

1 The Biologist (Lima), 2026, vol. 24 (1), XX-XX.

2 DOI: <https://doi.org/10.62430/rtb20262412128>

3 Este artículo es publicado por la revista The Biologist (Lima) de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática,
4 Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los
5 términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
6 [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier
7 medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



9 ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

10 ACCUMULATION OF LEAD AND MERCURY IN *ONCORHYNCHUS MYKISS*

11 (SALMONIFORMES: SALMONIDAE) IN PERU: A META-ANALYSIS

12 ACUMULACIÓN DE PLOMO Y MERCURIO EN *ONCORHYNCHUS MYKISS*

13 (SALMONIFORMES: SALMONIDAE) EN PERÚ: UN METAANÁLISIS

14 José Carlos Estela-Celis¹; Marla Rubí Núñez-Pérez²; Delsi Margot Cusquisiban-

15 Fernandez³ & Hans Ramón Quiroz-Ruiz^{4*}

16
17 ¹Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú. E-mail:

18 josecarlosetelacelis@gmail.com

19 ² Universidad Privada del Norte. Cajamarca, Perú. E-mail: marbyperez2123@gmail.com

20 ³Universidad Privada del Norte. Cajamarca, Perú. E-mail: mcusquisiban07@gmail.com

21 ⁴Universidad Privada del Norte. Cajamarca, Perú. E-mail: quirozh_rci@hotmail.com

22 hans.quiroz@upn.pe

23
24 *Corresponding author: quirozh_rci@hotmail.com

25 Titulillo: Lead and mercury in *Oncorhynchus mykiss* in Peru

26

27 José Carlos Estela-Celis:  <https://orcid.org/0009-0002-7259-5958>

28 Marla Rubí Núñez-Pérez:  <https://orcid.org/0009-0008-4879-2701>

29 Delsi Margot Cusquisiban-Fernández:  <https://orcid.org/0009-0004-0604-3973>

30 Hans Ramón Quiroz-Ruiz:  <https://orcid.org/0000-0002-8482-8328>

31

32 **ABSTRACT**

33 Lead (Pb) and mercury (Hg) are persistent, bioaccumulative heavy metals and are
34 considered a risk to aquatic ecosystems and human health. In Peru, rainbow trout
35 (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792) is of high dietary and economic importance and
36 can accumulate these contaminants, raising concern. The objective was to determine the
37 accumulation of Pb and Hg in the muscle tissues of this species in Peru and to compare
38 these concentrations with Codex Alimentarius limits. A literature search was conducted
39 in SciELO, Google Scholar, and a Peruvian repository (Alicia). Mean concentrations of
40 the bioaccumulated metals, standard deviations (imputed when missing), and sample
41 sizes were extracted. A random-effects meta-analysis was performed, assessing
42 heterogeneity (I^2), publication bias (Egger and Begg tests), and subgroups by source
43 (rivers, fish farms, lakes/lagoons). Eight studies were included. *Oncorhynchus mykiss*
44 showed a mean mercury (Hg) concentration of 0.244 mg/kg (95% CI: 0.062–0.425; $I^2 =$
45 93%), with higher values observed in fish farms (0.394 mg/kg). For lead (Pb), the mean
46 concentration was 0.327 mg/kg (95% CI: 0.051–0.603), with levels exceeding
47 permissible limits in samples from rivers (0.842 mg/kg) and fish farms (0.397 mg/kg).
48 No evidence of publication bias was found. It is concluded that Hg levels are generally
49 below established limits, whereas Pb exceeds permissible limits in samples from rivers

50 and fish farms; continuous monitoring and control measures are recommended to ensure
51 food safety.

52 **Keywords:** aquatic contamination - bioaccumulation – lead - mercury - *Oncorhynchus*
53 *mykiss*

54 **RESUMEN**

55 El plomo (Pb) y el mercurio (Hg) son metales pesados persistentes y bioacumulables y
56 considerados un riesgo para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. En Perú, la
57 trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792) tiene alta importancia alimentaria
58 y económica y puede acumular estos contaminantes, lo que genera preocupación. El
59 objetivo fue determinar la acumulación de Pb y Hg en tejidos musculares de esta especie
60 en el Perú y comparar esas concentraciones con los límites del Codex Alimentarius. Se
61 realizó una búsqueda de la literatura en Scielo, Google Académico y un repositorio
62 peruano (Alicia). Se extrajeron promedios de la concentración del metal bioacumulado,
63 desviaciones estándar (imputadas si faltaban) y número de muestras, se realizó un
64 metaanálisis de efectos aleatorios, evaluando heterogeneidad (I^2), sesgo de publicación
65 (Egger y Begg) y subgrupos por procedencia (ríos, piscigranjas, lagos/lagunas). 8 estudios
66 fueron incluidos. *Oncorhynchus mykiss* presenta una concentración promedio de
67 mercurio (Hg) de 0,244 mg/kg (IC95%: 0,062–0,425; $I^2 = 93\%$), con valores más
68 elevados en piscigranjas (0,394 mg/kg). En el caso del plomo (Pb), la concentración
69 promedio fue de 0,327 mg/kg (IC95%: 0,051–0,603), observándose niveles que superan
70 los límites permitidos en muestras provenientes de ríos (0,842 mg/kg) y piscigranjas
71 (0,397 mg/kg). No se evidenció sesgo de publicación. Se concluye que el Hg está
72 generalmente por debajo de los límites, pero el Pb supera los límites permitidos en

73 muestras provenientes de ríos y piscigranjas; se recomienda monitoreo continuo y
74 controles para garantizar la seguridad alimentaria.

75 **Palabras clave:** bioacumulación - contaminación acuática – mercurio - *Oncorhynchus*
76 *mykiss* - plomo

77

78 INTRODUCCIÓN

79 A nivel global, los metales pesados como el plomo (Pb) y el mercurio (Hg)
80 representan una amenaza significativa para la biodiversidad acuática y la salud humana
81 debido a su persistencia, capacidad de bioacumulación y alta toxicidad incluso a bajas
82 concentraciones (Gamboa, 2021). La contaminación de cuerpos de agua por estos metales
83 se incrementa por actividades domésticas, industriales, agrícolas y mineras, así como por
84 procesos atmosféricos que transportan contaminantes hacia ríos y sedimentos (Calvo-
85 Brenes *et al.*, 2024). Estos metales se acumulan en tejidos de peces, afectando procesos
86 esenciales para su crecimiento y supervivencia, y representan un riesgo para la salud
87 humana, especialmente en poblaciones que dependen del consumo de pescado como
88 fuente principal de proteínas, debido a sus efectos neurotóxicos y daños irreversibles al
89 sistema nervioso central y periférico (Aveiga-Ortiz *et al.*, 2022).

90 A nivel nacional, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792) es un recurso comercial
91 de gran importancia y se encuentra entre los peces de agua dulce más consumidos del
92 Perú, ocupando el quinto lugar a nivel mundial de los países productores de trucha con
93 un total de 342 807 T (Ministerio de la Producción, 2020). Lo que destaca es su
94 trascendencia tanto para la economía como para la seguridad alimentaria. Sin embargo,
95 los cuerpos de agua peruanos en la actualidad enfrentan crecientes niveles de
96 contaminación por metales pesados como Pb y Hg, debido a actividades antropogénicas

97 como la minería, el uso de agroquímicos y descargas industriales, lo que constituye un
98 riesgo tanto para la biota acuática como para la salud de los consumidores (Correa-Cuba
99 *et al.*, 2021).

100 En este contexto, se justifica la necesidad de estudios metaanalíticos que integren
101 la evidencia disponible, ya que en el Perú los trabajos sobre la acumulación de metales
102 pesados en peces son aún dispersos y no permiten evaluar de manera sólida el riesgo en
103 *O. mykiss*. Este estudio busca contribuir al fortalecimiento del monitoreo de la
104 contaminación acuática en el Perú y ofrecer información relevante para mejorar la gestión
105 ambiental, la vigilancia sanitaria y la protección de la seguridad alimentaria.

106 El objetivo general fue determinar la acumulación de Pb y Hg en el tejido
107 muscular de *O. mykiss* en cuerpos de agua peruanos y de esta manera comprender mejor
108 su comportamiento tóxico y su implicancia ecológica comparando las concentraciones
109 obtenidas con los límites máximos permitidos establecidos por el Codex Alimentarius y
110 la Norma Técnica Peruana, identificando posibles riesgos para la salud humana y el
111 ecosistema acuático.

112 **MATERIALES Y MÉTODOS**

113 **Diseño del estudio y estrategia de identificación**

114 El presente estudio corresponde a un metaanálisis cuantitativo basado en una
115 revisión sistemática de investigaciones científicas desarrolladas en diferentes cuerpos de
116 agua de diversas regiones del Perú entre 2014 y 2025, que reportan concentraciones de
117 Pb y Hg en tejidos musculares de la *O. mykiss*. Para la búsqueda bibliográfica se utilizaron
118 las bases de datos Scopus, SciELO, Google Académico y un repositorio peruano de

119 investigaciones denominado Alicia. La búsqueda se realizó entre septiembre y diciembre
120 de 2025. Las estrategias de búsqueda fueron adaptadas a las particularidades de cada base
121 de datos y se implementaron de la siguiente manera: En Scopus se utilizó una búsqueda
122 en los campos título, resumen y palabras clave (TITLE-ABS-KEY), focalizada en áreas
123 temáticas relevantes, mediante la combinación de los términos: (“*Oncorhynchus mykiss*”
124 OR “rainbow trout”) AND (“heavy metal” OR mercury OR Hg OR lead OR Pb) AND
125 (bioaccumulat OR accumulation) AND (“water bod” OR river OR lake OR aquaculture
126 OR fish farm) AND (Peru OR Peruvian). En Google Académico se aplicó una estrategia
127 bilingüe que incluyó: (“*Oncorhynchus mykiss*” OR “trucha arcoíris”) AND (plomo OR
128 lead) AND (mercurio OR mercury) AND (bioacumulación OR bioaccumulation) AND
129 (Perú OR Peru). En SciELO se empleó una estrategia optimizada para la literatura
130 latinoamericana en español: (“*Oncorhynchus mykiss*”) AND (“metales pesados” OR
131 plomo OR mercurio) AND (bioacumulación) AND (Perú). Finalmente, en el repositorio
132 peruano de Acceso Libre a la Información Científica (Alicia) se utilizó la estrategia:
133 “trucha arcoíris” AND “metales pesados” AND “contaminación acuática” AND “Perú”.

134 La selección de los estudios se realizó en varias etapas. Primero se hizo una lectura
135 inicial de los títulos y resúmenes, realizada por un primer investigador, con el fin de
136 descartar trabajos que no pertenecieran al ámbito geográfico peruano o que evaluaran
137 otras especies de peces. Luego, los estudios preseleccionados pasaron a una lectura
138 completa del texto íntegro, realizada por dos investigadores. En esta segunda etapa se
139 verificó que los estudios reportaran valores cuantitativos de Pb y/o Hg, que el tejido
140 muscular estuviera claramente identificado y que la metodología analítica fuera válida.
141 Las discrepancias entre revisores se resolvieron por consenso. Asimismo, el proceso de
142 revisión siguió explícitamente las recomendaciones de la guía PRISMA.

143 Se incluyeron estudios realizados en cuerpos de agua del Perú que utilizaron *O.*
144 *mykiss* como especie de estudio y que reportaron valores cuantitativos de Pb y/o Hg
145 expresados en mg/kg o µg/g, correspondientes específicamente a tejido muscular.
146 Asimismo, se consideraron artículos científicos y tesis publicados entre 2014 y 2025 que
147 describieron de manera clara la metodología empleada y proporcionaron estadísticas
148 descriptivas adecuadas, incluyendo promedio y desviación estándar. Se excluyeron
149 estudios que evaluaron alevines, investigaciones realizadas en otras especies, trabajos que
150 no presentaron datos numéricos o que carecieron de información sobre la media o el
151 número de ejemplares testeados, así como aquellos con metodología poco clara o sin
152 acceso al texto completo.

153 **Extracción de datos**

154 La extracción de datos se realizó mediante una matriz en Excel. De cada estudio
155 se registraron los siguientes datos: autor/año, región, procedencia, tejido analizado,
156 método de análisis, metal evaluado, promedio (mg/kg), SD (desviación estándar) y n
157 (número de muestras). Posteriormente, los valores de concentración de Pb y/o Hg fueron
158 organizados y revisados para identificar inconsistencias y diferencias de unidades.

159 Para estandarizar los datos, las unidades expresadas en µg/g y ppm fueron convertidas a
160 mg/kg utilizando equivalencias matemáticas internacionalmente aceptadas. Las
161 conversiones se realizaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$1 \text{ ppm} = 1 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$$

$$1 \text{ µg/g} = 1 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$$

164 Estas equivalencias se fundamentan en relaciones de masa ampliamente reconocidas
165 (Getty, 2015; ATSDR, 2019).

166

167 **Metaanálisis**

168 Los datos fueron analizados mediante un metaanálisis de variable continua única,
169 considerándose el promedio de concentración del metal pesado, el número de ejemplares
170 de trucha testeados y la desviación estándar. Para los estudios que no reportaron
171 desviación estándar, esta se completó mediante imputación estadística, calculando la
172 desviación estándar faltante como la media de las desviaciones estándar reportadas en los
173 estudios incluidos. Este procedimiento es consistente con las recomendaciones
174 metodológicas descritas en la literatura, donde se reconoce que, ante la ausencia de
175 estadísticas completas, es válido imputar la desviación estándar utilizando estimaciones
176 derivadas de datos resumidos disponibles para evitar la pérdida de estudios en el
177 metaanálisis (Weir *et al.*, 2018).

178 Se realizó el análisis de heterogeneidad mediante el I^2 ; en todos los casos, los
179 cálculos se realizaron mediante un modelo de efectos aleatorios; para la medida de
180 resumen se emplearon medias brutas. Para estimar y ajustar el número y los resultados de
181 posibles estudios faltantes, como métodos de corte y relleno, se empleó la función *true*.
182 Los resultados se presentan en diagramas de bosques mediante un análisis general y por
183 subgrupos considerando la procedencia de los ejemplares de trucha. También se evaluó
184 el sesgo de publicación mediante Funnel plot y test de Egger. Los análisis se realizaron
185 en un servidor web para metaanálisis basado en R Shiny (Yi *et al.*, 2022).

186 **Aspectos éticos:** Este estudio se basó exclusivamente en datos secundarios
187 obtenidos de estudios publicados previamente. No hubo participantes humanos ni
188 animales involucrados directamente en esta investigación, por tanto, no se requirió
189 aprobación ética ni consentimiento informado

190 **RESULTADOS**

191 45 documentos provinieron de bases de datos, específicamente de Scopus (n =
192 10), Alicia (n = 8), Google Académico (n = 19) y Scielo (n = 8). Antes del proceso de
193 cribado, se eliminaron 5 registros duplicados y 20 registros por no abordar el tema de
194 interés, quedando 20 registros para la etapa de screening. Durante el cribado se
195 excluyeron cinco estudios que analizaban otra especie, cinco no pudieron recuperarse,
196 quedando 10 estudios para evaluar su elegibilidad. Dos estudios se excluyeron por no
197 presentar datos numéricos o por haberse realizado en alevines. Ocho estudios, al cumplir
198 con todos los criterios de selección establecidos, se incorporaron al metaanálisis (Fig. 1).
199 Las características de los estudios incluidos se detallan en la Tabla 1.

200

201

202

203

204

205

206

207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245

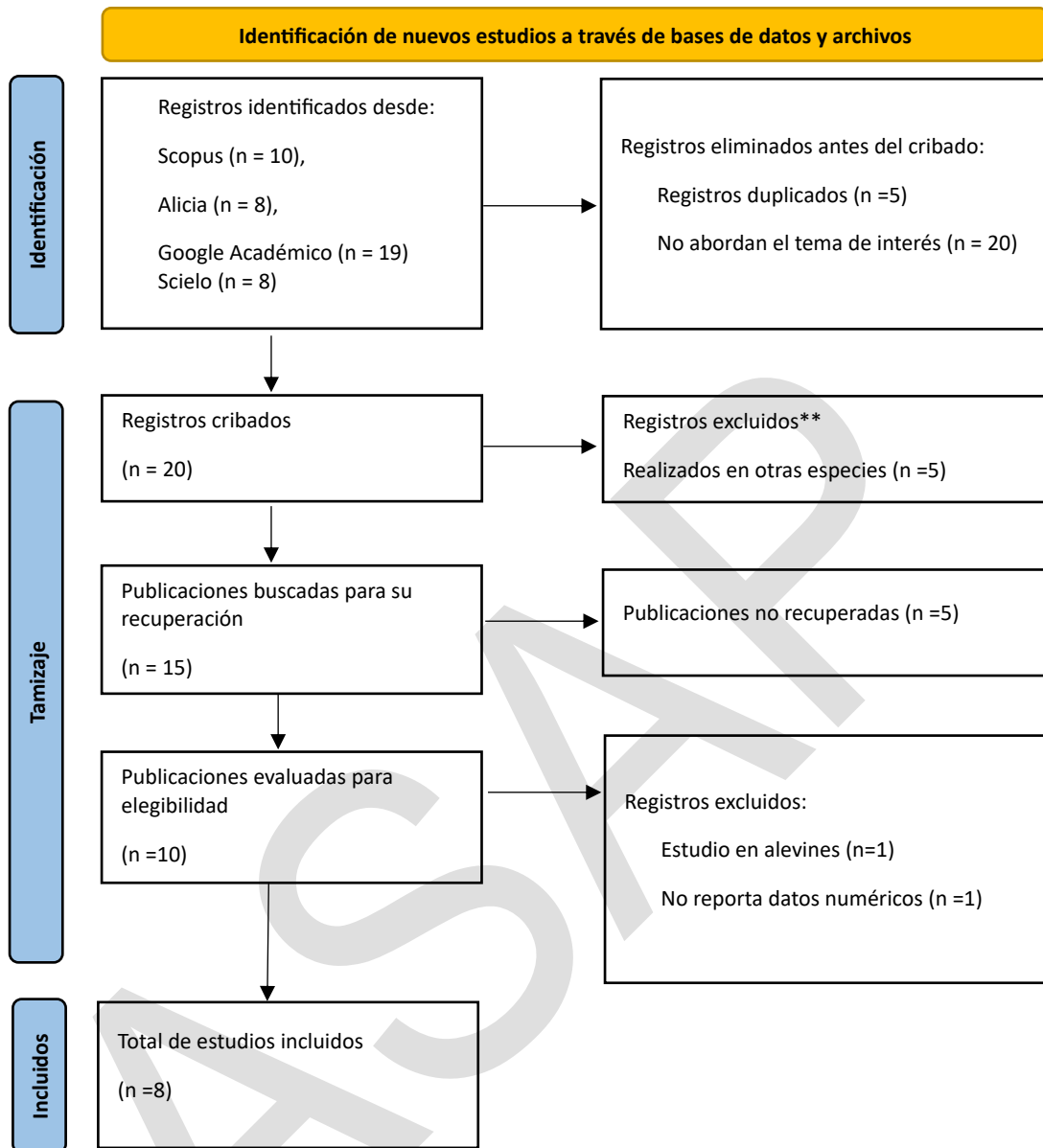


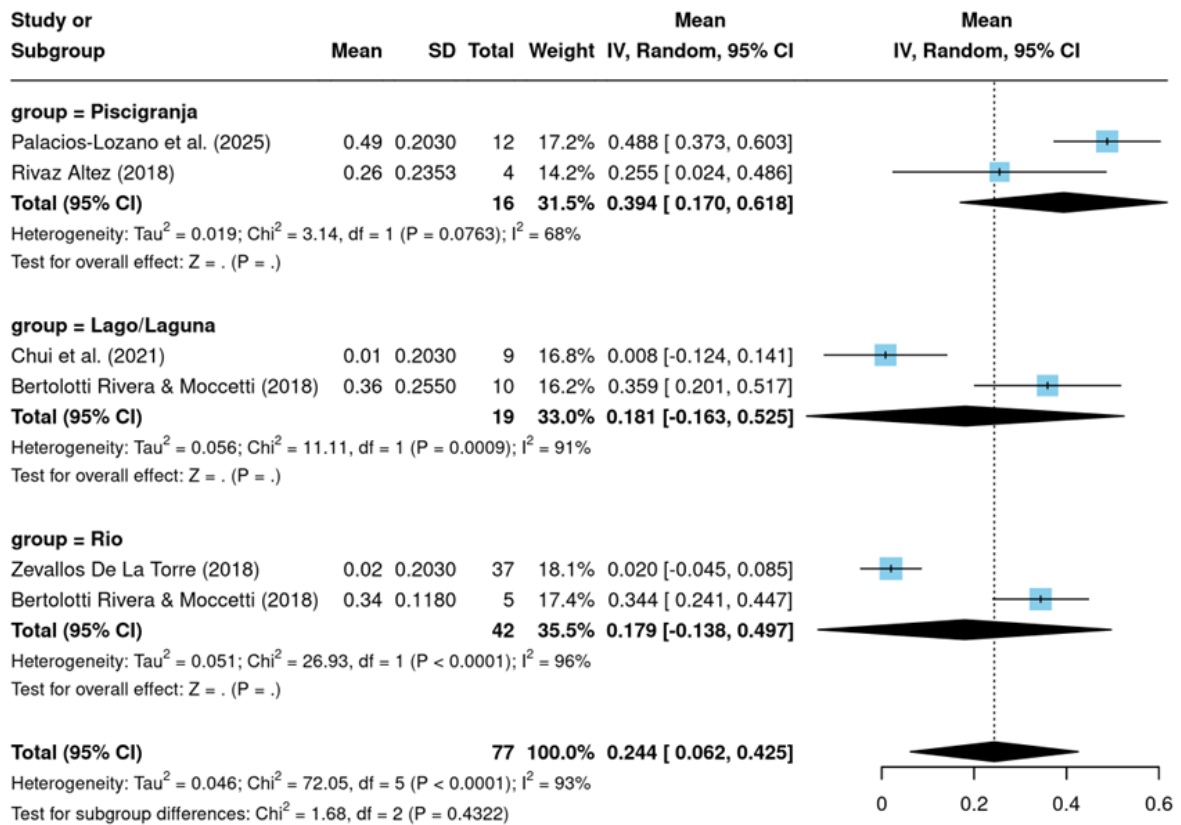
Figura 1. Diagrama PRISMA para la inclusión de estudios.

246 **Tabla 1.** Características de los estudios incluidos que reportan concentraciones de Pb y
 247 Hg en tejido muscular de *Oncorhynchus mykiss* en Perú.

Autor /Año	Región	Procedencia	Método de Análisis	Metal	Promedio (mg/kg)	SD	n
Palacios-Lozano <i>et al.</i> (2025)	Junín	Piscigranja	Absorción atómica	Pb	0,301	0,698**	12
Chui <i>et al.</i> (2021)	Puno	Lago/Laguna	Técnica de plasma de acoplamiento inductivo con espectrofotómetro de emisión óptica (ICP-OES)	Pb	0,051	0,698**	9
Zevallos-De La Torre (2018)	Apurímac	Rio	Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)	Pb	0,040	0,698**	37
Bertolotti-Rivera & Moccetti (2018)	Áncash	Rio	Técnica de absorción atómica de flama (AAS-Flama)	Pb	1,826	1,299	5
Bertolotti-Rivera & Moccetti (2018)	Áncash	Lago/Laguna	Técnica de absorción atómica de flama (AAS-Flama)	Pb	0,516	0,530	10
Huancaré-Pusari (2014)	Cajamarca	Lago/Laguna	Espectrofotometría de absorción atómica (AAS), Método 200.8 (USEPA)	Pb	0,030	0,698**	35
Bautista-Trillo (2018)	Huancavelica	Piscigranja	Método de espectroscopía de absorción	Pb	0,012	0,698**	10
Rivas-Altez (2018)	Lima	Piscigranja	Espectrofotometría de absorción atómica: horno de grafito (AAS-HG)	Pb	0,808	0,266	4
Palacios-Lozano <i>et al.</i> (2025)	Junín	Piscigranja	Absorción atómica	Hg	0,488	0,203*	12
Chui <i>et al.</i> (2021)	Puno	Lago/Laguna	Técnica de plasma de acoplamiento inductivo con espectrofotómetro de emisión óptica (ICP-OES)	Hg	0,008	0,203*	9
Zevallos-De La Torre (2018)	Apurímac	Rio	Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS)	Hg	0,020	0,203*	37
Bertolotti-Rivera & Moccetti (2018)	Áncash	Rio	Técnica de absorción atómica de flama (AAS-Flama)	Hg	0,344	0,118	5
Bertolotti-Rivera & Moccetti (2018)	Áncash	Lago/Laguna	Técnica de absorción atómica de flama (AAS-Flama)	Hg	0,359	0,255	10
Rivas-Altez (2018)	Lima	Piscigranjas	Espectrofotometría de absorción atómica: vapor frío (AAS-Vapor Frío)	Hg	0,255	0,235	4

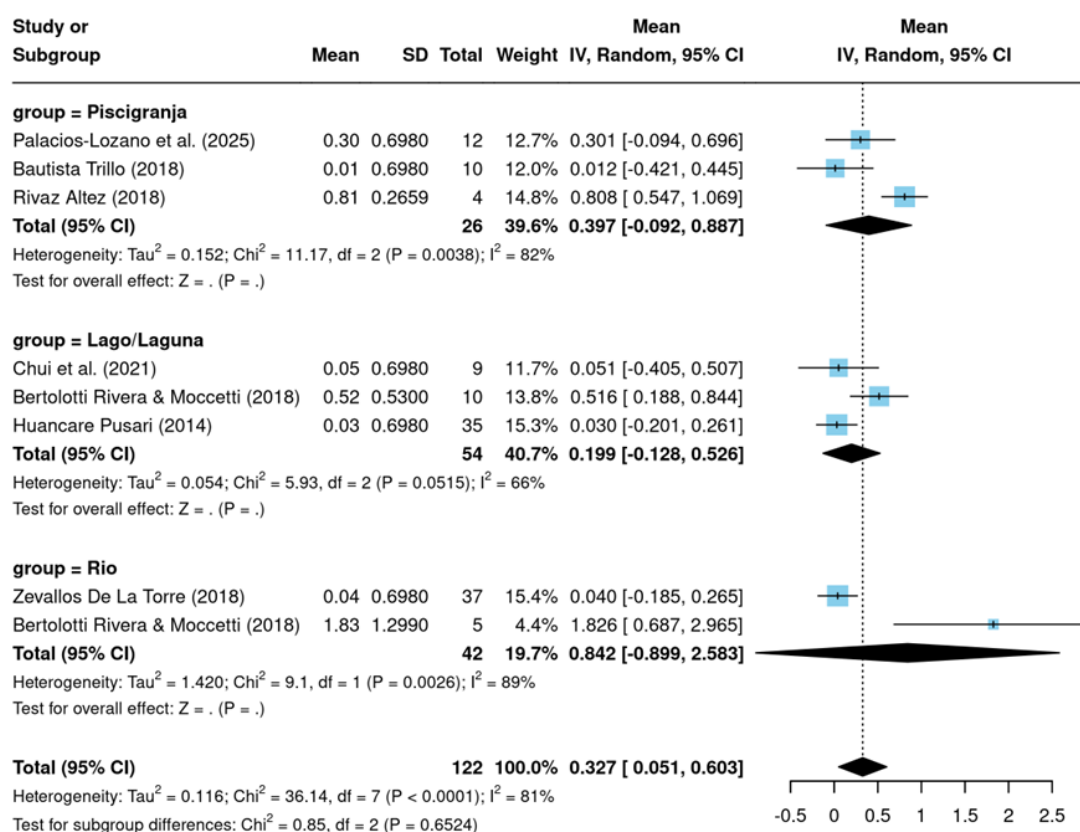
248 **Nota:** * calculado por imputación estadística a partir de estudios que reportan SD para
 249 bioacumulación de Hg. ** calculado por imputación estadística a partir de estudios que reportan
 250 SD para bioacumulación de Pb.

251 El metaanálisis encontró que el porcentaje de acumulación de Hg el tejido muscular es de
 252 0,244 mg.kg⁻¹ (IC 95 %: 0,062-0,425) con una alta heterogeneidad I²=93 %, el análisis
 253 por subgrupos encontró que truchas procedentes de piscigranjas acumulaban 0,394
 254 mg.kg⁻¹, las que proceden de lagos o lagunas acumulan 0,181 mg.kg⁻¹ y 0,179 mg.kg⁻¹ las
 255 que proceden de ríos (Fig. 2). Respecto al Pb se encontró una acumulación de 0,327
 256 mg.kg⁻¹ (IC 95 %: 0,051-0,603) con variaciones dependiendo de la procedencia, los
 257 valores más altos de concentración de Pb se encontraron en truchas procedentes de ríos
 258 con 0,842 mg.kg⁻¹, seguidos de 0,397 mg.kg⁻¹ en las procedentes de piscigranjas y 0,199
 259 mg.kg⁻¹ en truchas procedentes de lagos o lagunas (Fig. 3).



260 **Figura 2.** Diagrama de bosque para el porcentaje de acumulación de Hg en el tejido
 261 muscular de *Oncorhynchus mykiss* en Perú.

262



263

264 **Figura 3.** Diagrama de bosque para el porcentaje de acumulación de Pb en el tejido
 265 muscular de *Oncorhynchus mykiss* en Perú.

266

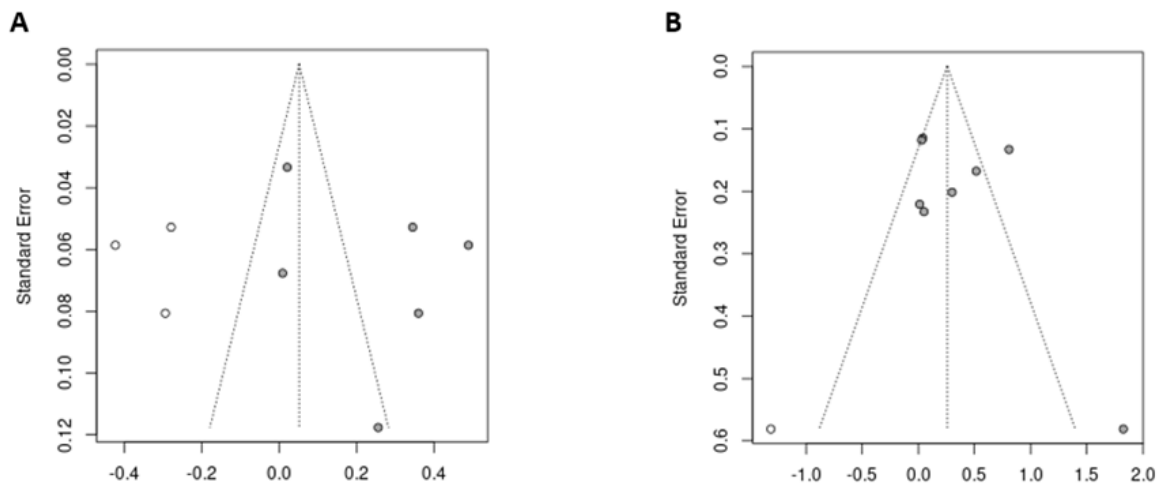
267 No se encontró sesgo de publicación para los estudios incluidos que reportaron
 268 acumulación de Hg (p-valor del test de Egger: 0,30 y p-valor del test de Begg: 0,85) ni
 269 para los que reportaron acumulación de Pb (p-valor del test de Egger: 0,40 y p-valor del
 270 test de Begg: 0,45). El *Funnel plot* se muestra en la Fig. 4.

271

272

273

274



275

276 **Figura 4.** Funnel plot que muestra sesgo de publicación. A: Estudios que reportan
 277 concentración de Hg en *O. mykiss*. B: Estudios que reportan concentración de Pb en *O.*
 278 *mykiss*.

279

280 DISCUSIÓN

281 Es importante indicar que el Hg, especialmente en forma de metilmercurio, se
 282 origina por metilación microbiana del Hg inorgánico en los cuerpos de agua. Este
 283 compuesto es altamente biodisponible y se absorbe eficientemente en el tracto intestinal
 284 de los peces, uniéndose a proteínas musculares y acumulándose de forma persistente
 285 (Loza del Carpio & Ccancapa-Salcedo, 2020). Esta afinidad proteica explica su mayor
 286 bioacumulación en tejidos comestibles. Por su parte, el Pb tiene una absorción intestinal
 287 menos eficiente, pero tiende a depositarse en tejido muscular y óseo. Sus niveles en peces
 288 dependen fuertemente de la contaminación ambiental local, como descargas industriales
 289 o aguas residuales. Estudios en México muestran que la presencia de Pb en peces está
 290 estrechamente vinculada a vertidos sin tratamiento y efluentes industriales (Mancilla-
 291 Villa *et al.*, 2023).

292 Los resultados del metaanálisis fueron interpretados a la luz de los límites
293 máximos establecidos por el Codex Alimentarius (FAO/WHO, 2025), que fija un valor
294 de 0,5 mg/kg para metilmercurio en peces no depredadores y de 0,3 mg/kg para Pb. En
295 este contexto, la concentración promedio de mercurio (0,244 mg/kg) observada en *O.*
296 *mykiss* se encuentra por debajo del umbral establecido, lo que sugiere un riesgo limitado
297 para el consumo humano. En contraste, la concentración promedio de plomo (0,32 mg/kg)
298 supera ligeramente el valor permitido, lo que plantea una señal de alerta desde el punto
299 de vista de la inocuidad alimentaria. En el Perú, la Autoridad Nacional de Sanidad
300 Pesquera (SANIPES, 2020) adopta los criterios del Codex Alimentarius para la regulación
301 sanitaria de los productos hidrobiológicos, por lo que estos valores constituyen un marco
302 válido para evaluar el riesgo asociado al consumo de trucha en el país.

303 Los resultados, además, mostraron alta heterogeneidad entre los estudios ($I^2 >$
304 90%), lo que refleja la fuerte influencia de factores locales como las fuentes de
305 contaminación, la calidad del agua, los métodos analíticos y las características de cada
306 ecosistema. Esta heterogeneidad tiene implicancias importantes, pues indica que la
307 exposición a metales en *O. mykiss* no es uniforme y depende significativamente del tipo
308 de cuerpo de agua y ecosistema evaluados.

309 El análisis por tipo de ecosistema muestra diferencias relevantes. En las truchas
310 provenientes de ríos, los niveles de mercurio (0,179 mg/kg) se mantuvieron por debajo
311 del límite del Codex, indicando un riesgo relativamente moderado, posiblemente por la
312 dilución generada por el flujo constante y la menor disponibilidad de metilmercurio
313 biodisponible. No obstante, en regiones influenciadas por minería aurífera, se ha
314 reportado que el metilmercurio puede alcanzar niveles elevados en peces de ríos,
315 evidenciando procesos de bioacumulación en zonas de alta presión minera (Cruz-

316 Esquivel & Marrugo-Negrete, 2022). Sin embargo, las concentraciones de plomo fueron
317 considerablemente elevadas (0,842 mg/kg), superando ampliamente el valor máximo
318 permitido. lo cual concuerda con la literatura que describe que estos ecosistemas reciben
319 descargas directas de actividades industriales, mineras, agrícolas y aguas residuales
320 urbanas. Estos aportes históricos han generado persistencia de metales en sedimentos y
321 columna de agua, facilitando la bioacumulación en peces (Gamboa, 2021). Este patrón
322 sugiere que los ecosistemas fluviales podrían estar expuestos a una mayor carga de
323 contaminación, posiblemente asociada a actividades mineras u otras descargas no
324 controladas, configurando el escenario de mayor riesgo para el consumo humano.

325 En las piscigranjas, el mercurio alcanzó valores cercanos al límite regulatorio
326 (0,394 mg/kg), aunque todavía dentro de lo permitido. Este hallazgo podría estar
327 relacionado con la calidad del agua utilizada o con el tipo de alimento suministrado en
328 los sistemas de cultivo. Estas concentraciones representan un riesgo potencial para la
329 calidad del pescado y la salud humana debido a la capacidad del Hg para bioacumularse
330 y biomagnificarse (De La Cruz Palomino, 2024). En el caso del plomo, la concentración
331 promedio (0,397 mg/kg) superó ligeramente el umbral establecido, lo que indica que
332 incluso en ambientes considerados controlados existe exposición a fuentes de
333 contaminación que requieren seguimiento y control continuo, pues la presencia de Pb en
334 piscigranjas continúa siendo una preocupación debido a su persistencia en ambientes
335 acuáticos y los riesgos para la salud humana y animal (Mamani-Flores *et al.*, 2025).

336 Por el contrario, en lagos y lagunas se observaron concentraciones más bajas tanto
337 de plomo (0,199 mg/kg) como de mercurio (0,181 mg/kg), ambas dentro de los límites
338 establecidos por el Codex Alimentarius. Estos resultados posicionan a este tipo de
339 ecosistemas como los de menor riesgo, posiblemente debido a una menor presión de

340 actividades contaminantes o a condiciones ambientales que limitan la bioacumulación de
341 metales. Sin embargo, es pertinente indicar que algunos estudios en sistemas lacustres
342 andinos han demostrado la presencia de metales acumulados que afectan tanto a la fauna
343 como al uso del agua por poblaciones cercanas (Mamani-Flores *et al.*, 2025).

344 En conjunto, los hallazgos indican que los ríos y, en menor medida, las
345 piscigranjas representan los principales escenarios de riesgo por acumulación de plomo
346 en *O. mykiss*, mientras que, para el mercurio, solo en las piscigranjas se registran
347 concentraciones cercanas a niveles potencialmente preocupantes.

348 Respecto a las fortalezas del estudio, se puede indicar que se integra evidencia
349 cuantitativa de múltiples fuentes mediante un metaanálisis, lo que permite obtener
350 estimaciones robustas y representativas de la acumulación de metales pesados en *O.*
351 *mykiss*; además, el análisis por subgrupos según ecosistema (ríos, piscigranjas y
352 lagos/lagunas) ofrece una interpretación contextualizada del riesgo real asociado a cada
353 tipo de ambiente. No obstante, es pertinente indicar algunas limitaciones: algunos
354 estudios incluidos no reportaron desviaciones estándar, lo que hizo necesaria su
355 imputación estadística; aunque el método utilizado es adecuado, introduce incertidumbre
356 adicional en las estimaciones, se observó alta heterogeneidad esto se puede deber además
357 del ecosistema a diferencias en métodos analíticos, condiciones ambientales que no se
358 pudieron evaluar en el presente estudio

359 Los resultados de este metaanálisis muestran que la *O. mykiss* en distintos cuerpos
360 de agua del Perú presenta acumulación de Hg y Pb en su tejido muscular, con variaciones
361 según el ecosistema. El Hg se mantiene, en promedio, por debajo del límite del Codex
362 Alimentarius, mientras que el Pb supera los valores permitidos en truchas provenientes

363 principalmente de ríos y algunas piscigranjas, representando un riesgo potencial para la
364 salud humana. Estos hallazgos subrayan la necesidad de fortalecer el monitoreo ambiental
365 de metales pesados, implementar mejores prácticas de gestión en piscigranjas y establecer
366 controles más estrictos en zonas donde se evidencian concentraciones elevadas.
367 Asimismo, se recomienda ampliar la investigación en ecosistemas menos representados
368 para mejorar la precisión y el alcance de futuras evaluaciones.

369 **Author contribution: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)**

370 **JCEC** = José Carlos Estela-Celis

371 **MRNP** = Marla Rubí Núñez-Pérez

372 **DMCF** = Delsi Margot Cusquisiban-Fernandez

373 **HRQR**=Hans Ramón Quiroz-Ruiz

374

375 **Conceptualization:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

376 **Data curation:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

377 **Formal Analysis:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

378 **Funding acquisition:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

379 **Investigation:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

380 **Methodology:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

381 **Project administration:** HRQR

382 **Resources:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

383 **Software:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

384 **Supervision:** HRQR

385 **Validation:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

386 **Visualization:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

387 **Writing – original draft:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

388 **Writing – review & editing:** JCEC, MRNP, DMCF, HRQR

389

390 **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

391 Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR]. (2019).

392 *Exposición total al arsénico: Estudio de un caso práctico.*

393 https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/arsenico/conversion_unidades.html?utm

394 Aveiga-Ortiz, A.M., Banchón-Bajaña, C.L., Mendoza-Cedeño, L.G., Calderón-Pincay,

395 J.M., & Delgado-Moreira, M.I. (2022). Distribución de metales pesados en agua,

396 sedimentos y peces del río Carrizal, Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y*

397 *Ambiental*, 43, 13-23.

398 Bautista-Trillo, CA (2018). Evaluación del contenido de metales pesados en carne y tejido

399 óseo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) producida en el centro poblado de

400 Paccho Molinos, Paucará – Huancavelica [Tesis de grado]. Universidad Nacional

401 de Huancavelica.

402 Bertolotti-Rivera, F., & Moccetti, N. (2018). Concentración de plomo, mercurio y cadmio

403 en músculos de peces y muestras de agua procedentes del río Santa, Ancash –

404 Perú. *Salud y Tecnología Veterinaria*, 6, 35.

405 Calvo-Brenes, G., Quirós-Bustos, N., Robles-Chaves, D., & Caballero-Chavarría, A.
406 (2024). Contenido de metales pesados en sedimentos de varios ríos de Costa Rica.
407 *Revista Tecnología en Marcha*, 37(4), 141-151.

408 Chui, H. N., Roque, B., Huaquisto, E., Sardón, D. L., Belizario, G., & Calatayud, A. P.
409 (2021). Metales pesados en trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) de cultivo
410 intensivo en el noroeste del lago Titicaca. *Revista de Investigaciones Veterinarias*
411 *del Perú*, 32, e20398.

412 FAO/WHO (2025). *General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed*.
413 *CXS 193-1995*.

414 Correa-Cuba, O., Fuentes Bernedo, F. E., & Coral Surco, R. G. (2021). Contaminación
415 por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del río Huancaray - Perú.
416 *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87, 26-38.

417 Cruz-Esquivel, Á., & Marrugo-Negrete, J. (2022). Concentraciones de metilmercurio en
418 *Prochilodus magdalenae* (Teleostei: Curimatidae) y *Hoplias malabaricus*
419 (Teleostei: Erythrinidae) en la cuenca baja del río Cauca-Magdalena, norte de
420 Colombia, *Acta Biológica Colombiana*, 27, 28-35.

421 De La Cruz-Palomino, F. (2024). *Metales pesados en agua y truchas de los centros*
422 *pesqueros del río Apacheta, Ayacucho*. *Revista de Investigación Científica*
423 *Tayacaja*, 7, 53-59.

424 Gamboa, N. (2021). La presencia de los metales pesados en los cuerpos de aguas. *Revista*
425 *de la Sociedad Química del Perú*, 87, 193

- 426 Getty, J.M. (2016). *Consejo del Dr. Getty: Calcular con PPM en dos sencillos pasos.*
427 Juliet M. Getty, Ph.D. <https://signin.juliegoodnight.com/articles/free-articles/dr->
428 [gettys-tip-calculating-with-ppm-in-two-easy-steps/](https://signin.juliegoodnight.com/articles/free-articles/dr-gettys-tip-calculating-with-ppm-in-two-easy-steps/)
- 429 Huancaré-Pusari, R.K. (2014). *Identificación histopatológica de lesiones inducidas por*
430 *bioacumulación de metales pesados en branquias, hígado y músculo de trucha*
431 *arcoiris (Oncorhynchus mykiss) de cultivo en etapa comercial de la laguna de*
432 *Mamacocha, área de influencia minera, Cajamarca-Perú* [Tesis de grado].
433 Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- 434 Loza del Carpio, A.L., & Ccancapa Salcedo, Y. (2020). Mercurio en un arroyo altoandino
435 con alto impacto por minería aurífera artesanal (La Rinconada, Puno, Perú).
436 *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 23, 20–31.
- 437 Mamani-Flores, M., Blas-Alvarado, J., Izquierdo-Villaverde, S., Gonzales-Cauper, G.,
438 Andrade-Saavedra, M., & Pari-Quispe, D. (2025). Contenido de metales pesados
439 en los peces en el Perú: Una revisión sistémica. *Revista de Investigación e*
440 *Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 12, 131-141.
- 441 Mancilla-Villa, O.R., Gómez-Villaseñor, L., Palomera-García, C., Hernández-Vargas, O.,
442 Guevara-Gutiérrez, R.D., Ortega-Escobar, H.M., Flores-Magdaleno, H., Can-
443 Chulim, Á., Sánchez-Bernal, E.I., Avelar-Roblero, J.U., & Cruz-Crespo, E.
444 (2023). Metales pesados en agua y macroinvertebrados de la cuenca del río
445 Ayuquila-Armería (México) y sus afluentes. *Terra Latinoamericana*, 41, e1603.
- 446 Ministerio de la Producción (2020). *Anuario estadístico pesquero y acuícola 2020.*
447 Dirección General de Políticas y Análisis Regulatorio en Pesca y Acuicultura,

448 PRODUCE. <https://ogeiee.produce.gob.pe/index.php/en/shortcode/oee->
449 [documentos-publicaciones/publicaciones-anuales/item/1001-anuario-](https://ogeiee.produce.gob.pe/index.php/en/shortcode/oee-)
450 [estadisticoo-pesquero-y-acuicola-2020](https://ogeiee.produce.gob.pe/index.php/en/shortcode/oee-)

451 Palacios-Lozano, A.A., Canales-Martínez, C.A., & Nureña-Flores, M.A. (2025).
452 Determinación de arsénico, cadmio, mercurio y plomo en *Oncorhynchus mykiss*
453 de piscigranjas en Junín-Perú, 2021. *Ciencia e Investigación*, 27, e31060.

454 Rivas-Altez, W. (2018). *Determinación de arsénico, mercurio y plomo en truchas*
455 *(Oncorhynchus mykiss), piensos y agua de piscigranjas del distrito de*
456 *Pachangara, provincia de Oyón, región Lima* [Tesis de maestría]. Universidad
457 Nacional Mayor de San Marcos.

458 SANIPES. (2020). *Resolución de Presidencia Ejecutiva N.º 059-2020-SANIPES/PE:*
459 *Actualizan el modelo de control y las frecuencias de ensayo de contaminantes*
460 *químicos para actividades pesqueras y acuícolas. Diario Oficial El Peruano*, 19
461 de agosto de 2020. [https://www.gob.pe/institucion/sanipes/normas-](https://www.gob.pe/institucion/sanipes/normas-legales/1101813-059-2020-sanipes)
462 [legales/1101813-059-2020-sanipes](https://www.gob.pe/institucion/sanipes/normas-legales/1101813-059-2020-sanipes)

463 Weir, C. J., Butcher, I., Assi, V., Lewis, S. C., Murray, G. D., Langhorne, P., & Brady, M.
464 C. (2018). How to deal with missing standard deviation and mean values in meta-
465 analysis of continuous outcomes: A systematic review. *BMC Medical Research*
466 *Methodology*, 18, 25.

467 Yi, Y., Lin, A., Zhou, C., Jian, Z., Wang, S., & Luo, P. (2022). *OnlineMeta: An online tool*
468 *for meta-analysis. bioRxiv*, <https://doi.org/10.1101/2022.04.13.488126>

469 Zevallos De-La Torre, S. (2018). *Calidad de agua, bioacumulación de metales pesados*
470 *y niveles de estrés en la trucha arcoíris (Oncorhynchus mykiss) en*
471 *Challhuahuacho, Apurímac* [Tesis]. Universidad Peruana Cayetano Heredia.

472 Received April 9, 2026.

473 Accepted June 3, 2026.

ASAP