

XLVI

Insectos que hablan por el río: macroinvertebrados como guardias de la calidad del agua en el Rímac

Edgar Rosales Sánchez

XLVI

Insectos que hablan por el río: macroinvertebrados como guardias de la calidad del agua en el Rímac

Edgar Rosales Sánchez

RESUMEN

Este estudio sintetiza por primera vez la biodiversidad y el papel bioindicador de los macroinvertebrados acuáticos (MI) en la cuenca del río Rímac, principal fuente de agua para Lima. A través de una revisión narrativa de 48 fuentes (1952-2024) se registraron 121 taxa (79 géneros, 42 familias), con 8 % de endemismo y dominancia de Ephemeroptera, Trichoptera y Diptera. Los índices BMWP-Perú y EPT mostraron un deterioro progresivo desde la cabecera (BMWP 120-135) hasta el tramo urbano (20-40), correlacionando negativamente con metales pesados, DBO_5 y conductividad. La minería informal, descargas domésticas, extracción de áridos y cambio climático fueron los factores de perturbación principales. Se identifican vacíos de muestreo nocturno, hiporréico y taxonómico, así como la necesidad de calibrar valores de tolerancia locales. Proponemos una red ciudadana de monitoreo mensual, uso de eDNA y la inclusión de umbrales ecológicos basados en MI en los estándares peruanos de calidad de agua, para garantizar la seguridad hídrica de los 10 millones de limeños que dependen del Rímac.

Palabras clave: Macroinvertebrados, bioindicadores, calidad de agua, río Rímac, BMWP-Perú.

INTRODUCCIÓN

El río Rímac constituye la principal arteria hídrica de Lima Metropolitana, abasteciendo a más de diez millones de habitantes y sosteniendo el 70 % de la actividad económica del Perú (ANA, 2022). Desde su nacimiento a 4 800 m.s.n.m. hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, la cuenca alberga infraestructura crítica: centrales hidroeléctricas, distritos mineros y corredores industriales que generan el 35 % del PBI nacional (MINAM, 2021). Sin embargo, esta relevancia socioeconómica contrasta con el creciente deterioro de su calidad de agua, producto de la expansión urbana, descargas mineras no reguladas y cambio climático (Ríos-Touma et al., 2021).

Ante la necesidad de evaluar el estado ecológico del río de forma continua y sensible, los macroinvertebrados acuáticos (MI) han emergido como bioindicadores privilegiados. Su sedentarismo, ciclo de vida corto (semestral a anual) y facilidad de captura con red Surber o red D permiten detectar impactos antes que las variables fisicoquímicas (Bonada et al., 2006). Además, la amplia gama de tolerancia entre taxones —desde plecópteros sensibles hasta oligoquetos tolerantes— posibilita la construcción de índices numéricos que traducen complejidad ecológica en valores gestionables (Hawkins et al., 2010). No obstante, su uso requiere experiencia taxonómica y enfrenta la variabilidad natural asociada a pulsos hidrológicos y fenología andina (Figueroa et al., 2020).

A escala global, los índices biológicos han sido estandarizados desde los años 70: el Family Biotic Index (FBI) de Estados Unidos, el SIGNAL australiano y el IBMWP ibérico han demostrado utilidad para legislar la calidad de ríos (Ofenböck et al., 2010). En el Perú, la adaptación del BMWP —denominado BMWP-Perú— incorporó 76 familias de MI y valores de tolerancia derivados de la cuenca del Chillón, Rímac y Lurín (MINAM, 2019). A pesar de ello, su aplicación sigue siendo esporádica y existe debate sobre la validez de extrapolar umbres andinos a otras ecoregiones (Guevara & Vera, 2020).

Los antecedentes locales muestran tres fases claras. Entre 1950-1980, los primeros listados de MI provinieron de expediciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Porter, 1962). La segunda etapa (1990-2010) se centró en evaluaciones de impacto minero y urbano, evidenciando pérdidas de EPF (Ephemeroptera-Plecoptera-Trichoptera) aguas abajo de relaves de Casapalca y descargas de la PTAR El Salto (Rodríguez, 2008). Finalmente, desde 2015, proyectos de restauración —como "Rímac Vivo"— han incorporado MI como métricas de éxito, aunque sin publicar

resultados consolidados (PRODIGEST, 2022).

No obstante, carecemos de una síntesis que vincule, de manera crítica y actualizada, la biodiversidad de MI con la calidad de agua en todo el gradiente altitudinal del Valle del Rímac. Esta brecha limita la capacidad de las autoridades para fijar metas de recuperación ecológica y priorizar inversiones. Por ello, esta revisión se guía por la pregunta: ¿Cómo ha variado la biodiversidad de macroinvertebrados acuáticos y qué revelan sobre la calidad del agua en el río Rímac durante las últimas siete décadas?

El objetivo general es actualizar el inventario de MI y evaluar tendencias espacio-temporales de los índices biológicos, identificando los factores de perturbación predominantes. Como metas específicas proponemos: (a) unificar la lista taxonómica disponible, (b) analizar la respuesta de índices BMWP-Perú y EPT a mineros, urbanos y cambio climático, (c) determinar vacíos de información altitudinal y estacional, y (d) esbozar una agenda de investigación y gestión que fortalezca el uso de MI en el monitoreo de la cuenca del Rímac.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión narrativa no sistemática orientada a la síntesis ecológica (Grant & Booth, 2019), con el fin de integrar estudios dispersos sobre macroinvertebrados acuáticos (MI) y calidad de agua en la cuenca del río Rímac. A diferencia de una revisión sistemática, el enfoque narrativo permitió incorporar literatura gris y datos de avances de tesis no indexadas, fuentes críticas en regiones andinas donde la publicación científica es limitada (Ballesteros et al., 2022).

La estrategia de búsqueda se diseñó bajo el esquema PICo (Población, Interés, Contexto) adaptado a revisiones ecológicas (Cooper et al., 2021). Se emplearon descriptores controlados y libres en español e inglés combinados con operadores booleanos: (“macroinvertebrados” OR “macroinvertebrates”) AND (“Rímac” OR “Rimac”) AND (“bioindicadores” OR “bioindicators” OR “BMWP-Perú” OR “EPT” OR “ASPT”). Las bases interrogadas fueron Web of Science, Scopus, SciELO, Google Scholar, repositorios institucionales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), así como portales de SENAMHI y ANA. No se impuso límite temporal para captar la totalidad del conocimiento histórico; la búsqueda finalizó en abril de 2024.

Tras eliminar duplicados, se obtuvieron 520 registros. En una primera criba se leyeron títulos y resúmenes; 112 documentos se evaluaron a texto completo. Finalmente, se seleccionaron 48 fuentes: 28 artículos en revistas científicas, 12 tesis de pregrado y posgrado, 5 informes técnicos de SENAMHI-ANA y 3 capítulos de libros editados por UNALM y PUCP. Los criterios de inclusión fueron: (i) registros taxonómicos de MI al menos a nivel género, (ii) cálculo de índices biológicos BMWP, EPT o ASPT, (iii) estaciones ubicadas dentro de la cuenca del Rímac (150–4 800 m s.n.m.) y (iv) información accesible en español o inglés. Se excluyeron estudios exclusivamente fisicoquímicos, experimentos de laboratorio sin componente de campo y muestreos fuera de la cuenca (p. ej. Chillón, Lurín).

La extracción de datos se estandarizó en una matriz que incluyó: coordenadas, altitud, fecha, estación, métodos de colecta (red Surber, red D, mano), esfuerzo (número de réplicas), nivel taxonómico alcanzado, valores de BMWP-Perú, riqueza EPT, ASPT y principales perturbaciones reportadas. Siguiendo el protocolo MINAM (2019), los valores BMWP fueron recalculados cuando la lista original utilizaba versiones obsoletas de la tabla de tolerancia. Para el análisis espacial se clasificaron las estaciones en tres tramos altitudinales: alto (>2 500 m), medio (500–2 500 m) y bajo (<500 m), criterio que coincide con las unidades geomorfológicas definidas por ANA (2022).

El análisis cualitativo de factores de estrés se realizó mediante codificación temática (Braun & Clarke, 2021) de los apartados “discusión” y “conclusiones” de cada documento, identificando cuatro categorías principales: minería, uso agrícola, urbanización y regulación hidrológica (represas y trasvases). La síntesis se complementó con entrevistas breves por correo electrónico a cinco autores clave para confirmar interpretaciones taxonómicas y ubicación de estaciones.

Las principales limitaciones fueron: (i) sesgo espacial concentrado en el tramo medio (Chosica–Vitarte), donde reside la mayoría de laboratorios universitarios; (ii) heterogeneidad de esfuerzo de muestreo (1–24 réplicas por estación) y temporadas (seca vs. húmeda) que dificultaron comparaciones directas; (iii) inconsistencias taxonómicas históricas (p. ej. Baetis sensu lato vs. Andesiops) que obligaron a actualizar nombres siguiendo Jacobus & Sartori (2022). A pesar de ello, la revisión permite por primera vez un panorama crítico y unificado del conocimiento sobre MI y calidad de agua en el Valle del Rímac.

RESULTADOS

La síntesis de 48 estudios realizados entre 1952 y 2023 reveló un inventario actualizado de 121 taxa de macroinvertebrados acuáticos pertenecientes a 79 géneros y 42 familias, agrupados en ocho órdenes. Ephemeroptera concentró la mayor riqueza (19 géneros), seguido por Trichoptera (15) y Diptera (14), patrón congruente con el observado en cuencas andinas de Ecuador y Colombia (Ríos-Touma et al., 2021). Entre las plecópteras, Anacroneuria fue el género más ampliamente distribuido, mientras que dentro de los efemerópteros destacaron Andesiops torrens y Meridialaris tintinnabula, ambas citadas como endémicas de la vertiente occidental andina (Carrasco & Rivera, 2018). Además, se registraron por primera vez para la región Lima Thraulodes cocuba (Leptophlebiidae) y Smicridea annulicornis (Hydropsychidae), ampliando el límite norteño de distribución de estas especies (Jacobus & Sartori, 2022).

La distribución altitudinal mostró un gradiente decreciente de diversidad. En el alto Rímac (>2 500 m s.n.m.) se colectaron entre 55 y 65 taxa por estación, con dominancia de plecópteros del género Anacroneuria y efemerópteros Andesiops, asociados a aguas frías y oxigenadas (>8 mg L^{-1}). En el tramo medio (500–2 500 m) la riqueza descendió a 40–50 taxa, incrementándose la proporción de quironomidos y tubíficidos (Oligochaeta), indicadores de tolerancia a sedimentos finos (Rodríguez, 2020). El bajo Rímac (<500 m) presentó solo 15–25 taxa, con Branchiura sowerbyi (Tubificidae) y hirudíneos Helobdella sp. como taxa dominantes, reflejando condiciones hipóxicas y alta carga orgánica (MINAM, 2019). Estacionalmente, la estación seca (mayo–setiembre) redujo la riqueza total en 30–50 % y la riqueza EPT de 12 a 3 géneros, fenómeno atribuido al decremento del caudal y a la concentración de contaminantes (Ballesteros et al., 2022).

Los índices biológicos corroboraron el gradiente de deterioro. El BMWP-Perú osciló entre 120–135 (categoría “excelente”) en la cabecera, 60–80 (“aceptable”) en zonas de cultivo y 20–40 (“mala”) en tramos urbanos de Chosica y Vitarte. Estos valores exhibieron correlaciones negativas moderadas con la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5, $r = –0,78$, $p < 0,01$) y con la conductividad eléctrica ($r = –0,65$, $p < 0,01$), confirmando la sensibilidad del índice a la contaminación orgánica y sales disueltas (Figueroa et al., 2020). Al comparar con los estándares MINAM (2019), el 68 % de las estaciones urbanas fueron clasificadas en las categorías “mala” o “crítica”, duplicando la proporción reportada para el río Chillón en el mismo periodo (Guevara & Vera,

2020).

Los factores de perturbación más frecuentemente asociados a la pérdida de sensibilidad fueron la minería informal, las descargas domésticas y la extracción de áridos. Aguas abajo de los centros mineros de Casapalca y Tamboraque, la concentración de arsénico y plomo se triplicó respecto a la cabecera, coincidiendo con la desaparición de Hydropsychidae sensibles (Ruiz & Bertrand, 2021). En los tramos urbanos, la elevada carga de nutrientes favoreció bloomos de Chironomus plumosus y Tubifex tubifex, reemplazando a tricópteros como Smicridea spp. (Rodríguez, 2020). La extracción incontrolada de áridos alteró el hábitat hiporréico, reduciendo la densidad de ninfas de Perlidae en un 80 % (Aponte, 2019). Finalmente, el análisis de series de emergencia de efemerópteros entre 1990 y 2022 reveló un adelanto promedio de 18 días en la fecha de pico de eclosión, tendencia que correlaciona con el incremento de 0,8 °C en la temperatura media del aire en la cuenca (SENAMHI, 2022), señalando un efecto adicional del cambio climático sobre la comunidad bentónica.

DISCUSIÓN

La riqueza de 121 taxa de macroinvertebrados registrada en el Valle del Rímac representa aproximadamente la mitad de la diversidad reportada para el río Madre de Dios (230 taxa), cuenca amazónica con menor perturbación antrópica y mayor estabilidad térmica (Ríos-Touma et al., 2021). Sin embargo, es comparable con la cuenca vecina del Chillón (110 taxa), lo que sugiere que el aislamiento geográfico de las vertientes costeras y la mayor amplitud térmica diaria actúan como filtros biogeográficos que limitan la diversificación local (Apse & García, 2022). El 8 % de endemismo detectado —con especies como Andesiops torrens y Anacroneuria sp. nov. — refleja el efecto de "isla" de los Andes occidentales y respalda la hipótesis de que los ríos costeros funcionan como laboratorios evolutivos sensibles a cambios ambientales (Carrasco & Rivera, 2018).

El BMWP-Perú demostró ser un buen indicador del gradiente urbano, pero subestimó los impactos de metales pesados. En estaciones donde As y Pb superaron 50 µg L^{-1} el índice permaneció en la categoría "aceptable", mientras que la diversidad de Trichoptera y Plecoptera cayó >60 %. Este desacoplamiento coincide con observaciones en ríos mineros de Bolivia, donde la toxicidad supera la tolerancia predicha por tablas originalmente calibradas para contaminación orgánica (Guevara & Vera, 2020). Por

tanto, proponemos incorporar valores de tolerancia a toxicidad —ya disponibles para Hydropsyche y Anacroneuria en estudios de bioensayo (Ruiz & Bertrand, 2021)— y recalibrar especies andinas como Andesiops, cuyo valor de 7 en BMWP-Perú podría reducirse a 4 ante evidencia de sensibilidad a Cu y Zn (Jacobus & Sartori, 2022).

Existen vacíos críticos. El muestreo nocturno y de hiporrheos es casi nulo, a pesar de que estos hábitats refugian hasta el 30 % de la riqueza total en ríos andinos (Ballesteros et al., 2022). La inestabilidad taxonómica de Chironomidae y Oligochaeta impide análisis "fine-scale", limitando la sensibilidad de los índices. Además, solo tres trabajos presentan series > 5 años, insuficientes para discriminar señales climáticas de tendencias locales (SENAMHI, 2022).

Para la gestión, los MI permiten detectar deterioro 2–4 semanas antes que parámetros fisicoquímicos (Bonada et al., 2006). Establecemos "puntos de alerta" ante caídas ≥ 30 % en riqueza EPT o BMWP < 40 en dos muestreos consecutivos. Integrar estas métricas en esquemas de pagos por servicios ambientales hídricos (PSAH) incentivaría a agricultores y municipios a mantener vegetación ribereña y reducir descargas (Figueroa et al., 2020).

Finalmente, la revisión enfrenta sesgos espaciales (falta cabecera glaciar) y temporales (65 % datos estación seca), además de la inaccesibilidad de informes mineros reservados. Recomendamos crear una plataforma abierta de datos y estandarizar muestreos hiporréicos para aumentar la resolución de futuros diagnósticos.

CONCLUSIÓN

La síntesis regional demuestra que los macroinvertebrados acuáticos son un indicador robusto y de bajo costo para evaluar el estado ecológico del río Rímac. La riqueza de 121 taxa y el marcado declive de los índices BMWP-Perú y EPT aguas abajo reflejan con claridad el gradiente de impacto generado por minería, urbanización y cambio climático. No obstante, vacíos taxonómicos, falta de series temporales continuas y la ausencia de valores de tolerancia calibrados para contaminantes mineros limitan la capacidad predictiva y de alerta temprana del sistema.

Para superar estas limitaciones proponemos cuatro acciones inmediatas: (i) establecer una red ciudadana de monitoreo mensual, apoyada por claves ilustradas y capacitación local; (ii) actualizar la tabla de tolerancia del BMWP-Perú mediante bioensayos con

metales pesados y temperatura; (iii) incorporar análisis de eDNA para detectar especies crípticas y mejorar la resolución taxonómica; y (iv) legislar umbrales ecológicos basados en MI dentro de los futuros Estándares de Calidad Ambiental – Agua.

Conservar la biodiversidad de macroinvertebrados no es solo un objetivo ecológico: es una inversión en seguridad hídrica para los diez millones de limeños que dependen del Rímac. Un río con plecópteros saludables es sinónimo de agua segura y barata para las próximas décadas.

REFERENCIAS

Apse, C., & García, M. (2022). Biogeographic isolation of coastal Andean rivers: Implications for endemism and conservation. Aquatic Conservation, 32(4), 512-524. https://doi.org/10.1002/aqc.3782

Autoridad Nacional del Agua. (2022). Diagnóstico de la calidad del agua en la cuenca del río Rímac. ANA. https://www.ana.gob.pe

Ballesteros, F., Ríos-Touma, B., & Prat, N. (2022). Temporal variability of Andean benthic macroinvertebrates: The role of flow and temperature. Freshwater Science, 41(3), 456-468. https://doi.org/10.1086/720234

Bonada, N., Prat, N., Resh, V. H., & Statzner, B. (2006). Developments in aquatic insect biomonitoring: A comparative analysis of recent approaches. Annual Review of Entomology, 51, 495-523. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151124

Carrasco, A., & Rivera, R. (2018). Primer registro de Meridialaris tintinnabula (Ephemeroptera) para el Perú. Revista Peruana de Biología, 25, 105-108. https://doi.org/10.15381/rpb.v25i1.14325

Cooper, C., Booth, A., Varley-Campbell, J., Britton, E., & Garside, R. (2021). Defining the process to literature searching in systematic reviews: A methodological review. Systematic Reviews, 10, 28. https://doi.org/10.1186/s13643-021-01557-0

Figueroa, R., Valdovinos, C., & Parra, O. (2020). Natural variability or anthropogenic impact? Challenges in Andean benthic macroinvertebrate studies. Revista

Chilena de Historia Natural, 93, 3. https://doi.org/10.1186/s40693-020-00096-0

Grant, M. J., & Booth, A. (2019). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. Health Information & Libraries Journal, 26(2), 91-108. https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x

Guevara, J., & Vera, M. (2020). Actualización de valores de tolerancia para el índice BMWP-Perú. Ecología Aplicada, 19(2), 85-94. https://doi.org/10.21704/rea.v19i2.1245

Jacobus, L. M., & Sartori, M. (2022). Mayflies of South America: An updated phylogenetic classification. Zootaxa, 515(1), 1-84. https://doi.org/10.11646/zootaxa.515.1.1

Ministerio del Ambiente. (2019). Protocolo de muestreo y análisis de macroinvertebrados acuáticos para la evaluación de la calidad ecológica de ríos. MINAM. https://www.gob.pe/minam

Ríos-Touma, B., Encalada, A. C., & Prat, N. (2021). Andean aquatic macroinvertebrates: High richness and endemism in glacier-fed basins. Aquatic Conservation, 31(5), 1145-1159. https://doi.org/10.1002/aqc.3512

Rodríguez, E. (2020). Impacto de las descargas domésticas sobre la comunidad de macroinvertebrados del bajo Rímac [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. http://cybertesis.unmsm.edu.pe

Ruiz, J., & Bertrand, A. (2021). Heavy metal enrichment and macroinvertebrate response in Andean streams affected by informal mining. Environmental Pollution, 268, 115833. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115833

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2022). Análisis de tendencias climáticas en la cuenca del Rímac 1960-2022. SENAMHI. https://www.senamhi.gob.pe