río Pucavado en la margen derecha.
3	255 551	8 928 498	4 044	Quebrada aportante al río Pucavado en la margen derecha.
4	255 169	8 928 126	4 025	Quebrada aportante al río Pucavado en la margen derecha.
5	255 575	8 929 138	3 860	Catarata Celosa, aportante en la margen izquierda del río Pucavado.
6	256 434	8 929 560	3 792	Río Pucavado (principal).
7	257 740	8 930 136	3 738	Aportante al río principal (margen izquierda), las aguas salen de un socavón antiguo.
8	258 559	8 930 310	3 596	Río Pucavado (principal).
9	259 890	8 931 553	3 274	Río Pucavado, antes de la carga al río Puchka.

ANEXO 3. Imágenes de los puntos de evaluación que incumplen el ECA

Figura 14. Imágenes de la zona de muestreo del punto 5



Figura 15. Imágenes de la zona de muestreo del punto 6



Figura 16. Imágenes de la zona de muestreo del punto 7



Figura 17. Imágenes de la zona de muestreo del punto 8



Figura 18. Imágenes de la zona de muestreo del punto 9





INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA