DOI: 10.24850/j-tyca-2026-06-10

Artículos

Evaluación hidroambiental integrada de una microcuenca andina mediante CWQI, ACP y SIG

Integrated hydroenvironmental assessment of an Andean microbasin using CWQI, PCA, and GIS

Edgar Uquillas-Romo[1], ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3262-6311

Andrés Beltrán-Dávalos[2], ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6005-8915

Luis Patiño-Pomavilla[3], ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0774-7029

[1]Escuela Superior Politécnica de Chimborazo-Grupo de investigación para la sostenibilidad de cuencas hidrográficas, Riobamba, Ecuador, edgar.uquillas@espoch.edu.ec

[2]Escuela Superior Politécnica de Chimborazo-Grupo de investigación para la sostenibilidad de cuencas hidrográficas, Riobamba, Ecuador, andres.beltran@espoch.edu.ec

[3]Escuela Superior Politécnica de Chimborazo-Grupo de investigación para la sostenibilidad de cuencas hidrográficas, Riobamba, Ecuador, luis.patinio@espoch.edu.ec

Autor para correspondencia: Edgar Uquillas, edgar.uquillas@espoch.edu.ec

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Resumen

Las cuencas andinas enfrentan crecientes presiones hidroambientales urbanas, agrícolas e industriales. La microcuenca del río Pachanlica (MCP) en Ecuador es un caso representativo regional, en la que se evaluó la calidad del agua superficial mediante el índice canadiense de calidad del agua (CWQI) para uso agrícola en 10 puntos de monitoreo (PM) durante los periodos hidrológicos de estiaje y lluvia. Se analizaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, incluidos pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), cloruros (Cl^-), NO_3^-, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), coliformes fecales (CF) y metales traza (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn), mediante análisis de componentes principales (ACP) y evaluación multicriterio en sistemas de información geográfica (SIG). En estiaje se registraron concentraciones elevadas de CF, CE y SDT por la baja capacidad de dilución del sistema fluvial. En época lluviosa, aunque los parámetros convencionales mejoraron, el Fe y Mn superaron los criterios de calidad (CCA) en la mayoría de los puntos, mientras que el Cr y Cd destacaron en la zona baja. La integración de metales en el CWQI redujo el índice a categorías marginales (61) y pobres (44), evidenciando el efecto de metales persistentes. El ACP identificó dos gradientes de variabilidad: un eje microbiológico-fisicoquímico asociado con descargas domésticas, y otro metálico relacionado con procesos geogénicos y presiones industriales (curtiembres y textiles). Los patrones espaciales confirman que la zona baja concentra la mayor vulnerabilidad. Estos resultados fundamentan la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) en cuencas andinas bajo presiones múltiples.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Palabras clave: calidad del agua, contaminación del agua, gestión de los recursos hídricos, sistema de información geográfica, SIG, análisis multivariado, cuenca, Ecuador.

Abstract

Andean watersheds face increasing urban, agricultural, and industrial hydroenvironmental pressures. The Pachanlica River microwatershed (PRM) in Ecuador is a representative regional case study, in which surface water quality was assessed using the Canadian Water Quality Index (CWQI) for agricultural use at ten monitoring points (MP) during the low-flow and rainy seasons. Physicochemical and microbiological parameters were analyzed, including pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), chlorides (Cl^-), NO_3^-, biochemical oxygen demand (BOD_5), fecal coliforms (FC), and trace metals (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, and Zn) were analyzed using principal component analysis (PCA) and multi-criteria evaluation in geographic information systems (GIS). During low water flow, high concentrations of FC, EC, and TDS were recorded due to the low dilution capacity of the river system. During the rainy season, although conventional parameters improved, Fe and Mn exceeded quality criteria (QCC) at most points, while Cr and Cd stood out in the lower zone. The integration of metals into the CWQI reduced the index to marginal (61) and poor (44) categories, highlighting the effect of persistent metals. PCA identified two gradients of variability: A microbiological-physicochemical axis associated with domestic discharges and a metallic axis related to geogenic processes and industrial pressures (tanneries and textiles). Spatial patterns confirm that the lower zone is the most vulnerable. These results support integrated water resource management (IWRM) in Andean basins under multiple pressures.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Keywords: water quality, water pollution, water resources management, geographical information systems, GIS, multivariate analysis, basins, Ecuador.

Recibido: 16/12/2025

Aceptado: 19/03/2026

Publicado *ahead of print*: 13/04/2026

Versión final: 01/11/2026

Introducción

El agua es un recurso esencial para el bienestar humano y el funcionamiento de los ecosistemas, con su origen asociado con ríos, lagos, glaciares, acuíferos y precipitación (Tyagi *et al*., 2020). Además de su importancia para el consumo, sustenta actividades productivas, como agricultura, ganadería e industria. En países en desarrollo, su calidad se ve comprometida por descargas urbanas, industriales y agrícolas que superan la capacidad de autodepuración de los ríos, especialmente en tramos medios y bajos, lo cual genera riesgos sanitarios (Farzadkia *et al*., 2015; Guzmán-Colis *et al*., 2011).

Tradicionalmente, los monitoreos de calidad del agua se comunicaron mediante reportes técnicos dirigidos sobre todo a especialistas, lo que dificultó su apropiación social debido a la complejidad técnica y la fragmentación de los datos (Swain, 2024). En respuesta a esta necesidad de simplificación, surgieron índices integrados que transforman información fisicoquímica y microbiológica en métricas sintéticas capaces de comunicar el estado ecológico del agua de manera clara y comparable (Devetac *et al*., 2025).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Cada cuerpo hídrico requiere niveles de protección diferenciados según su carga contaminante y características ecológicas. La identificación de fuentes puntuales y difusas constituye un paso crítico para el cálculo de índices integrados (Swain, 2024). *El Water Quality Index* (WQI) original fue pionero en sintetizar múltiples parámetros en un valor adimensional, pero su rigidez metodológica limitó su aplicación en ecosistemas heterogéneos (Lumb *et al*., 2011). A diferencia del índice clásico de Brown, la propuesta del Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) integra el alcance, frecuencia y amplitud de los incumplimientos normativos, otorgándole mayor sensibilidad (Panagopoulos *et al*., 2022).

Si bien diversos estudios en cuencas andinas han aplicado índices de calidad del agua y análisis multivariado con sistemas de información geográfica (SIG) de manera independiente, son escasas las investigaciones que integran de forma simultánea el índice de calidad del agua canadiense (CWQI, por sus siglas en inglés), el análisis de componentes principales (ACP) y el SIG con una salida operativa priorizando los tramos críticos para la gestión (Farzadkia *et al*., 2015).

En este contexto, la microcuenca del río Pachanlica (MCP), en la provincia de Tungurahua, Ecuador, constituye un sistema estratégico para el abastecimiento agrícola y la actividad económica. No obstante, la intensificación agrícola, el crecimiento urbano y la presencia industrial han provocado una degradación progresiva de la calidad del agua, comprometiendo su uso para consumo humano y riego, y poniendo en riesgo la seguridad hídrica local por la presencia de metales traza, como Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. Esta situación es representativa de muchos sistemas andinos, donde la presión humana supera la capacidad natural de resiliencia (Drenkhan & Castro-Salvador, 2023).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del agua en la MCP mediante el índice CWQI a partir de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos en dos épocas hidrológicas contrastantes. El CWQI se integró con ACP y modelación espacial en SIG para identificar parámetros dominantes, relacionar los sitios de monitoreo con sus fuentes potenciales de aporte y priorizar sectores críticos de la MCP. Dicho enfoque aporta evidencia para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) y contribuye al ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento.

Materiales y métodos

Área de estudio

La MCP ubicada en la región andina de la provincia de Tungurahua, Ecuador, nace en las estribaciones de los volcanes Carihuairazo, Chimborazo y nudo Igualata. El cauce principal inicia en las coordenadas 1° 14' 8" S y 78° 32' 57" W y desemboca en el río Ambato en 1° 27' 1" S y 78° 44' 52" W, recorriendo 43.29 km (Figura 1). Su red de drenaje integra los ríos Mocha y Quero antes de adoptar el nombre de Pachanlica.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

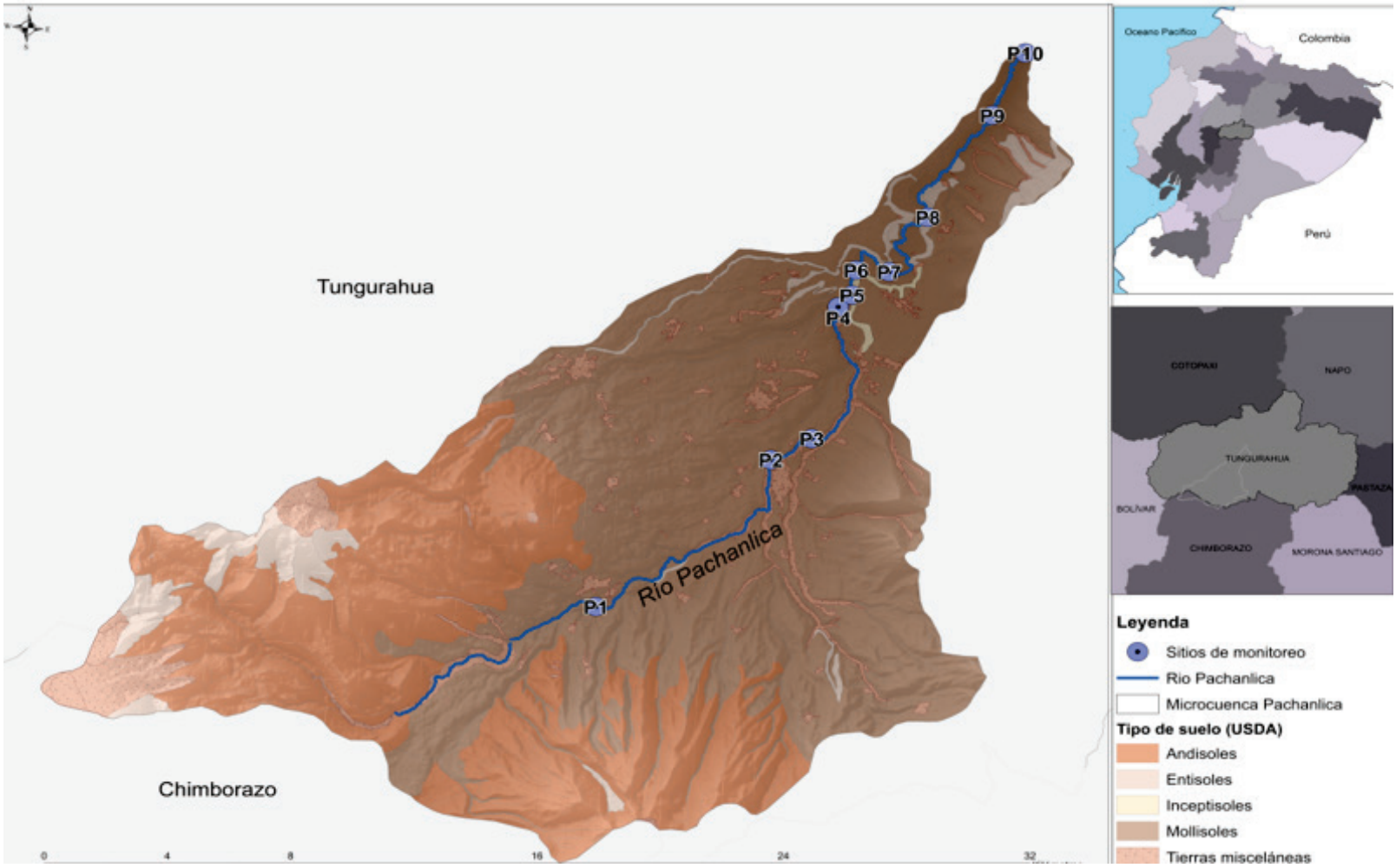


Figura 1. Área de estudio en la MCP.

Las características morfométricas de la MCP incluyen una superficie de 397.60 km^2, un perímetro de 110.41 km y un cauce principal de 39.20 km de longitud. El gradiente altitudinal oscila desde los 2 200 y 6 200 m.s.n.m, con cobertura vegetal de bosque montano alto y páramo arbustivo (Caranqui & Ortíz, 2021). Litoedáficamente destaca el predominio de materiales volcánicos (77 %), depósitos fluviales (6 %) y glaciares (6 %). Esta configuración geológica, respaldada por cartografía oficial (IGM, 2025), ha condicionado la formación de suelos tipo mollisoles

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

(53 %) y andisoles (34 %), caracterizados por una avanzada meteorización de minerales primarios (Gaviria *et al*., 2023).

El clima se define como templado-húmedo andino. Según los promedios multianuales de la estación M0258 (Querochacha-UTA), para el periodo 1994-2013 (INAMHI, 2025), la zona presenta una precipitación media anual de 604 mm, temperatura media de 12.8 °C y evaporación de 1 180.7 mm. El régimen pluviométrico es estacional, con un periodo lluvioso entre febrero y julio, y un periodo de estiaje entre agosto y enero (HGPT, 2019).

El río Pachanlica recibe descargas de aguas residuales domésticas provenientes de los cantones Mocha, Quero, Cevallos, Ambato, Tisaleo y Pelileo, cuyos centros poblados suman más de 71 266 habitantes (INEC, 2022). Asimismo, recibe vertidos industriales de los rubros de curtiembre, alimentos, plásticos y textiles (Silva & Salinas-Morales, 2022).

Recolección y análisis de las muestras

Los puntos de monitoreo (PM) se seleccionaron considerando cinco criterios principales: accesibilidad, fuentes de contaminación, rasgos geomorfológicos e hidrológicos, y factibilidad operativa. La identificación se realizó mediante visitas técnicas y análisis cartográfico en SIG. Se establecieron 10 PM distribuidos en la zona media (3) y zona baja (7) a lo largo del cauce principal (Tabla 1).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tabla 1. Coordenadas y zona de los PM en la MCP.

PM	Coordenadas	Altitud (msnm)	Ubicación	Zona
1	1° 22' 27" S 78° 36' 42" W	2 901	Cevallos-Quero	Media
2	1° 21' 59" S 78° 36' 01" W	2 809	Cevallos-Quero	Media
3	1° 20' 27" S 78° 35' 28" W	2 684	Cevallos-Benítez	Media
4	1° 19' 24" S 78° 35' 47" W	2 651	Totoras-Salasaca	Baja
5	1° 19' 08" S 78° 35' 34" W	2 623	Totoras-Salasaca	Baja
6	1° 18' 39" S 78° 35' 32" W	2 610	Picaihua-Salasaca	Baja
7	1° 18' 38" S 78° 34' 57" W	2 571	Picaihua-Salasaca	Baja
8	1° 17' 31" S 78° 34' 22" W	2 485	Picaihua-El Rosario	Baja
9	1° 15' 27" S 78° 33' 25" W	2 348	Picaihua-Chiquicha	Baja
10	1° 14' 11" S 78° 32' 57" W	2 265	Picaihua-Chiquicha	Baja

Nota: las coordenadas están expresadas en grados, minutos y segundos (GMS).

Las campañas de monitoreo se realizaron en noviembre de 2024 (estiaje) y abril de 2025 (época lluviosa), periodos representativos de la estacionalidad hidrológica de la MCP (INAMHI, 2025). El muestreo, preservación y transporte de agua superficial cumplió con la norma técnica nacional NTE INEN 5667-1 relativa a técnicas de muestreo y preservación de aguas superficiales (INEN, 2022). Las muestras puntuales fueron recolectadas en el cauce principal a una profundidad de 0.30 m, evitando zonas de remanso o interferencias laterales.

Los parámetros para el cálculo del CWQI incluyeron pH, coliformes fecales (CF), conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), cloruros (Cl^-), NO_3^- y demanda biológica de oxígeno (DBO_5), seleccionados según los criterios de calidad ambiental (CCA) para agua de riego de la normativa ecuatoriana. Se integraron metales traza (Cd,

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Cr, Cu, Fe, Pb, Mn y Zn) acordes con los CCA y la presión antrópica identificada. El muestreo de metales se priorizó en época lluviosa para maximizar la detección de contaminantes movilizados por escorrentía superficial y lixiviación de efluentes industriales. Las mediciones *in situ* de pH, SDT y CE se efectuaron con un multiparámetro HANNA HI98199, mientras que el caudal (Q) se determinó mediante el método área-velocidad con una sonda Global Water FP11.

Los análisis de laboratorio se realizaron conforme al *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA *et al*., 2017). Los NO_3^- se determinaron por espectrofotometría visible mediante reducción de cadmio en un equipo HACH DR3900. Los Cl^- se cuantificaron por el método colorimétrico con tiocianato de mercurio. La DBO_5 se midió por técnica respirométrica con un sistema HACH DBO Trak II, mientras que los CF se determinaron con la técnica de número más probable (NMP).

Para el análisis de metales traza, las muestras se acidificaron con HNO_3 suprapuro hasta un pH < 2 y se sometieron a digestión ácida aplicando el método 3030-F (APHA *et al*., 2017). La matriz se concentró de 1 000 a 50 ml para incrementar la sensibilidad del análisis. La cuantificación se realizó por espectrometría de absorción atómica de llama (FAAS) en un equipo Thermo Scientific iCE 3500, empleando estándares certificados de Merck/Supelco.

Los límites de detección (LD) obtenidos en mg/l fueron Cd (0.005), Cu (0.02), Fe (0.05), Mn (0.01), Pb (0.05) y Zn (0.01). El control de aseguramiento de la calidad analítica incluyó blancos de reactivos y análisis por duplicado en cada lote de 10 muestras (10 %). La exactitud se validó mediante materiales de referencia certificados (MRC), con porcentajes de recuperaciones entre 92 y 108 %, cumpliendo los criterios de aceptabilidad para agua dulce.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Cálculo del índice de calidad del agua

El CWQI se calculó según la metodología del CCME (2017), utilizando los CCA del agua para uso agrícola del texto unificado de legislación secundaria del medio ambiente (TULSMA) del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) (MAE, 2018). El índice integra tres factores adimensionales: alcance (F1), frecuencia (F2) y amplitud (F3).

F1 representa el porcentaje de parámetros que incumplieron la normativa al menos una vez; F2, el porcentaje de pruebas fallidas, y F3 es la magnitud desviación respecto al CCA, estimada mediante el índice de severidad (nse). El valor final se obtuvo mediante la Ecuación (1):

$$CWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}\right) \quad (1)$$

El índice se determinó por PM y por época (estiaje y lluvia), clasificando los resultados acordes con las categorías del CCME (Tabla 2).

Tabla 2. Rangos de referencia para el estado del agua según CWQI.

Clases	Calidad del agua	Rango	Comentario
C5	Excelente	95-100	Niveles cercanos a condiciones naturales o prístinas
C4	Buena	80-94	Desviación infrecuente de los niveles deseables
C3	Regular	65-79	Desviación ocasional de los niveles deseables
C2	Marginal	45-64	Desviación frecuente de los niveles deseables
C1	Pobre	0-44	Incumplimiento persistente de los niveles deseables

Nota: en la tabla se indica los valores del CWQI; tomado y adaptado del CCME (2017).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Análisis espacial y modelación de vulnerabilidad mediante SIG

El análisis espacial se ejecutó empleando el *software ArcGis 10.4*, integrando resultados del CWQI en un marco territorial que permitiera identificar sectores críticos desde una perspectiva de GIRH. Se emplearon insumos cartográficos oficiales del IGM (2025): red hídrica, modelo digital de elevación (MDE) de 30 m de resolución, cobertura y uso de suelo, núcleos poblados e industrias georreferenciadas. Todas las capas se estandarizaron al mismo sistema de referencia espacial y se verificó su consistencia geométrica.

A partir de estos insumos, se definieron factores de presión antrópica y condicionantes físicos (Tabla 3): proximidad a industrias, proximidad a núcleos poblados, uso de suelo agrícola y pendiente del terreno. Los factores se reclasificaron en una escala ordinal (1: baja a 5: muy alta). Para el uso del suelo se aplicó una valoración discreta: valor 5 para áreas agrícolas y valor 1 para superficies no agrícolas.

Tabla 3. Ponderación y criterios de reclasificación de los factores de vulnerabilidad espacial.

Factor	Peso (%)	Criterio de reclasificación	Escala
Proximidad a industrias contaminantes	30	Distancia euclidiana a polígonos industriales	1-5
Proximidad a poblados grandes	25	Distancia a centros poblados grandes	1-5
Proximidad a industrias medias	15	Distancia a industrias aisladas	1-5
Proximidad a poblados pequeños	10	Distancia a asentamientos rurales	1-5
Uso del suelo agrícola	10	Agrícola = 5; no agrícola = 1	Discreta
Pendiente topográfica	10	Reclasificación por rangos de pendiente	1-5

Nota: la tabla presenta la normalización de factores de presión en una escala de 1-5.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La ponderación de factores se determinó mediante juicio de expertos y revisión bibliográfica, priorizando las presiones antrópicas sobre los condicionantes físicos, con una suma total normalizada al 100 %. El índice de vulnerabilidad espacial (IVE) se calculó mediante combinación lineal ponderada (CLP), generando un modelo continuo reclasificado en cuatro niveles: bajo, medio, alto y muy alto. La robustez del modelo se validó mediante un análisis de sensibilidad con variaciones de ±10 % en los pesos, demostrando estabilidad espacial en las clases de vulnerabilidad alta y muy alta.

Procesamiento de datos

El análisis estadístico descriptivo incluyó el cálculo de valores máximos (máx), mínimos (mín), desviación estándar (DE) y coeficiente de variación (CV) para cada parámetro en los 10 PM, diferenciando las épocas de estiaje y lluvia mediante el *software XLSTAT* (Addinsoft, 2025). Para evaluar diferencias significativas entre épocas, se verificó la normalidad de las diferencias con la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965). Cuando las diferencias cumplieron el supuesto de normalidad se aplicó *t* de *Student* para muestras pareadas; caso contrario, se utilizó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon (Nahm, 2016).

Posteriormente, se ejecutó un ACP independiente para cada época hidrológica a partir de matrices de correlación estandarizadas. Se retuvieron los componentes con eigenvalores > 1 (Kaiser, 1960). La interpretación factorial se centró en variables con cargas absolutas ≥ 0.60, priorizando la varianza explicada por los dos primeros ejes (Jolliffe & Cadima, 2016).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

Resultados

Índice de calidad del agua

Durante la época de estiaje, los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos mostraron variabilidad espacial entre los 10 PM. Mientras el pH se mantuvo dentro de los rangos permitidos, los CF, la CE y los SDT superaron los CCA en 2 de 10 puntos, ambos localizados en la zona baja (PM5 y PM6). Asimismo, la DBO_5 registró incrementos en sitios de menor caudal, lo cual indica mayores cargas orgánicas en este periodo. En contraste, las concentraciones de Cl^- y NO_3^- se mantuvieron por debajo de los límites establecidos para uso agrícola (Tabla 4). El análisis de metales pesados no se incluyó en este periodo, conforme a los criterios expuestos en la metodología.

Tabla 4. Parámetros monitoreados en época de estiaje en la MCP.

Variable	Unidad	PM										CCA
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
pH	u.pH	8.0	7.9	8.3	7.2	7.9	8.0	7.9	8.1	8.3	8.0	6.0-9.0
CF	NMP/100 ml	240	210	93	93	2 400*	1 100*	20	21	15	7	≤ 1 000
CE	dS/m	0.2	0.7	0.4	0.5	1.3*	1.0*	0.7	0.6	0.7	0.6	≤ 0.7
SDT	mg/l	99	335	183	255	659*	512*	333	321	339	316	≤ 450
Cl^-	meq/l	0.6	1.8	1.1	0.7	3.2	2.7	1.1	1.0	1.0	1.0	≤ 4.0
NO_3^-	mg/l	0.7	0.5	2.1	1.4	1.2	1.0	1.0	1.8	2.6	2.9	≤ 5.0
DBO_5	mg/l	4	11	16	7	8	7	7	6	9	10	-
Q	m^3/s	0.7	0.1	0.3	0.8	0.1	0.6	0.7	0.4	1.4	1.5	-

Nota: *valores que exceden los CCA; - no presenta valores de CCA.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En la época de lluvia, los parámetros fisicoquímicos presentaron menor variabilidad espacial. El pH permaneció estable y los NO_3^- no registraron excedencias. La DBO_5 mostró valores menores respecto al estiaje, coincidiendo con los mayores caudales registrados.

Respecto a los metales pesados (Tabla 5), el Fe y el Mn superaron los CCA en 10 de 10 puntos, mientras que el Cr presentó excedencias en 8 de 10 PM. El Cd solo sobrepasó el límite en PM8. En contraste, Cu y Zn se mantuvieron dentro de los CCA en todos los sitios, mientras que Pb permaneció por debajo del LD del equipo en 9 de 10 PM.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tabla 5. Parámetros monitoreados en época de lluvia en la MCP.

Variable	Unidad	Punto de Monitoreo										CCA
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
pH	u.pH	8.2	8.0	7.9	8.0	8.1	8.0	8.2	8.3	8.6	8.5	6.0-9.0
CF	NMP/100 ml	11	548	137	165	188	191	322	113	105	122	≤ 1 000
CE	dS/m	0.2	0.1	0.2	0.5	0.6	0.6	0.01	0.6	0.6	0.6	≤ 0.7
SDT	mg/l	90	74	77	252	307	314	304	294	288	295	≤ 450
Cl^-	meq/l	0.3	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	1.3	≤ 4.0
NO_3^-	mg/l	0.6	0.7	0.7	1.3	1.1	1.4	1.3	1.8	2.4	2.3	≤ 5.0
Cd	mg/l	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.06*	0.01	0.02	≤ 0.05
Cr	mg/l	0.1	0.2*	0.1	0.2*	0.2*	0.3*	0.3*	0.3*	0.2*	0.5*	≤ 0.1
Cu	mg/l	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	≤ 0.2
Fe	mg/l	29.4*	40.8*	33.8*	26.9*	36.9*	35.4*	31.7*	28.1*	40.3*	73.9*	≤ 5.0
Pb	mg/l	<LD	<LD	<LD	<LD	0.2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	≤ 5.0
Mn	mg/l	0.9*	1.0*	0.5*	0.5*	0.7*	0.8*	0.7*	0.5*	0.7*	1.4*	≤ 0.2
Zn	mg/l	0.2	0.7	0.4	0.3	0.2	0.6	0.4	0.3	0.3	0.9	≤ 2.0
DBO_5	mg/l	2	1	2	7	10	9	7	5	7	6	-
Q	m^3/s	2.8	3.1	2.5	1.3	1.6	1.3	1.8	1.3	2.1	5.9	-

Nota:

<LD indica valores bajo el límite de detección del método. El valor del LD para Pb fue de 0.05 mg/l

*valores que exceden los CCA

- = no presenta valores de CCA.

El análisis comparativo evidenció diferencias significativas entre épocas para CE (p = 0.036) y SDT (p = 0.002) mediante la prueba de Wilcoxon para muestras pareadas (p < 0.05). En contraste, el pH, CF, Cl^-, NO_3^- y DBO_5 no mostraron variaciones estacionales significativas (p >

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

0.05). La CE y los SDT registraron valores máximos durante el estiaje y una reducción en la época lluviosa, lo que coincide con el registro de mayores valores de Q en este último periodo (Tabla 4 y Tabla 5).

La variación espacial del CWQI se presenta en la Figura 2. Los valores del índice reflejaron la influencia de la carga metálica en la clasificación global. En estiaje, 8 de 10 puntos se clasificaron como excelentes, mientras que PM6 presentó calidad marginal y PM5 calidad pobre. El valor global del periodo fue marginal (CWQI = 61). En la época de lluvia, el CWQI calculado con parámetros convencionales fue de 100 en los 10 PM. Sin embargo, al incorporar los metales pesados, la clasificación se modificó a 2 puntos con calidad justa, 7 marginal y 1 pobre, con un mínimo de 44 en PM10 y un valor global marginal de 55 para el periodo ampliado (Figura 3 y Figura 4).

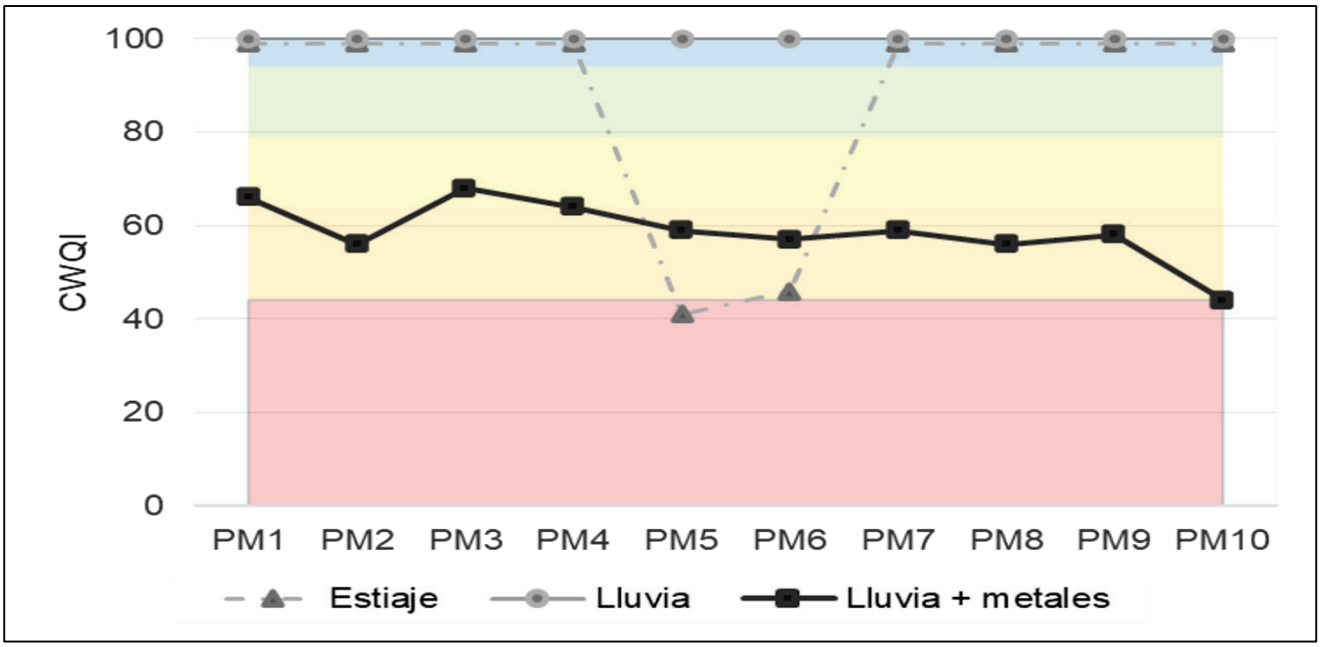


Figura 2. Variación estacional del CWQI en la MCP.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

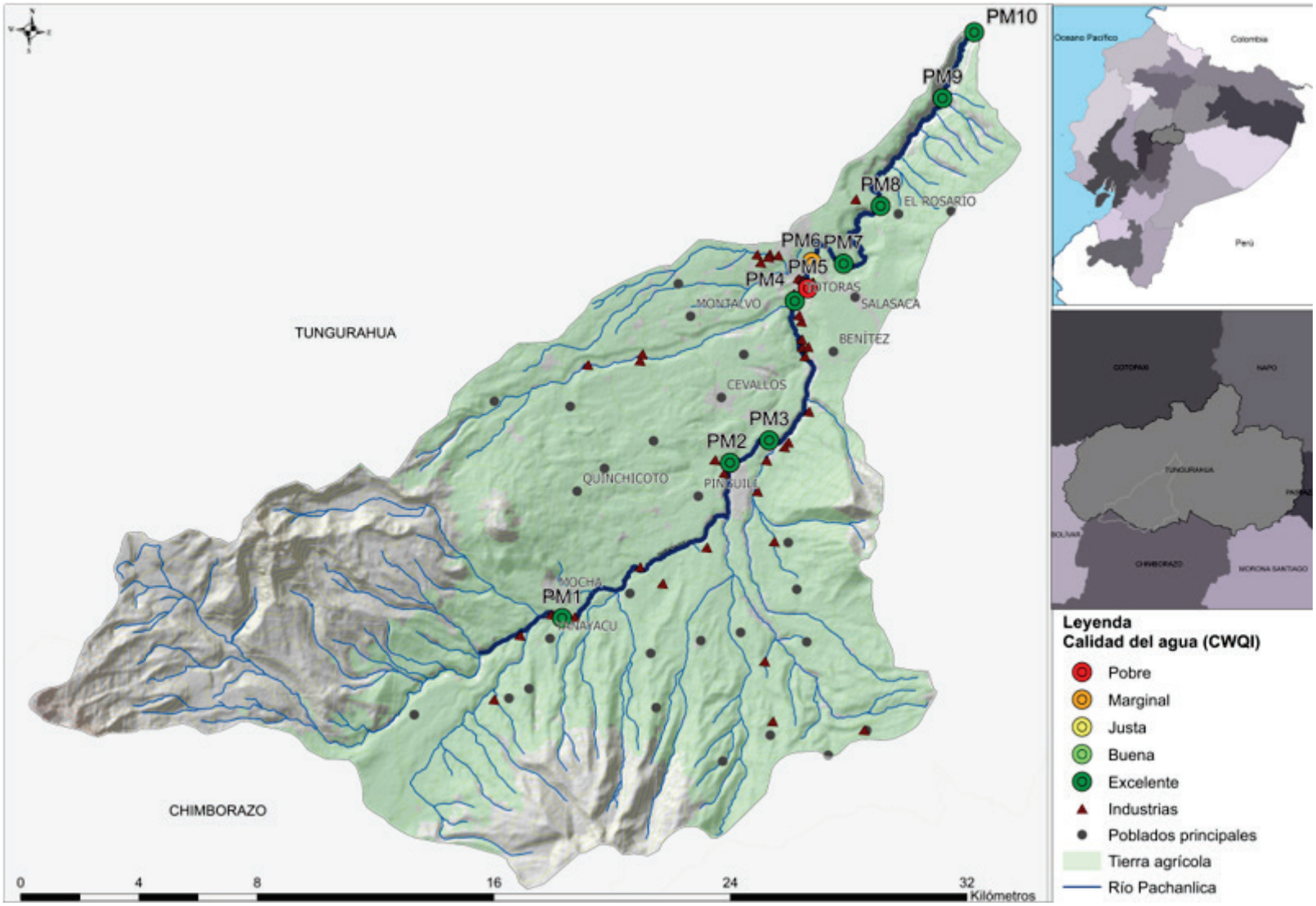


Figura 3. Distribución espacial del CWQI en la MCP durante estiaje.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

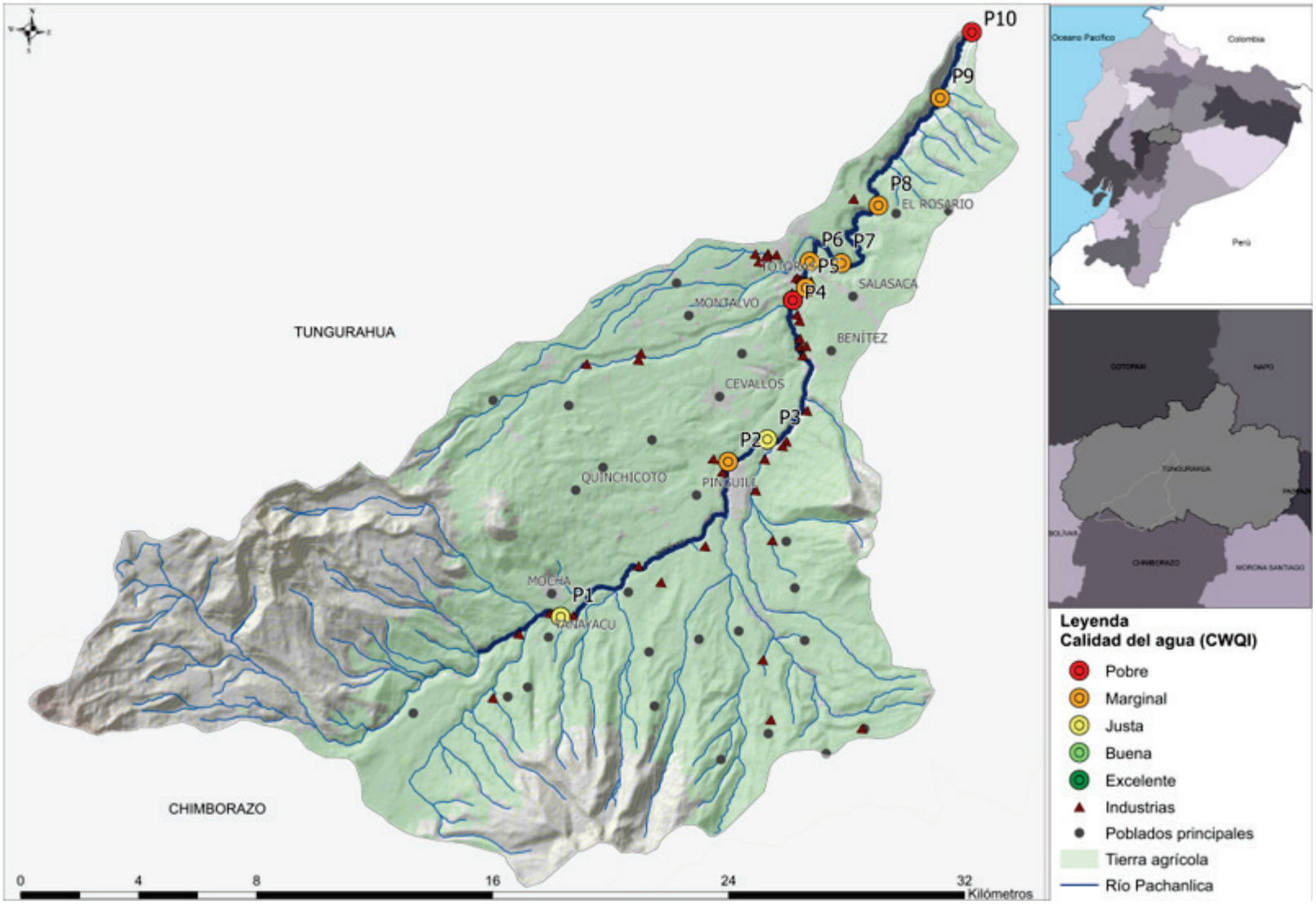


Figura 4. Distribución espacial del CWQI en la MCP durante época lluviosa + metales.

Análisis espacial y modelación de vulnerabilidad mediante SIG

El modelo de vulnerabilidad hidroambiental mostró una zonificación asociada con el gradiente altitudinal de la MCP (Figura 5). La categoría de vulnerabilidad muy alta se localizó exclusivamente en la zona baja (100

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

%), mientras que la vulnerabilidad alta se distribuyó entre la zona baja (53 %) y media (47 %). Por su parte, la vulnerabilidad moderada se concentró de forma mayoritaria en la zona media (84 %) y la vulnerabilidad baja se situó de manera predominante en la zona alta de la MCP (87 %).

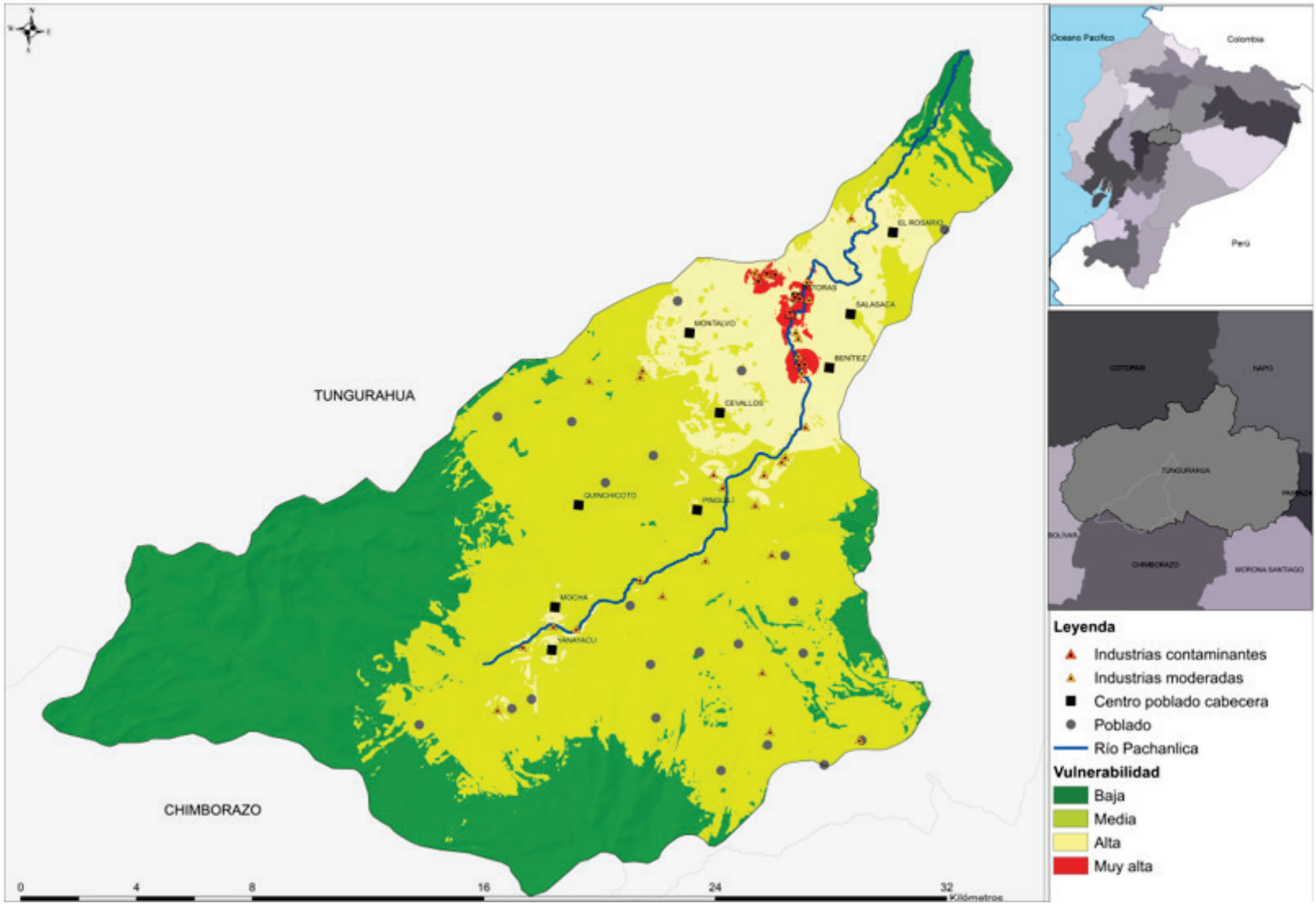


Figura 5. Vulnerabilidad hidroambiental modelado con SIG en la MCP.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La integración de la vulnerabilidad con el CWQI permitió identificar la presión dominante por sitio de monitoreo (Tabla 6). Los puntos PM4, PM5 y PM6 (zona baja), bajo presiones de origen industrial, coincidieron con niveles de vulnerabilidad alta a muy alta y registraron los valores mínimos de CWQI. En contraste, los puntos PM1, PM2 y PM3 (zona media) presentaron vulnerabilidad media, y una calidad entre excelente y justa, bajo presiones urbanas y agrícolas. Finalmente, en el cierre de la MCP (PM9 y PM10), se observó vulnerabilidad baja y presión dominante natural, aunque con una disminución del CWQI durante la época de lluvia, incorporando metales.

Tabla 6. Relación entre vulnerabilidad hidroambiental, calidad del agua (CWQI) y presión dominante en los PM de la MCP.

PM	Zona	Vulnerabilidad	CWQI estiaje	CWQI lluvia + metales	Presión dominante
PM1	Media	Media	Excelente	Justa	Urbana
PM2	Media	Media	Excelente	Marginal	Agrícola
PM3	Media	Media	Excelente	Justa	Agrícola
PM4	Baja	Muy alta	Excelente	Marginal	Industrial
PM5	Baja	Muy alta	Pobre	Pobre	Industrial
PM6	Baja	Alta	Marginal	Marginal	Industrial
PM7	Baja	Alta	Excelente	Marginal	Agrícola
PM8	Baja	Alta	Excelente	Marginal	Agrícola
PM9	Baja	Baja	Excelente	Marginal	Natural
PM10	Baja	Baja	Excelente	Pobre	Natural

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Procesamiento de datos

El análisis estadístico descriptivo permitió caracterizar la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos, químicos y microbiológicos en ambas épocas de estudio (Tabla 7). La mayor dispersión se registró durante el estiaje, particularmente en los CF y algunos parámetros iónicos, reflejando una mayor heterogeneidad en condiciones de bajo caudal. Durante la época de lluvia se observó una reducción en los valores medios y en la dispersión relativa, con excepción de metales como Cd (CV = 86.8 %) y el Zn (CV = 53.8 %), que mantuvieron una alta variabilidad.

Tabla 7. Síntesis estadística de parámetros de calidad del agua en la MCP.

Parámetros		**Estiaje**	**Lluvia**
pH	Máx	8.3	8.6
	Mín	7.2	7.9
	Media	8.0 ± 0.10	8.2 ± 0.08
	DE	0.31	0.23
	CV (%)	3.85	2.81
CF	Máx	2 400	548
	Mín	7	11
	Media	420 ± 243.29	190 ± 47.0
	DE	769.34	148.64
	CV (%)	183.22	78.23

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Parámetros		Estiaje	Lluvia
CE	Máx	1.3	0.6
	Mín	0.2	0.01
	Media	0.7 ± 0.10	0.4 ± 0.08
	DE	0.31	0.24
	CV (%)	45.62	61.18
SDT	Máx	659	314
	Mín	99	74
	Media	335 ± 49.67	230 ± 32.99
	DE	157.09	104.34
	CV (%)	46.86	45.46
Cl-	Máx	3.2	1.3
	Mín	0.6	0.3
	Media	1.4 ± 0.28	0.8 ± 0.10
	DE	0.87	0.32
	CV (%)	61.55	38.54
NO3-	Máx	2.9	2.4
	Mín	0.5	0.6
	Media	1.5 ± 0.26	1.4 ± 0.20
	DE	0.81	0.64
	CV (%)	53.07	47.04
DBO5	Máx	16.00	10.00
	Mín	4.00	1.00
	Media	8.50 ± 1.05	5.60 ± 0.97
	DE	3.31	3.06
	CV (%)	38.92	54.68

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Parámetros		Estiaje	Lluvia
Cd	Máx	-	0.060
	Mín	-	0.004
	Media	-	0.019 ± 0.005
	DE	-	0.017
	CV (%)	-	86.81
Cr	Máx	-	0.5
	Mín	-	0.1
	Media	-	0.2 ± 0.04
	DE	-	0.12
	CV (%)	-	48.91
Cu	Máx	-	0.10
	Mín	-	0.005
	Media	-	0.09 ± 0.010
	DE	-	0.030
	CV (%)	-	33.20
Fe	Máx	-	73.9
	Mín	-	26.9
	Media	-	37.7 ± 4.30
	DE	-	13.59
	CV (%)	-	36.02
Mn	Máx	-	1.4
	Mín	-	0.5
	Media	-	0.8 ± 0.09
	DE	-	0.28
	CV (%)	-	36.24

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Parámetros		Estiaje	Lluvia
Zn	Máx	-	0.9
	Mín	-	0.2
	Media	-	0.4 ± 0.07
	DE	-	0.23
	CV (%)	-	53.76
Q	Máx	1.50	5.90
	Mín	0.10	1.30
	Media	0.66 ± 0.15	2.37 ± 0.44
	DE	0.48	1.40
	CV (%)	73.26	59.04

Nota: los valores no presentados se indican con un guion (-).

En la época de estiaje, el ACP identificó dos componentes que explicaron el 73.71 % de la varianza total (CP1 = 53.89 % y CP2 = 19.82 %). El primer componente (CP1) estuvo dominado por CF, CE, SDT y Cl^-, con cargas positivas ≥ 0.92, mientras que el CWQI presentó una carga negativa de -0.94. El segundo componente (CP2) se asoció principalmente con NO_3^-, pH y DBO_5, con cargas positivas ≥ 0.60 (Figura 6).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

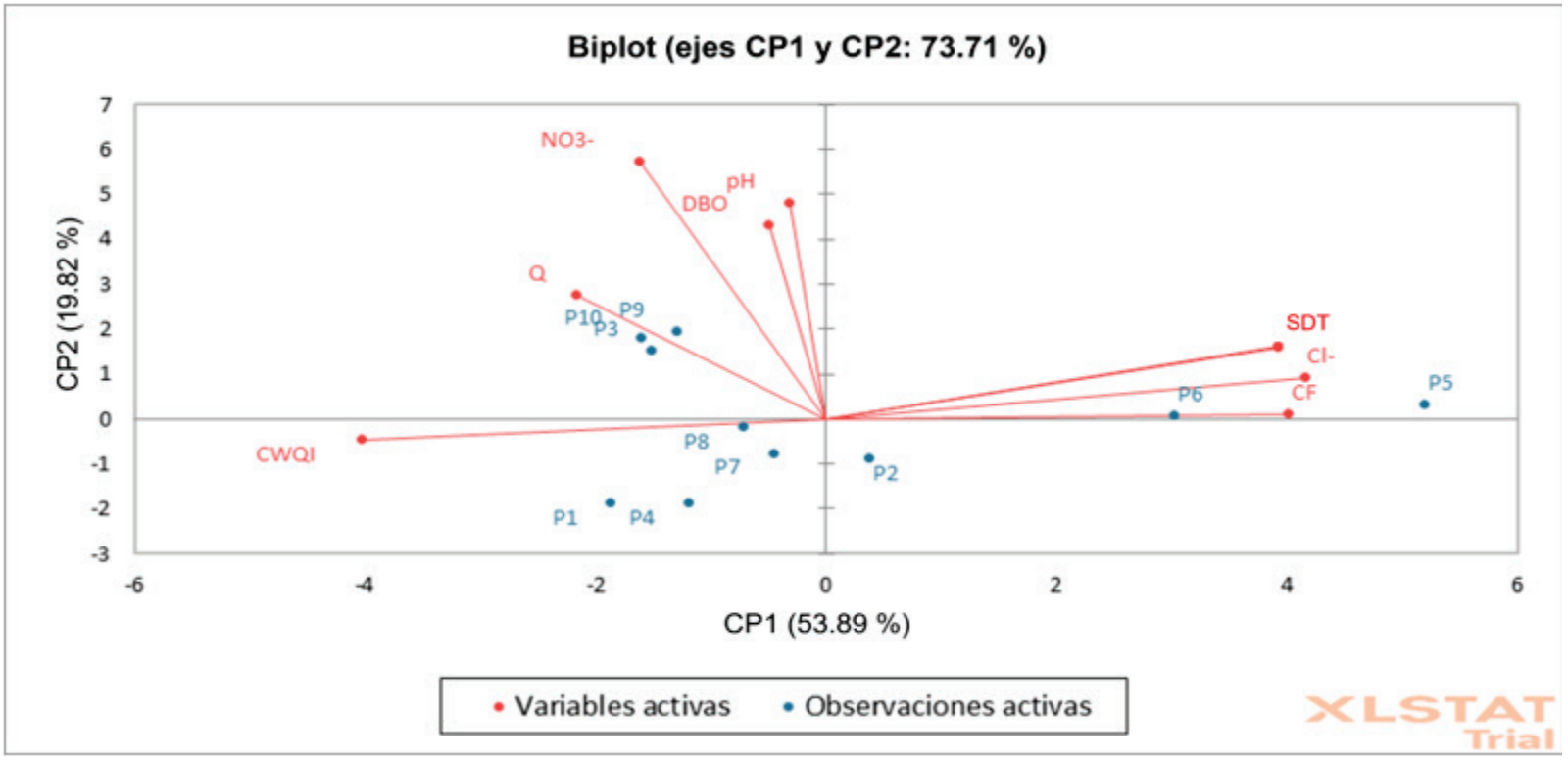


Figura 6. Biplot del ACP para la época de estiaje en la MCP.

Durante la época de lluvia, los dos primeros componentes concentraron el 73.56 % de la varianza total (CP1 44.30 % y CP2 29.26 %). El CP1 se caracterizó por cargas negativas elevadas en los metales Cr, Fe, Mn y Zn, en contraste con la carga positiva del CWQI (0.96), además de aportes moderados de NO_3^- y Q. El CP2 integró variables fisicoquímicas como DBO_5, CE y SDT, con cargas positivas (Figura 7).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

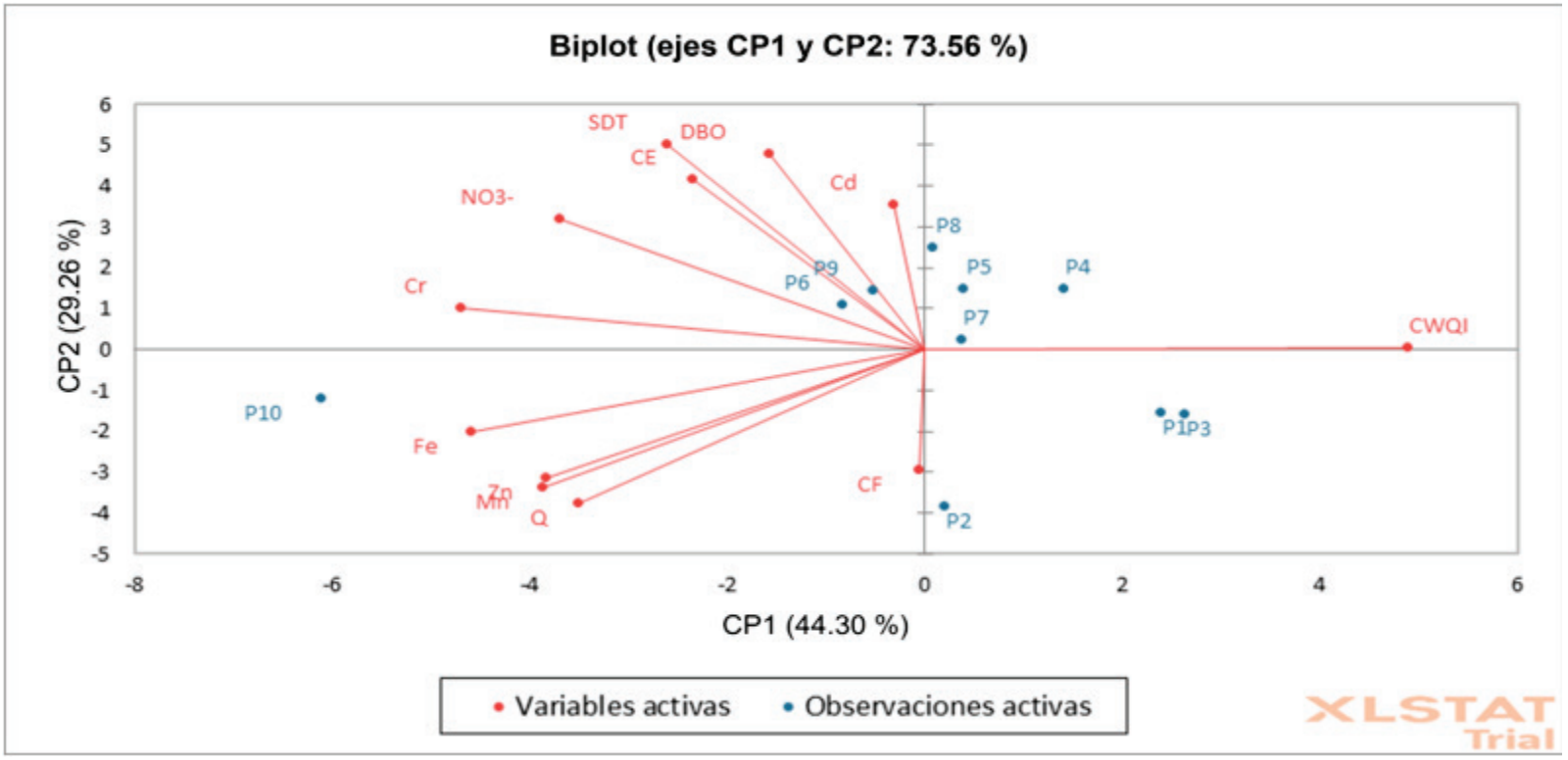


Figura 7. Biplot del ACP para la época de lluvia en la MCP.

Discusión

Índice de calidad del agua

La calidad del agua en la MCP evidenció dependencia de la estacionalidad hidrológica, sintetizada por el CWQI. Durante el periodo de estiaje, la degradación de la calidad del agua registrada se vinculó con la reducción de caudal y con la limitada capacidad de dilución de contaminantes, comportamiento consistente con lo reportado por la World Health Organization (WHO, 2025) para ríos urbanos de alta vulnerabilidad.

Durante este periodo, el deterioro observado en los puntos PM5 y PM6 se explicó por su localización en tramos donde convergen descargas

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

domésticas e industriales, alta densidad poblacional aguas arriba y uso intensivo del cauce para riego. Estas condiciones amplificaron las cargas orgánicas y salinas, incrementando las concentraciones de CF, CE y SDT, y superando la capacidad de autodepuración del sistema, patrón recurrente en cuencas andinas con presiones antrópicas similares (Uribe *et al*., 2023; Villamarín *et al*., 2014).

En contraste, durante la época de lluvia, se observó una mejora general de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, atribuible al efecto de dilución documentado en sistemas lóticos de alta montaña (Santamaría-Zárate *et al*., 2021). Este comportamiento estacional fue consistente con el análisis estadístico aplicado, donde las diferencias entre periodos resultaron significativas para parámetros asociados con la mineralización del agua, particularmente CE y SDT ($p < 0.05$), evidenciando el control del régimen hidrológico sobre la concentración de solutos en la MCP (Nahm, 2016).

Sin embargo, este comportamiento no implica una recuperación real del sistema fluvial, sino una mejora aparente asociada exclusivamente con los parámetros convencionales. Al incorporar los metales pesados, el índice CWQI reveló condiciones marginales persistentes debido a que el Cr, Fe y Mn superaron los CCA en la mayoría de los PM, incluso bajo condiciones de mayor caudal. La caída del índice refleja la lógica del CWQI, que penaliza simultáneamente el alcance, la frecuencia y la magnitud de los incumplimientos, por lo que pocos parámetros con excedencias sistemáticas dominan el índice (CCME, 2017; Swain, 2024).

La persistencia espacial de Fe y Mn, incluso en sectores de vulnerabilidad moderada, sugiere una contribución geogénica asociada con el predominio de materiales volcánicos y suelos andosólicos en la MCP (Custodio *et al*., 2020; Villamarín *et al*., 2014). La intensa meteorización

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

de estos materiales favorece la liberación y movilización de cationes metálicos hacia los sistemas fluviales, fenómeno ampliamente documentado en cuencas andinas dominadas por litologías volcánicas y procesos de erosión relacionados con pendientes pronunciadas (Drenkhan & Castro-Salvador, 2023; Gaviria *et al*., 2023). En contraste, la presencia de Cr en la zona baja es compatible con presiones antrópicas puntuales, particularmente descargas industriales ligadas con curtiembres, agroindustria e industria textil, reconocidas como fuentes potenciales de contaminación metálica y orgánica en sistemas fluviales de países en desarrollo (Cabello-Torres *et al*., 2022; Silva & Salinas-Morales, 2022).

Un hallazgo relevante fue la detección de Cd en el PM8, con concentraciones superiores al CCA para uso agrícola. Esta señal constituye un indicador de alerta temprana, que justifica priorizar el monitoreo y control por riesgo sanitario y agroproductivo, dada la toxicidad y capacidad de acumulación de este metal en suelos y cultivos irrigados (Custodio *et al*., 2020; WHO, 2025). Tal excedencia contribuye a explicar la baja clasificación del CWQI en dicho punto, diferenciándolo de otros sitios con deterioro dominado por parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. En contraste, el deterioro observado en los puntos PM2 y PM10 se asocia principalmente con presiones difusas de origen doméstico y agrícola, patrón característico de cuencas andinas con uso intensivo del suelo (Ruiz-Ordóñez *et al*., 2023; Uribe *et al*., 2023).

El ACP confirmó esta diferenciación espacial al identificar dos ejes dominantes de variabilidad ambiental. En estiaje, el primer componente, se asoció principalmente con SDT, Cl^- y CF, reflejando la influencia de descargas domésticas y urbanas sobre la mineralización del agua (Gil-Marín & González, 2020). El segundo componente se relacionó con variables como NO_3^-, DBO_5 y pH, indicando procesos relacionados con

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

aportes orgánicos y dinámica biogeoquímica del sistema (Osorto-Nuñez *et al*., 2023). Durante la época lluviosa, la estructura del ACP evidenció un eje metálico dominado por Fe, Mn, Zn y Cr, lo que sugiere una combinación de aportes geogénicos derivados de la meteorización volcánica (Gaviria *et al*., 2023; Villamarín *et al*., 2014) y presiones antrópicas industriales en la cuenca (Silva & Salinas-Morales, 2022). Esta separación entre presiones fisicoquímicas y metálicas concuerda con lo observado en otras cuencas andinas sometidas a múltiples fuentes de contaminación (Armijos-Arcos *et al*., 2025; Domínguez-Franco *et al*., 2021).

Análisis espacial y modelación de vulnerabilidad mediante SIG

La integración del CWQI con el análisis espacial SIG permitió trascender la interpretación puntual y estacional de la calidad del agua, e incorporar una dimensión territorial clave para la GIRH. Este enfoque concuerda con marcos metodológicos donde la representación espacial de índices sintéticos facilita identificar gradientes de presión y sectores prioritarios de intervención, más allá de la variabilidad temporal de los parámetros individuales (Farzadkia *et al*., 2015; Panagopoulos *et al*., 2022).

La coincidencia espacial entre valores de CWQI clasificados como pobres y marginales, y las categorías de vulnerabilidad alta y muy alta en la zona baja de la MCP, particularmente en los puntos PM5 y PM6, evidencia la existencia de un núcleo de degradación hidroambiental persistente (Villamarín *et al*., 2014). Este patrón ha sido descrito en cuencas andinas donde la superposición de actividad urbana e industrial genera focos críticos de contaminación que no logran ser atenuados por

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

la dilución hidrológica estacional (Ruiz-Ordóñez *et al*., 2023; Uribe *et al*., 2023). La coincidencia entre los valores bajos del índice y las categorías de vulnerabilidad confirma que el modelo SIG no constituye únicamente una herramienta cartográfica, sino un instrumento analítico para la jerarquización territorial del riesgo hidroambiental (Chidiac *et al*., 2023; Panagopoulos *et al*., 2022).

En contraste, la clasificación de los puntos PM9 y PM10 con presión dominante natural y baja vulnerabilidad, pese a registrar valores marginales y pobres de CWQI durante la época de lluvia al incorporar metales, refleja el comportamiento típico de tramos receptores en cuencas andinas. En estos sectores, la intensificación de Fe y Mn responde a aportes geogénicos, y a procesos de remoción y redistribución de sedimentos durante eventos de mayor caudal, aun en ausencia de presiones antrópicas locales directas, fenómeno ampliamente documentado en sistemas de alta energía hidrológica (Drenkhan & Castro-Salvador, 2023; Garate-Quispe *et al*., 2025).

Desde una perspectiva de la GIRH, la diferenciación espacial de presiones, desde aportes geogénicos dominantes en las secciones superiores hasta vertidos industriales persistentes en la zona baja, refuerza la necesidad de estrategias de monitoreo y control diferenciadas, evitando enfoques homogéneos que podrían resultar ineficientes (Armijos-Arcos *et al*., 2025; Custodio *et al*., 2020). En dicho sentido, el análisis espacial permitió traducir el CWQI en criterios territoriales concretos, alineados con el enfoque adaptativo de la gestión hídrica.

Finalmente, los patrones espaciales observados confirman que la degradación de la calidad del agua en la MCP responde a la superposición de presiones persistentes y a su expresión territorial, concentrándose en la zona baja de la microcuenca. Tales resultados respaldan un monitoreo

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

periódico focalizado, estructurado como un sistema jerarquizado de seguimiento ambiental que priorice los sectores de mayor vulnerabilidad y fortalezca una vigilancia preventiva aguas arriba, en concordancia con el enfoque adaptativo promovido por el CCME (2017) y metas del ODS 6.

Conclusiones

El análisis de la calidad de agua en la MCP evidenció que la degradación hidroambiental responde a un proceso acumulativo donde interactúan presiones naturales y antrópicas. La estacionalidad hidrológica afectó en particular los parámetros convencionales CF, CE y SDT, cuyos valores disminuyeron durante la época de lluvia por el aumento del caudal y el efecto dilución. No obstante, esta mejora estacional no implicó una recuperación real del sistema, pues la incorporación de metales pesados en el cálculo del CWQI reveló condiciones marginales persistentes.

Las concentraciones elevadas de Fe y Mn se relacionan principalmente con aportes geogénicos derivados de la meteorización y movilización natural de metales desde la litología volcánica predominante en la MCP. En contraste, los valores elevados de Cr y la detección puntual de Cd en la zona baja se asocian con fuentes antrópicas vinculadas con actividades industriales de curtiembre, agroindustria e industria textil. La coincidencia espacial entre estos aportes y los valores más bajos del CWQI en los puntos PM5, PM6 y PM8 confirma que la zona baja, en especial el sector de Totoras, concentra las mayores presiones hidroambientales en la MCP.

La integración del CWQI con el ACP y la modelación espacial en SIG permitió identificar parámetros dominantes, asociar los sitios de monitoreo con sus fuentes potenciales de aporte y priorizar sectores

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

críticos de la MCP. Estos hallazgos aportan una base científica para priorizar estrategias de monitoreo y gestión del agua en cuencas andinas bajo múltiples presiones hidroambientales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al grupo de investigación para la sostenibilidad de cuencas hidrográficas (GISOCH) y a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) por todo el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación.

Financiamiento

El presente artículo es resultado del proyecto de investigación "Descontaminación del río Pachanlica de la Provincia de Tungurahua mediante técnicas integrales de restauración desde la planificación, al seguimiento y control" financiado íntegramente por la ESPOCH.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no existieron conflictos de interés.

Declaración de uso de IA

Durante la preparación de este manuscrito se utilizó *ChatGPT* (*OpenAI*) como apoyo para mejorar la redacción y claridad del texto, así como para identificar literatura científica potencial y nuevas referencias bibliográficas. Todas las referencias sugeridas fueron verificadas y contrastadas con sus fuentes originales antes de ser incorporadas al manuscrito. El autor de correspondencia fue responsable de verificar los

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

resultados generados por la herramienta de inteligencia artificial y de su posterior integración en el artículo. Los autores asumen la plena responsabilidad por la exactitud, integridad y contenido científico del presente trabajo.

Referencias

Addinsoft. (2025). *XLSTAT statistical and data analysis solution* (versión 2025) (software). https://www.xlstat.com

APHA, AWWA, & WEF, American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association. https://www.standardmethods.org/SOP

Armijos-Arcos, F., Salazar, C., Beltrán-Dávalos, A. A., Kurbatova, A. I., & Savenkova, E. V. (2025). Assessment of water quality and ecological integrity in an Ecuadorian Andean watershed. *Sustainability*, *17*(8), 3684. https://doi.org/10.3390/su17083684

Cabello-Torres, R. J., Flores-del-Pino, L., Del-Pilar-Salcedo, M., Alegría-Arnedo, M. C., Rodriguez-Rodriguez, M., & Valdiviezo-Gonzales, L. (2022). Cinética de descontaminación de aguas de curtiembre utilizando biofloculantes. *Tecnología y ciencias del agua*, *13*(6), 1-55. https://doi.org/10.24850/j-tyca-13-06-01

Caranqui, J., & Ortíz, M. (2021). Diversity and floristic composition in the analogous vegetation of Indiviso, Baquerizo Moreno, Tungurahua. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, *1*(4), 1120-1128. https://doi.org/10.18502/espoch.v1i4.9503

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment. (2017). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME water quality index, user's manual*. https://ccme.ca/en/res/wqimanualen.pdf

Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): History, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *22*(2), 349-395. https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7

Custodio, M., Cuadrado, W., Peñaloza, R., Montalvo, R., Ochoa, S., & Quispe, J. (2020). Human risk from exposure to heavy metals and arsenic in water from rivers with mining influence in the Central Andes of Peru. *Water*, *12*(7), 1946. https://doi.org/10.3390/w12071946

Devetac, I. L., Diaz, B. G., Acuña, A., Quiroga, J. J., & Bertoni, O. (2025). Análisis comparativo de índices de calidad de agua (ICA) aplicados en la región hidrográfica del río Gallegos (Patagonia Austral, Argentina). *Informes Científicos Técnicos-UNPA*, *17*(1), 91-120. https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v17.n1.1170

Domínguez-Franco, H., Custodio, M., Peñaloza, R., & De-la-Cruz, H. (2021). Application of multivariate statistical methods and water quality index for the evaluation of surface water quality in the Cunas River Basin, Peru. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, *18*(4), 19-27. https://doi.org/10.3233/AJW210039

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Drenkhan, F., & Castro-Salvador, S. (2023). Una aproximación hacia la seguridad hídrica en los Andes tropicales: desafíos y perspectivas. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, *12*, 1-21. https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202302.A006

Farzadkia, M., Djahed, B., Shahsavani, E., & Poureshg, Y. (2015). Spatio-temporal evaluation of Yamchi Dam basin water quality using Canadian water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, *187*(4), 168. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4379-8

Garate-Quispe, J., Gonzales-Aliaga, R., & Ibañez-Quispe, V. (2025). Physicochemical characterization and metal content in water and sediments of affluents to a reservoir in the southeast Peruvian Andes. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *28*(3). https://doi.org/10.56369/tsaes.6270

Gaviria, S., Hernández, O., & Vargas, O. (2023). Relación entre procesos de erosión y geoquímica de sedimentos y suelos de Checua, cuenca alta del río Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *28*(109), 497-508. https://doi.org/10.18257/raccefyn.28(109).2004.2109

Gil-Marín, J. A., & González, A. (2020). Modelo de calidad del agua de un río mediante el uso combinado de análisis de componentes principales (ACP) y regresiones lineales múltiples (RLM). Caso de estudio: cuenca del río Guarapiche, Maturín, Monagas, Venezuela. *Anales Científicos*, *81*(1), 152-172. https://doi.org/10.21704/ac.v81i1.1586

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Guzmán-Colis, G., Thalasso, F., Ramírez-López, E. M., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A. L., & Avelar-González, F. J. (2011). Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguascalientes, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *27*(2), 89-102. https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/25007

HGPT, Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua. (2019). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Tungurahua 2019-2023*. https://www.tungurahua.gob.ec/file/2020/07/PDyOT-TUNGURAHUA-2019-2023-Version-2.pdf

IGM, Instituto Geográfico Militar del Ecuador. (2025). *Cobertura geográfica nacional*. https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/

INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador. (2025). *Anuario meteorológico*. https://servicios.inamhi.gob.ec/Anuarios-Metereologicos/

INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador. (2022). *Boletín Técnico Nacional: Censo Ecuador 2022*. https://www.censoecuador.gob.ec/public/Boletin_Nacional.htm

INEN, Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2022). *Calidad del agua—Muestreo. Parte 1: Guía para el diseño de programas y técnicas de muestreo (NTE INEN-ISO 5667-1)*. https://drive.google.com/file/d/1QWa-ehEYAEzpfMLjyH_7WWqmXv6jh79-/view

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *374*(2065), 2-16. https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202

Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, *20*(1), 141-151. https://doi.org/10.1177/001316446002000116

Lumb, A., Sharma, T. C., Bibeault, J.-F., & Klawunn, P. (2011). A comparative study of USA and Canadian water quality index models. *Water Quality, Exposure and Health*, *3*(3-4), 203-216. https://doi.org/10.1007/s12403-011-0056-5

MAE, Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2018). *Texto unificado de legislación secundaria de medio ambiente (TULSMA).* https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Texto-Unificaco-Legislacion-Secundaria-Medio-Ambiente.pdf

Nahm, F. S. (2016). Nonparametric statistical tests for the continuous data: the basic concept and the practical use. *Korean Journal of Anesthesiology*, *69*(1), 8. https://doi.org/10.4097/kjae.2016.69.1.8

Osorto-Núñez, M. H., Martínez-Rodríguez, D., & Merlo-Rodríguez, V. (2023). Evaluación de la calidad de agua mediante un análisis multivariante en los esteros del Golfo de Fonseca, Honduras. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, *52*(1), 65-92. https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2023.52.1.1181

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Panagopoulos, Y., Alexakis, D. E., Skoulikidis, N. T., Laschou, S., Papadopoulos, A., & Dimitriou, E. (2022). Implementing the CCME water quality index for the evaluation of the physicochemical quality of Greek rivers. *Water*, *14*(17), 2738. https://doi.org/10.3390/w14172738

Ruiz-Ordóñez, D. M., Solano-Correa, Y. T., Maysels, R., & Figueroa-Casas, A. (2023). Land-use dynamics and water quality in Andean basins. *Sustainability*, *15*(22), 15965. https://doi.org/10.3390/su152215965

Santamaría-Zárate, Y. L., Angulo-de-Castro, I., & Ordóñez-Díaz, M. M. (2021). Análisis multitemporal y estadístico de parámetros fisicoquímicos monitoreados en la cuenca alta del río Bogotá. *Revista UIS Ingenierías*, *20*(4), 13-26. https://doi.org/10.18273/revuin.v20n4-2021002

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, *52*(3-4), 591-611. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591

Silva, M. J., & Salinas-Morales, D. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica UISRAEL*, *9*(1), 69-80. https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427

Swain, L. G. (2024). The evolution of the Canadian (CCME) water quality index. *Water Quality Research Journal*, *59*(4), 342-346. https://doi.org/10.2166/wqrj.2024.052

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2020). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources*, *1*(3), 34-38. https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3

Uribe, L. F., Reyes, A., & Hernández, L. (2023). Calidad del agua en ríos urbanos: caso del río Fucha, Bogotá, Colombia. *Tecnología y ciencias del agua*, *14*(5), 291-330. https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-05-07

Villamarín, C., Prat, N., & Rieradevall, M. (2014). Caracterización física, química e hidromorfológica de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú. *Latin American Journal of Aquatic Research*, *42*(5), 1072-1086. https://doi.org/10.3856/vol42-issue5-fulltext-12

WHO, World Health Organization. (2025). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda* (4th ed.). World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)