

**MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS COMO BIONDICADORES DE CALIDAD
DE AGUA PARA LA CUENCA MEDIA ALTA DEL RÍO TEUSACA:
APROXIMACIONES DE CIENCIA PARTICIPATIVA DEL USO DEL ÍNDICE
BMWP/COL**

VALERIA BERMÚDEZ NARANJO

Directora: Angela Margarita Moncaleano Niño

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES
ECOLOGÍA**

2024

Dedicatoria

Para Johanna Naranjo y John Bermudez,
mi vida y mi motor para crecer y
superar cada obstáculo que me pone la vida

Gracias Dios por tus bendiciones
y por demostrarme que todo lo puedo hacer

Estoy hecha para grandes cosas

Amén.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca alta-media del río Teusacá	17
Figura 2. Distribución de macroinvertebrados en “el Hato”	26
Figura 3. Distribución de macroinvertebrados en “el Líbano”	27
Figura 4. Distribución de macroinvertebrados en “Kourtnik”	28
Figura 5. Distribución de macroinvertebrados en “Green Park”	28
Figura 6. Distribución de macroinvertebrados en “el Tubo”	29
Figura 7. Abundancia de los macroinvertebrados colectados por punto de muestreo	31
Figura 8. Abundancia relativa de los macroinvertebrados colectados por punto de muestreo	31
Figura 9. Riqueza de macroinvertebrados por punto de muestreo.	32
Figura 10. Recolección y depósito de especímenes para su posterior análisis.....	52
Figura 11. Uso de un Microscopio Digital Led Electronico Portatil USB Zoom 1000x para la identificación de macroinvertebrados.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Puntos geográficos con sus respectivas coordenadas y altitud, junto con una ilustración del lugar donde se realizaron los muestreos	19
Tabla 2. Puntaje de cada Familia de Macroinvertebrados para el BMWP-COL.	22
Tabla 3. Puntaje asignado a cada familia de macroinvertebrados acuáticos de acuerdo al índice BMWP/Col	24
Tabla 4. Muestreo de macroinvertebrados por puntos.....	30
Tabla 5. Especificación de las familias presentes en cada punto	33
Tabla 6. Índices ecológicos aplicados a los macroinvertebrados acuáticos colectados por encuentro casual en 5 puntos del muestreo del río Teusacá	34
Tabla 7. Índices de similitud de Jaccard aplicado a la comparación de cada punto.....	34
Tabla 8. Identificación de BMWP-COL por cada punto	36
Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos por punto geográfico	37
Tabla 10. Recomendaciones para fortalecer la investigación.....	38

• RESUMEN

En la actualidad, los ríos y arroyos a nivel global se han visto amenazados por contaminantes derivados de las actividades antropogénicas. En Colombia, se ha identificado que la calidad del agua en la subcuenca del río Teusacá ha sufrido una degradación notable debido al aumento de descargas de aguas residuales y a una variedad de actividades humanas que intensifican el problema. Debido a las implicaciones que la contaminación tiene sobre el entorno general y el estilo de vida de las personas que habitan en las zonas aledañas, resulta necesario que los científicos y los habitantes de la comunidad

se involucren en el monitoreo de la calidad del agua para realizar un seguimiento continuo y eficiente. Así pues, el presente proyecto evaluó la calidad del agua en diferentes puntos geográficos de la subcuenca del río Teusacá desde un enfoque de ciencia participativa con alumnos de educación básica y mediante la recolección de macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de la calidad del agua usando la metodología por encuentro casual. La recolección de estos organismos mostró que la mayoría de los organismos recuperados pertenecen a la clase Insecta. Además, se encontró que, incluso con la variabilidad observada en la caracterización biológica, los diferentes puntos mostraron una calidad del agua deficiente o contaminada. Como conclusión general, los resultados obtenidos muestran que involucrar a jóvenes en la recolección de macroinvertebrados desde un enfoque de ciencia participativa permite evaluar la calidad del agua de manera válida a través del uso de macroinvertebrados bentónicos, fortaleciendo el muestreo de dichos organismos.

Palabras clave: macroinvertebrados, calidad del agua, BMWP-Col, ciencia participativa

• ABSTRACT

Currently, rivers and streams globally have been threatened by pollutants derived from anthropogenic activities. In Colombia, water quality in the Teusacá River sub-basin has suffered a notable degradation due to the increase in wastewater discharges and a variety of human activities that intensify the problem. Due to the implications that pollution has on the general environment and the lifestyle of the people living in the surrounding areas, it is necessary for scientists and community inhabitants to become involved in water quality monitoring for continuous and efficient follow-up. Thus, the present project evaluated water quality in different geographical points of the Teusacá river sub-basin from a participatory science approach with elementary school students and through the collection of benthic macroinvertebrates as bioindicators of water quality using the chance encounter methodology. The collection of these organisms showed that most of the organisms recovered belong to the class Insecta. Furthermore, it was found that the different points

showed poor or polluted water quality. As a general conclusion, the results obtained show that involving young people in the collection of macroinvertebrates from a participatory science approach allows assessing water quality in a valid way through the use of benthic macroinvertebrates, strengthening the sampling of these organisms.

Keywords: macroinvertebrates, water quality, BMWP-Col, participative science

• INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los ríos y arroyos a nivel global se han visto amenazados por contaminantes derivados de las actividades antropogénicas. El vaciado continuo de aguas residuales no tratadas y de residuos sólidos, tanto de origen doméstico como de origen industrial, provoca deterioro en la calidad del agua que afecta a quienes necesitan de estos recursos hídricos (Dalu et al. 2017). Como ejemplo de ello se puede mencionar al Lago Victoria en África Oriental y al Río Ganges en India, los cuales se han visto afectados por la constante descarga de aguas residuales sin tratar (Guadarrama et al., 2016).

En Colombia, la contaminación del agua también es una preocupación significativa, afectando tanto a los grandes ríos como a los pequeños arroyos. Por ejemplo, los ríos Magdalena, Bogotá y Cauca en Colombia enfrentan problemas graves de contaminación. El río Magdalena está afectado por desechos industriales, agrícolas y domésticos, mientras que la minería ilegal contribuye a la presencia de metales pesados (Romero, 2015). El río Bogotá es uno de los más contaminados, con alta concentración de residuos industriales y domésticos no tratados, lo que representa un peligro ambiental y de salud (Herrera, 2020). El río Cauca enfrenta problemas similares debido a la minería y la agricultura, y la descarga de aguas residuales sin tratamiento adecuado (Landázury y Sánchez, 2017)).

De manera similar, se ha identificado que la calidad del agua en la subcuenca del río Teusacá ha sufrido una degradación notable, mostrando niveles de contaminación alta debido al aumento de descargas de aguas residuales y a una variedad de actividades humanas que intensifican el problema, como la ganadería, la producción lechera y la industria del cultivo de flores (Caro, 2022; López Mendoza, 2019; Zabala, 2021). Debido a que la continua degradación de la calidad del agua no solo afecta la salud ecológica de la

cuenca, generando afectaciones en su flora y fauna, sino también la disponibilidad de agua para usos esenciales de quienes dependen de este recurso (p. ej. comunidad del Sopó), resulta urgente de adoptar un enfoque integrado y sostenible en la gestión de los recursos hídricos para contrarrestar las afectaciones reportadas hasta ahora (Solano Guzmán, 2018).

Para abordar este problema a nivel local, se ha buscado implementar marcadores eficientes al momento de detectar contaminantes. Además del uso del índice Biological Monitoring Water Party adaptado a Colombia (BMWP-Col), de manera importante, el uso de macroinvertebrados como biomarcadores de la calidad del agua ha mostrado ser efectivo para este fin pues, en un ecosistema acuático en el cual hay un intercambio cíclico de materia y energía entre los organismos vivos y el ambiente abiótico, la presencia de ciertos organismos indica los componentes del medio con los que interactúa (Núñez y Fragoso-Castilla, 2019; Rincón-Bello et al., 2021). Además, recientemente se demostró que la vinculación con instituciones educativas, es decir, la integración de alumnos de diferentes niveles para la recolección de macroinvertebrados, favoreció la evaluación de la calidad del agua de la subcuenca del río Teusacá al aumentar la fortaleza del muestreo incrementando la cantidad de especímenes recuperados (Guardianes del Tusacá, 2023; Zabala, 2021).

De manera general, la ciencia participativa, también denominada ciencia ciudadana, hace referencia a un enfoque colaborativo en el que el público en general, es decir, ciudadanos, estudiantes o habitantes de una región en particular, contribuye de forma activa en la realización del quehacer científico (Jacques-Aviñó et al., 2020). Este enfoque ha cobrado relevancia y ha sido objeto de numerosos estudios porque ha demostrado que la participación de ciudadanos en la ciencia constituye una herramienta poderosa al momento de abordar una amplia gama de desafíos científicos, entre los que se incluyen la recopilación de datos a gran escala y la resolución de problemas complejos (Marino, 2023). Como ejemplo de ello, Gesimba (2020) realizó un estudio sobre la calidad del agua en el que involucró a comunidades locales en la cuenca del lago Victoria en África Oriental para monitorear la calidad del agua en lagos, ríos y pozos. Los participantes fueron capacitados para recolectar muestras de agua y utilizar equipos simples para medir parámetros como pH, turbidez y concentraciones de nutrientes y contaminantes. Este enfoque ayudó a identificar fuentes de contaminación y orientar acciones para mejorar la calidad del agua en la región (Gesimba, 2020).

De igual manera, en otro trabajo los residentes de áreas agrícolas participaron en la recopilación de datos sobre el uso de pesticidas y sus potenciales efectos en el medio ambiente y la salud humana (Von Gönner et al., 2023). Los participantes realizaron observaciones de campo, recolectaron muestras de agua y suelo y reportaron avistamientos de enfermedades o efectos adversos en la fauna local. Los datos recopilados contribuyeron a una evaluación más completa de los riesgos asociados con el uso de pesticidas al aumentar la cantidad de datos recopilados y apoyaron la formulación de políticas públicas para mitigar estos riesgos.

Finalmente, en un trabajo reportado por Taylor et al. (2021), se reclutó a voluntarios provenientes de comunidades urbanas para muestrear suelo y agua en áreas afectadas por la contaminación por metales pesados. De manera similar a los estudios anteriores, los participantes recibieron capacitación en técnicas de muestreo y análisis de laboratorio básico. Los datos recopilados ayudaron a identificar áreas con niveles elevados de contaminación y a informar acciones de remediación y políticas de control de la contaminación.

Con base en estos antecedentes, se hace evidente que la ciencia participativa no solo es eficiente para la recolección de muestras a gran escala, sino que también fomenta la alfabetización en temas científicos y la conciencia ambiental. Además, a través de la colaboración entre científicos y ciudadanos, se logra una mayor diversidad de perspectivas y fortalece la confianza pública en la ciencia (Jacques-Aviñó et al., 2020).

Por tanto, en lo que refiere al enlace entre la ciencia participativa y el cuidado del agua, parece que la convergencia entre la investigación científica y el compromiso ciudadano para abordar los desafíos relacionados con la gestión y conservación de este recurso vital representa una herramienta beneficiosa para proyectos científicos que buscan recopilar datos, generar conocimiento y tomar decisiones informadas (Espinoza Freire, 2020).

Tomando en cuenta lo anterior, el propósito del presente trabajo consistió en proponer adecuaciones a las estrategias de ciencia participativa al involucrar a estudiantes de educación básica en el uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua proveniente de la cuenca media alta del río Teusacá. Este análisis no solo buscó fortalecer el uso de los organismos mencionados como indicadores esenciales de la salud

ecológica del río, sino que tuvo el interés de aportar nuevas recomendaciones al trabajo reportado en 2023 en el que también se empleó un enfoque de ciencia participativa para seguir promoviendo esta intervención en el colegio hacienda los Alcaparros.

Esta investigación se estructuró en torno a la siguiente pregunta: ¿Cuál es el estado de la calidad del agua en la cuenca alta-media del río Teusacá, evaluada a través del uso de macroinvertebrados como bioindicadores, y qué recomendaciones se pueden hacer al abordarlo desde un enfoque de ciencia participativa, en el que se involucra a estudiantes de educación básica en la recolección de macroinvertebrados? Esta indagación parte de entender la dinámica del río Teusacá y proporciona bases sólidas para futuros estudios y acciones que busquen abordar los problemas ambientales en la cuenca desde una visión comunitaria.

• **OBJETIVOS**

Objetivo general:

Proponer adecuaciones a las estrategias de ciencia participativa para el monitoreo de la calidad del agua, basado en el uso de macroinvertebrados como bioindicadores, para la cuenca media alta del río Teusacá.

Objetivos específicos:

- Caracterizar la abundancia y diversidad de macroinvertebrados acuáticos en cinco puntos de la cuenca alta-media del río Teusacá.
- Determinar el índice del BMWP-COL para los cinco puntos de la cuenca alta-media del río Teusacá.
- Proponer recomendaciones para fortalecer el muestreo de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de la calidad del agua desde la ciencia participativa en instituciones de educación básica, incluyendo primaria y secundaria.

• **MARCO REFERENCIAL**

• **5.1. Calidad del agua**

La concepción de la calidad de las aguas continentales se presenta como un concepto complejo y sujeto a debate entre diferentes expertos. Sierra (2011) señala la controversia existente en la definición y evaluación de este aspecto, subrayando la importancia de un enfoque multidisciplinario para su comprensión (Sierra, 2011). En este sentido, la calidad del agua se considera esencial para el sustento de la vida, incluyendo el ser humano, la

fauna y la flora, así como para actividades cruciales como el riego y la recreación (Correa, 2000). Este concepto no es absoluto, sino que varía en función del uso específico que se le dé al recurso hídrico. Como ejemplo, para el consumo humano, se requiere que el agua sea potable, es decir, que cumpla con estándares de pureza y seguridad establecidos para proteger la salud de las personas. En la agricultura, la calidad del agua se relaciona con su contenido de minerales y nutrientes, ya que puede afectar la salud de los cultivos y el suelo. Finalmente, en la industria, la calidad del agua se refiere a su pureza química y física, ya que puede afectar los procesos de fabricación y la calidad de los productos finales (Obando et al., 2019).

- **5.2. Contaminación hídrica**

La exposición a contaminantes puede comprometer severamente la integridad física, química y biológica del agua, impactando negativamente en su calidad y en los ecosistemas que dependen de ella (Janet Gil et al., 2012). En este contexto, Bullón (2016) enfatiza la necesidad de mantener el agua en un estado de equilibrio que permita su uso sostenible. Vannote (2007), por su parte, introduce el modelo del río como un continuo "The River Continuum", donde propone que las comunidades biológicas en sistemas fluviales tienen la capacidad de adaptarse a los cambios estacionales, por lo que debe optimizarse el uso de la energía disponible en el sistema y mantener un proceso de sucesión biológica uniforme a lo largo del río, lo que contribuye a la estabilidad ambiental. Este enfoque es fundamental para entender cómo se pueden mitigar los impactos de la contaminación y otros factores estresantes sobre los cuerpos de agua.

- **5.3. Calidad biológica del agua y macroinvertebrados bentónicos**

La calidad biológica de los cuerpos de agua es fundamentalmente evaluada a través de la presencia y diversidad de los macroinvertebrados bentónicos. Estos organismos, residentes permanentes en el lecho de ríos y lagos, son cruciales por su sensibilidad a cambios en la calidad del agua, lo que los convierte en indicadores biológicos efectivos (Rincón-Bello et al., 2021). Al respecto, Alonso (2006) y Castro et al. (2018) señalan que estos invertebrados, cuyo tamaño supera los 0,20 mm durante su ciclo vital, reaccionan ante la presencia de contaminantes y otros factores de estrés ambiental, lo que permite evaluar de manera indirecta la salud de los ecosistemas acuáticos.

La relación entre la diversidad de familias de macroinvertebrados y el nivel de contaminación del agua es bien documentada; en entornos altamente contaminados, se observa una disminución en la diversidad de familias, mientras que, en condiciones de menor contaminación, la diversidad tiende a aumentar (Murillo-Montoya et al., 2018). Esto sugiere que los macroinvertebrados bentónicos pueden servir como una herramienta efectiva para el monitoreo y la gestión de la calidad del agua. Molina et al. (2008) resaltan la importancia de los macroinvertebrados bentónicos en las regiones altoandinas, enfatizando su papel como comunidades biológicas significativas en los cursos de agua corriente. La evaluación de la calidad del agua mediante estos organismos ofrece una aproximación sensible y específica a las condiciones ambientales prevalecientes, lo que facilita la identificación de impactos negativos y la implementación de estrategias de conservación y restauración (Rincón-Bello et al., 2021).

- **5.4. Índice de BMWP-COL**

El Índice de Biological Monitoring Working Party modificado para Colombia (BMWP-Col) es una herramienta que ha sido adaptada específicamente a las condiciones ambientales y ecológicas de Colombia y que fue desarrollado inicialmente en Europa durante los años setenta. Este ha sido ampliamente adaptado en Latinoamérica debido a su eficacia en la valoración de la calidad del agua a través de la bioindicación con macroinvertebrados acuáticos pertenecientes a los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera. Estos han sido identificados como los más efectivos para estos estudios, enfatizando la importancia de profundizar en el conocimiento de otros grupos como anélidos y moluscos (Roldán , 2016).

El proceso de adaptación y aplicación del índice BMWP en diferentes contextos colombianos ha sido documentado por diversos estudios. Por ejemplo, Sánchez Herrera (2005) adaptó el índice BMWP al contexto del río Pamplonita en Norte de Santander, ajustando el puntaje basado en análisis comparativos de las morfofamilias capturadas y sus correspondientes condiciones fisicoquímicas. Además, el uso del índice BMWP ha sido implementado en estudios específicos como el realizado por Viveros (2016), quienes emplearon este método para evaluar la calidad del agua en el Humedal Santa María del Lago en Bogotá. Este estudio destacó la efectividad del índice para detectar variaciones en la calidad del agua, basándose en la presencia y distribución de macroinvertebrados, lo que

refuerza la validez de este enfoque para monitorear la salud ecológica de cuerpos de agua urbanos (Viveros, 2016).

Es importante mencionar que, a diferencia de otros índices que también han sido utilizados para evaluar la calidad del agua, como el índice Biológico Andino (IBA), el índice BMWP-Col ha sido adaptado específicamente a Colombia y es el que ha sido aprobado como método de medición de calidad de los ecosistemas de este país (Roldán, 2016). Asimismo, es importante mencionar que, para poder hacer comparaciones a partir de una misma base, esta es la escala que se ha recomendado.

- **Ciencia participativa**

La ciencia participativa es definida como un enfoque colaborativo en el que el público en general contribuye activamente a la investigación científica (Sirvent y Rigal, 2014). Este modelo involucra a individuos, comunidades o grupos en la recopilación de datos, análisis, diseño experimental y otras actividades científicas.

Gracias a su naturaleza inclusiva, permite a personas de diferentes orígenes y niveles de experiencia participar en la investigación científica, se fomenta la colaboración entre científicos y la comunidad en general, permitiendo una mayor diversidad de perspectivas y conocimientos. Aunado a ello, se facilita el acceso a la ciencia y la participación en proyectos de investigación, independientemente de la formación académica (Sirvent y Rigal, 2014).

Como parte de sus beneficios, la ciencia participativa ofrece una serie de ventajas tanto para la comunidad científica como para la sociedad en general. Así pues, permite abordar problemas a gran escala que de otra manera serían difíciles de investigar debido a limitaciones de recursos, mejora la calidad de los datos al permitir una mayor recolección de datos por recursos humanos, empodera a los ciudadanos al involucrarlos en la toma de decisiones basadas en evidencia y en la resolución de problemas de su interés (Sánchez-Jardón et al., 2022). Como ejemplo de ello, se pueden retomar algunos estudios en los que se demostró el impacto de la ciencia participativa favoreció el conocimiento y la toma de decisiones en torno a una problemática en particular. Primero, un estudio realizado por Gesimba (2020) sobre la calidad del agua y que involucró a comunidades locales en la cuenca del lago Victoria en África Oriental ayudó a identificar fuentes de contaminación y orientar acciones para mejorar la calidad del agua en la región. De la misma manera,

cuando, en otro trabajo, los residentes de áreas agrícolas recopilaron datos sobre el uso de pesticidas y sus posibles efectos en el medio ambiente y la salud humana, contribuyeron a una evaluación más completa de los riesgos asociados con el uso de pesticidas y apoyaron la formulación de políticas para mitigar estos riesgos

- **ANTECEDENTES**

- **Antecedentes internacionales**

La investigación sobre la calidad del agua y la utilización de bioindicadores ha recibido atención internacional, destacando el valor de la ciencia participativa y la tecnología en el monitoreo ambiental. Un ejemplo de ello se observa en la tesis de Arévalo y Vanessa (2023) destaca cómo la integración de la tecnología móvil y los macroinvertebrados bentónicos ha facilitado la identificación de alteraciones ambientales en sistemas acuáticos en Perú. De manera particular, este estudio subraya la importancia de involucrar a las comunidades locales en la gestión de recursos hídricos, promoviendo su participación en la monitorización y conservación del agua a través del desarrollo de una aplicación móvil que emplea índices como el IBA y el BMWP-Col (Arévalo & Vanessa, 2023).

Adicionalmente, en Ecuador, Chanatasig Chicaiza y Parra Toro (2024) llevaron a cabo un estudio sobre la "Determinación de la calidad de agua por bioindicadores macroinvertebrados en el Río Quindigua, parroquia Guasaganda, cantón La Maná", donde se examinó el impacto de actividades agrícolas y ganaderas sobre la calidad del agua. Utilizando metodologías que incluyeron la red Subber y el método de patada, esta investigación evaluó la calidad del agua a través de índices biológicos, demostrando variaciones significativas en la calidad del agua entre diferentes puntos de muestreo (Chanatasig Chicaiza & Parra Toro, 2024).

Por otro lado, Alanya Sánchez y Carrera Salas (2023) en su investigación "Identificación de macroinvertebrados bentónicos y su relación con la calidad del agua de la zona urbana de la subcuenca del río Ichu, Huancavelica – 2023", abordaron cómo la presencia y diversidad de macroinvertebrados bentónicos pueden reflejar la calidad del agua en zonas urbanas (Marcela et al., 2023). A través de BMWP e IBA, se estableció una correlación entre la biodiversidad de macroinvertebrados y parámetros fisicoquímicos, resaltando el valor de estos organismos como indicadores de la calidad ambiental.

Los antecedentes internacionales expuestos resaltan la importancia del uso de macroinvertebrados bentónicos en la gestión de recursos hídricos (Arévalo & Vanessa, 2023), por lo que establecen un precedente valioso para aplicar aproximaciones similares en Colombia, especialmente en áreas críticas como la cuenca alta del río Teusacá.

- **Antecedentes nacionales:**

En lo que refiere a los antecedentes nacionales, la investigación realizada por Ríos Torres (2023) en el sistema Chingaza, a través de la formulación del Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA) para un acueducto comunitario, destaca el esfuerzo coordinado para fortalecer la prestación del servicio de agua potable en comunidades rurales. Este enfoque evidencia la necesidad de estrategias inclusivas y participativas en la gestión del agua, enfatizando la importancia de la conservación y el uso sostenible del recurso hídrico en el contexto colombiano (Ríos Torres, 2023).

Por otro lado, la propuesta de Buitrago Cadena (2024) para el diseño de una red de alcantarillado sanitario en el municipio de Cúcuta aborda un problema crítico de saneamiento básico, subrayando la importancia de proyectos de inversión bien estructurados y la metodología de marco lógico para mejorar las condiciones de vida en las comunidades afectadas (Buitrago Cadena, 2024).

- **Antecedentes locales**

En cuanto a los antecedentes locales, Alba y Moreno (2024) utilizaron el procesamiento de imágenes Landsat y fotografías aéreas del IGAC, para revelar cambios significativos en la extensión del cuerpo de agua estudiado (Alba & Moreno, 2024). Esto marcó un precedente en el uso de tecnologías geoespaciales para la evaluación ambiental y resaltó la importancia del uso de diferentes parámetros físico-químicos para apoyar el monitoreo constante de los cuerpos de agua. Este análisis subraya la importancia de la observación continua y la adaptación de estrategias de manejo ambiental frente a las variaciones naturales y antropogénicas.

Por otro lado, el trabajo de Caro et al. (2022) en la cuenca del Río Teusacá proporciona evidencia valiosa sobre el impacto de las actividades humanas en la calidad del agua. Utilizando técnicas de sistemas de información geográfica y monitoreando parámetros como el pH y el oxígeno disuelto, su estudio subraya la conexión directa entre la salud de

los ecosistemas acuáticos y el desarrollo socioeconómico de la región, ofreciendo un marco para la implementación de medidas de conservación eficaces. Además, la investigación sobre macroinvertebrados acuáticos en el río Teusacá por López Mendoza et al. (2019) introduce una perspectiva biológica esencial al evaluar la calidad del agua mediante el empleo de estos organismos como bioindicadores.

Si bien estos antecedentes sientan las bases para el desarrollo de la propuesta en curso, la aproximación más cercana se basa en un estudio realizado por el equipo de los “Guardianes del Teusacá 2.0” (2023), perteneciente al Colegio del Salitre. Este trabajo, que llevó por título “Evaluación de la calidad del agua de la cuenca alta y media del río Teusacá con macroinvertebrados acuáticos como biomarcadores”, trató de dar respuesta a una problemática de contaminación aplicando los índices BMWP-Col e IBA para analizar la calidad del agua en 8 puntos de la cuenca desde un enfoque de ciencia participativa. Los resultados obtenidos mostraron que la calidad del agua fluctúa entre aceptable y ligeramente contaminada en la región alta, mientras que, conforme se avanza hacia la parte media, la calidad del agua recolectada empeora de moderadamente contaminada a muy contaminada cerca del casco urbano del Sopó. Los hallazgos y caracterización de macroinvertebrados para determinar la calidad del agua finalmente derivaron en la implementación de un proyecto, el cual pretende monitorear los niveles de contaminación de agua a lo largo del todo el territorio, liderado por el grupo de investigación mencionado.

Aunque el presente proyecto emplea el mismo enfoque que el trabajo previamente descrito, emplea una metodología diferente al implementar la recolección por encuentro casual que permite la sobrevivencia de los organismos colectados y propone recomendaciones de adecuación al enfoque de ciencia participativa para continuar con su implementación en el colegio hacienda los Alcaparros.

- **ÁREA DE ESTUDIO: SUBCUENCA DEL RÍO TEUSACÁ**

- **Contexto geográfico y ecosistémico**

Anclada en la cordillera Oriental de Colombia, la subcuenca del Río Teusacá destaca por su diversidad topográfica, con elevaciones que van de 2550 a 3650 m.s.n.m. Este gradiente altitudinal determina la complejidad de sus ecosistemas y la dinámica hídrica de un área

que cubre 35,818.42 hectáreas. El río, naciendo en la cota de 3560 m.s.n.m. en el Alto de los Tunjos, atraviesa zonas ecológicas vitales antes de unirse al río Bogotá, delineando así una variedad de paisajes y servicios ecosistémicos que incluyen regulación hídrica y descontaminación atmosférica (Carrillo Arroyo et al., 2020). Este corredor acuático es crucial no solo por su contribución hidrológica sino también por su valor escénico y cultural. Surca la Reserva Forestal Protectora de los Cerros Orientales, ofreciendo bienes y servicios fundamentales para la Sabana de Bogotá, incluyendo la regulación climática y la protección de suelos. Además, provee de agua a comunidades colindantes y apoya la biodiversidad endémica en ecosistemas andinos como páramo y bosque altoandino (Carrillo Arroyo et al., 2020).

Las veredas que constituyen esta cuenca incluyen Verjón Alto y Bajo, donde nacen numerosos afluentes, El Salitre, zona de nacimiento del río y áreas de recarga hídrica, y San Rafael, que circunda el embalse crucial para la regulación hídrica. Otras veredas relevantes son Canavita, hogar de ricos bosques altoandinos, y El Hato en La Calera, una zona de transición entre lo rural y la expansión urbana, así como Guasca y Sopó, que representan la porción media y baja de la cuenca con un uso agrícola intensificado del suelo (Carrillo Arroyo et al., 2020). Estas en total suman 3.309 ha dentro de la cuenca y destacan por su paisaje montañoso que comprende zonas de ecosistemas alto andino, subpáramo y páramo. La diversidad hídrica es rica, con quebradas como El Verjón y El León, y su importancia radica en la producción de agua y la prestación de servicios ecosistémicos (Martínez, 2008).

Dentro de esta área se destacan ecosistemas significativos como el páramo del Verjón, esencial para la regulación hídrica y climática de la región, y el bosque altoandino en veredas como Canavita, que son vitales para la producción de oxígeno y la regulación de los flujos hídricos. Las zonas húmedas y los embalses, particularmente el embalse San Rafael (Figura 1), son fundamentales para la vida acuática y la recreación, mientras que las zonas de rastrojo y cultivo muestran una transición del bosque a tierras de uso agrícola, aún ricas en biodiversidad biológica. Estos ecosistemas no solo contribuyen a la biodiversidad regional, sino que también son cruciales para la sostenibilidad del ciclo hidrológico en la subcuenca del Río Teusacá (Carrillo Arroyo et al., 2020)

Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca alta-media del río Teusacá

- **Dinámicas demográficas y socioeconómicas**

La Calera y Sopó exhiben un dinamismo demográfico significativo que impacta directamente en la infraestructura y los servicios públicos locales. La Calera, con una población estimada por el DANE en el 2021 de 34234 habitantes, muestra una distribución por edades diversa, con una notable presencia de jóvenes y adultos mayores, lo que subraya la necesidad de adaptar los servicios públicos a estas demografías variables (Secretaría de planeación de Bogotá, 2022). Por otro lado, Sopó, con aproximadamente 27456 residentes, de los cuales alrededor de 8347 habitan las áreas rurales del municipio, refleja gran cantidad de habitantes atraídos tanto por sus oportunidades económicas como por su cercanía a Bogotá, y que por lo tanto, harán uso de la cuenca hidrográfica estudiada (Alcaldía De Sopó, 2020).

Desde el punto de vista económico, ambos municipios se destacan por actividades predominantes como la agricultura y la ganadería, que constituyen la columna vertebral de sus economías locales. En La Calera, el turismo ecológico y de aventura también juega un papel crucial, aprovechando la proximidad a Bogotá y el entorno natural, lo que aporta directamente a la economía local (Vázquez et al., 2008). Sopó, reconocido por su industria láctea y floricultura, contribuye significativamente al mercado regional y nacional, subrayando la importancia de políticas de manejo ambiental que aseguren la sostenibilidad de estos sectores económicos (Alcaldía Municipal De Sopó, 2020). Estas prácticas económicas requieren un manejo cuidadoso de los recursos naturales para garantizar la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad en la región (Alcaldía Municipal De Sopó, 2020).

La gestión de residuos y el tratamiento de aguas residuales son esenciales para la salud pública y la protección ambiental, una prioridad reflejada en los esfuerzos para implementar tecnologías avanzadas y prácticas sostenibles en ambos municipios. Carrero (2012) reportó que cerca del 13% de los residuos industriales llegan al Embalse San Rafael. Además, la comunidad que habita sus alrededores manifiesta que una de las mayores problemáticas que enfrenta dicha comunidad es el manejo de alcantarillado y de aguas residuales, los cuales afectan la cuenca estudiada (Carrillo Arroyo et al., 2020). Por otro

lado, las prácticas culturales de La Calera y Sopó, como la agricultura tradicional y la celebración de festivales, son fundamentales para la identidad local y la conservación del paisaje natural. Dichas prácticas son claves para promover un desarrollo sostenible y están en el corazón de la educación ambiental y las iniciativas de gestión del agua en la región (Alcaldía Municipal De Sopó, 2020; Secretaría de planeación de Bogotá, 2022).

La planificación y gestión sostenible de estos recursos se tornan imperativas para mitigar los impactos ambientales y asegurar un equilibrio entre el desarrollo y la conservación. Las políticas de manejo ambiental, junto con las prácticas de tratamiento de aguas residuales y gestión de residuos, deben ser fortalecidas y expandidas para abordar los retos presentes y emergentes. En este sentido, la educación ambiental y la participación comunitaria juegan papeles fundamentales, promoviendo la conservación de estos ecosistemas y fomentando un desarrollo más armónico con el medio ambiente (Secretaría de planeación de Bogotá, 2022; Carrero, 2012). Así, la subcuenca del Río Teusacá se destaca no solo por su valor ecológico, sino también como un espacio vital para la sustentabilidad regional y el bienestar de sus comunidades (Alcaldía Municipal De Sopó, 2020).

• **METODOLOGÍA**

La investigación presente adopta un enfoque de estudio de caso dentro de la metodología cuantitativa, orientada a la identificación y distribución de macroinvertebrados en la subcuenca del Río Teusacá. Esta elección metodológica se fundamenta en el diseño descriptivo-explicativo, que permite evaluar interacciones específicas entre variables ambientales y biológicas sin alterar o manipular el entorno o sus componentes.

• **8.1. Fases o etapas de la investigación**

La investigación se desarrolló en 4 etapas principales, de manera similar a lo descrito por el equipo de investigación Guardianes del Teusacá 2.0 (2023), indicando al final las recomendaciones realizadas al enfoque de ciencia participativa.

• *Determinación de puntos de colecta y diseño de instrumentos*

Para desarrollar la presente investigación en la subcuenca del río Teusacá, se seleccionaron cinco puntos a lo largo de la cuenca alta-media, como se muestra en la Tabla

1. En estos puntos, se realizó la captura por encuentro casual de macroinvertebrados

acuáticos, inicialmente propuesto para la herpetofauna por Angulo et al. (2006) y adaptado por Carrero (2020) para macroinvertebrados acuáticos de Boyacá. El método seleccionado consistió en la búsqueda libre y sin restricciones a través de transectos aleatorios, adaptada específicamente para los macroinvertebrados acuáticos con el fin de asegurar la fidelidad y comparabilidad de los resultados obtenidos (Roldán, 2003).

Tabla 1. Puntos geográficos con sus respectivas coordenadas y altitud, junto con una ilustración del lugar donde se realizaron los muestreos

LOCALIDAD DE MUESTREO	COORDENADAS GEOGRAFICAS WGS-84	ALTITUD	DESCRIPCIÓN
El Hato (P1)	-8238753, 516651	3,005 msnm	
El Líbano (P2)	-8237789, 519414	2,785 msnm	
Kurtnik (P3)	-8237170, 520880	2,760 metros	
Green Park (P4)	-8237095, 521109	2,740metros	
El Tubo (P5)	-8234503, 525598	2,718 msnm	

Fuente: Elaboración propia

En lo que refiere a los instrumentos, la evaluación de la calidad del agua en este estudio se llevó a cabo utilizando el Índice de Biological Monitoring Working Party modificado para Colombia (BMWP-Col), el cual se describió previamente en el apartado de Marco referencial. A continuación, se detallan los instrumentos empleados para la investigación en la subcuenca del Río Teusacá:

- *Trabajo de campo o recolección de datos*

Utilizando una red D-net, se llevó a cabo un muestreo cuantitativo dirigido a capturar e identificar visualmente macroinvertebrados acuáticos que nadan o habitan en hojas y tallos de la vegetación sumergida. Este proceso se organizó en tres estaciones de muestreo:

- Musgo
- Piedra en corriente rápida (PCR)
- Piedra en corriente lenta (PCL)

En cada estación, los macroinvertebrados fueron colectados realizando un barrido a contracorriente durante un tiempo estandarizado de 20 segundos. Los especímenes

colectados se depositaron en una bandeja blanca para facilitar su observación y posterior captura (Roldán, 2003) (Anexos Figura 10).

Como medidas complementarias, durante el muestreo se midieron *in situ* variables incluidas el pH, temperatura y conductividad utilizando un medidor multiparámetro. Este instrumento proporciona datos adicionales sobre las condiciones fisicoquímicas del hábitat acuático en cada punto de muestreo, los cuales coadyuvaban en la descripción de los niveles de contaminación del agua recolectada.

- *Laboratorio y organización de la información*

Para la identificación de los macroinvertebrados se utilizó un Microscopio Digital Led Electronico Portatil USB Zoom 1000x, el cual permitió una identificación eficiente y precisa. Este equipamiento facilitó la captura de imágenes para el registro de los especímenes, como se observa en la Figura 11 (Anexos). El uso de este enfoque no solo optimizó la identificación, sino que también permitió la liberación rápida de los insectos tras su catalogación. La identificación se apoyó en la "Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia" de Roldán, que ofrece una referencia específica y detallada para su identificación exacta (Roldán, 2003).

Además, para efectos de este trabajo, los datos de los organismos identificados se organizaron con base en las clases, órdenes y familias para cada estación de muestreo. La evaluación de la calidad del agua en los puntos estudiados se realizó a través del cálculo del índice biológico BMWP/Col. Las familias de macroinvertebrados se ordenaron en 10 niveles con las puntuaciones de 1 a 10, siendo 1 un número de mayor tolerancia y 10 de menor tolerancia Roldan (2003) como se muestra en la tabla 2. Su fórmula es la siguiente:
$$BMWP = T1+T2+T3+\dots$$

Tabla 2. Puntaje de cada Familia de Macroinvertebrados para el BMWP-COL.

- *Interpretación y análisis de resultados*

Para establecer la diversidad en la comunidad de macroinvertebrados, se calcularon los siguientes índices:

Índice de Riqueza de Margalef. Medida utilizada en ecología para estimar la diversidad de una comunidad con base a la distribución numérica de los individuos (Pla, 2006). El

valor mínimo que puede adoptar es cero, y ocurre cuando solo existe una especie en la muestra. Así pues, un valor por debajo de 2 se considera una región de baja biodiversidad, y por encima de 5, una región de alta biodiversidad (Pla, 2006). Se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$DMg = (S-1) / \ln N$$

Donde:

S = número de especies

N = número total de individuos

Índice de Dominancia o Predominio ecológico (C) - (Simpson, 1949). Expresa la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar de una muestra pertenezcan a dos tipos diferentes (Magurran, 2004). Con este, la relación numérica se interpreta como: a mayor diversidad, mayor el índice; el valor máximo es el número de especies de la comunidad (riqueza de especies).

S

$$C = 1 - \sum_{i=1}^S (n_i / N)^2$$

i = 1

n_i = Número de individuos por género.

N = Número total de individuos de la población de una estación de muestreo.

S = Número de géneros.

Índice de Diversidad de (Shannon – Wiener, 1949). Expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies de la muestra; mide el grado promedio de la incertidumbre en predecir a que especie pertenecerá un individuo escogido al azar en una colección (Valdéz et al., 2018).

$$H' = -\sum_{i=1}^S n_i / N \log_2 n_i / N$$

H' = Diversidad (Bits / individuos).

n_i = Número de individuos por género.

N = Número total de individuos de la población de una estación de muestreo.

Índice de Similitud de Jaccard. Mide el grado de similitud entre dos conjuntos y se calcula de la siguiente manera:

$$I_j = c / a + b - c$$

Donde:

a = número de especies presentes en el sitio a.

b = número de especies presentes en el sitio b.

c = número de especies presentes en ambos sitios a y b.

El intervalo de valores para este índice va de 0 a 1. Cuando no hay especies compartidas entre ambos sitios se obtiene 0, mientras que cuando los dos sitios tienen la misma composición de especies se obtiene un valor de 1.

Índice del BMWP

El Índice BMWP-COL se aplica en los cinco puntos del muestreo para evaluar la calidad del agua en cada uno. A través de este índice, se asignan puntajes a las familias de macroinvertebrados presentes en los sitios muestreados. Sumando estos puntajes, se obtiene un valor que refleja el estado del agua en cada punto (Tabla 3). Este método permite identificar variaciones en la calidad del agua a lo largo de los diferentes lugares examinados (Roldan, 2016).

Tabla 3. Puntaje asignado a cada familia de macroinvertebrados acuáticos de acuerdo al índice BMWP/Col

Clases de calidad de agua, valores de BMWP-COL				
Clase	Calidad	BMWP-COL	Significado	Color
I	Buena	>150, 101-120	Aguas muy limpias	Blue
II	Aceptable	61-100	Aguas ligeramente contaminadas	Green
III	Dudosa	36-60	Aguas moderadamente contaminadas	Yellow
IV	Critica	16-35	Aguas muy contaminadas	Orange
V	Muy Critica	<15	Aguas fuertemente contaminadas	Red

Fuente: Roldán 2016

- **Recomendaciones**

Para la elaboración de las recomendaciones se tomó en cuenta la organización durante la fase de muestreo en cada punto. Al principio, se llevó a cabo una capacitación para determinar las fechas, los implementos necesarios y la disponibilidad que tenía cada estudiante dentro del grupo guardianes del Teusacá 2.0. Para ello, un día antes del muestreo, se organizó una reunión con los estudiantes en la que, además de realizar un calendario de disponibilidad, se les mostró la guía que se encuentra en el apartado de Anexos con el fin de que los estudiantes pudieran identificar a los macroinvertebrados acuáticos objetivo. Debido a que los alumnos involucrados poseían conocimientos previos sobre estos organismos al haber participado en el proyecto de los Guardianes del Teusacá 2.0 (2023), la capacitación fue breve.

Del mismo modo, se identificaron los sitios basándonos en el estudio previos y se estableció el uso de la metodología de recolección por encuentro casual, la cual se basa en recuperar a los macroinvertebrados, analizarlos con ayuda de un microscopio y liberarlos de nuevo a su entorno natural. A diferencia del proyecto base para este trabajo, el cual empleó la captura y eutanasia de los animales, el presente proyecto implementó esta metodología por encuentro casual, la cual procura mantener la integridad física de la fauna.

Durante el análisis de los muestreos, se aseguró tener preparadas las guías y los materiales adecuados para no afectar los macroinvertebrados acuáticos y llevar a cabo la identificación de manera eficaz. Esto permitió continuar con el seguimiento periódico y evaluar el estado de cada sitio de muestreo.

- **Consideraciones éticas**

La metodología empleada fue diseñada bajo estrictas consideraciones éticas, centradas en minimizar el impacto ambiental y en el respeto hacia la biota local. La captura, observación y liberación de macroinvertebrados se realizaron con el máximo cuidado para evitar daños a los especímenes, garantizando así la preservación de la biodiversidad en la subcuenca. Este enfoque no solo responde a un compromiso ético con la conservación y el estudio sostenible de los ecosistemas acuáticos, sino que se alinea con los principios de las prácticas sociales llevadas a cabo con el acueducto Progresar de La Calera y el colegio El Salitre.

- **ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados se presentan en tres secciones: 1) caracterización biológica, 2) evaluación del índice BMWP y datos fisicoquímicos y 3) Recomendaciones

- **Caracterización biológica**

En los 5 puntos de muestreo se recolectaron un total de 441 individuos, los cuales se agruparon en: 4 clases, 7 órdenes, 10 familias como se ilustra en la tabla 4. Los datos se encontraron distribuidos de la siguiente manera:

Punto 1: El Hato

Como se muestra en la figura 2, la familia más representativa registrada en el Hato fue Simuliidae con 46,51 %, seguida de Chironomidae con 27,90 % y las menos representativas Hidrobiosidae con 11,62%, Tipulidae y Glossiphonidae 4,65% y las familias Ceratopogonidae y Baetidae de 2,32% cada una. Se encontró un total de 43 individuos, 4 órdenes y 7 familias. Los resultados obtenidos muestran que Simuliidae fue el macroinvertebrado más prevalente en este punto. Su aparición se ha relacionado en aguas con alto porcentaje de oxígeno y, en general, poco contaminadas (Vitta et al., 2018).

Figura 2. Distribución de macroinvertebrados en “el Hato”

Punto 2: El Líbano

Como se observa en la figura 3, la familia más representativa registrada fue Chironomidae con 76,92 %, seguida de Simuliidae con 17,30 % y las menos representativas, las familias Ceratopogonidae y Baetidae y Haplotaxidae con 1,92% cada una. Se encontró un total de 52 individuos, 3 órdenes y 5 familias.

En comparación con los resultados obtenidos por los Guardianes del Teusacá (2023), durante su estudio también encontraron que, en el Líbano, los macroinvertebrados más prevalentes eran Chironomidae y Simuliidae. El hallazgo de estas dos familias, aunado al cálculo del índice BMWP, indican que la calidad del agua es altamente contaminada (Molineri et al., 2020)

Figura 3. Distribución de macroinvertebrados en “el Líbano”

Punto 3: Kourtnik

La familia más representativa registrada fue Chironomidae con 50 %, seguida de Simuliidae con 36,66 % y las menos representativas Baetidae y Planaridae con 5,83% y Ceratopogonidae con 1,66%. Se encontró un total de 120 individuos, 3 órdenes y 5 familias. Todo esto se observa en la figura 4.

Los resultados obtenidos son similares a lo que observaron los Guardianes del Teusacá (2023), quienes también reportaron que Simuliidae y Chironomidae fueron los macroinvertebrados más prevalentes en este punto. De manera interesante, aunque los Guardianes reportaron una alta aparición de Ceratopogonidae, en el presente trabajo su prevalencia fue significativamente menor. En conjunto, los datos indican un nivel de contaminación alta del agua.

Figura 4. Distribución de macroinvertebrados en “Kourtnik

Punto 4: Green Park

La familia más representativa registrada fue Chironomidae con 33,65%, Baetidae con 25,96%, seguida de Simuliidae con 25 % y las menos representativas Ceratopogonidae con 6,73% Tipulidae 4,80% y la familia Gyrinidae con 3,84% (ver figura 5). Se encontró un total de 104 individuos, 3 órdenes y 6 familias. En este caso, aunque no se encontraron antecedentes de contaminación o registro de macroinvertebrados, las especies encontradas sugieren que la calidad del agua era altamente contaminada.

Figura 5. Distribución de macroinvertebrados en “Green Park”

Punto 5: El Tubo

Como se muestra en la figura 6, la familia más representativa registrada fue Chironomidae con 59,37 %, seguida de Simuliidae con 20,31% y las menos representativas Baetidae con 11,71% y Ceratopogonidae 8,59%. Se encontró un total de 128 individuos, 2 órdenes y 4 familias.

Estos resultados son similares a lo obtenido por los Guardianes del Teusacá (2023), quienes encontraron que Chironomidae y Simuliidae fueron los macroinvertebrados más prevalentes en este punto. Es importante mencionar que también encontraron una alta

frecuencia de Hydroptilidae, los cuales se asocian con una menor tolerancia a los contaminantes del agua. En conjunto, los datos indican un alto nivel de contaminación en el agua.

Figura 6. Distribución de macroinvertebrados en “el Tubo”

A partir de los datos obtenidos, la recolección de especímenes se clasificó con base en sus familias. Como se observa en la tabla 4, y recapitulando los hallazgos encontrados por punto geográfico, se recolectaron 447 macroinvertebrados, los cuales se clasificaron en 4 clases, 7 órdenes y 10 familias. En la tabla se muestra que la clase más prevalente en los cinco puntos fue la Insecta, siendo Diptera la que presenta mayor número de taxones con 4 familias. Ya que estas se relacionan con un índice BMWP-Col de 2, sería un indicativo de que las aguas recolectadas muestran un nivel alto de contaminación.

Al comparar estos resultados contra los obtenidos por los guardianes del Teusacá en la cuenca alta-media del río (2023), se observa que la clase Insecta también fue la más prevalente durante los periodos de recolección. En ambos casos, la familia Chironomidae fue la que obtuvo el mayor número de especímenes. Es importante mencionar que esta familia se encuentra en aguas loticas y lenticas, en fango y con abundante materia orgánica en descomposición, indicando aguas mesoentróficas.

Tabla 4. Muestreo de macroinvertebrados por puntos

Macroinvertebrados			Periodo Marzo 2024				
Clase	Orden	Familia	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5
Insecta	Diptera	Chironomidae	12	40	60	35	76
		Simillidae	20	9	44	26	26
		Tipulidae	2	0	0	5	0
		Ceratopogonidae	1	1	2	7	11
	Ephemeroptera	Baetidae	1	1	7	27	15
	Coleoptera	Gyrinidae	0	0	0	4	0
	Trichoptera	Hydrobiosidae	5	0	0	0	0
Euhirudinea	Rhynchobdellida	Glossiphonidae	2	0	0	0	0
Turbellaria	Tricladida	Planariidae	0	0	7	0	0
Oligochaeta	Haplotaxida	Haplotaxidae	0	1	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

9.1.1. ABUNDANCIA

Como se observa en las figuras 7 y 8, los organismos colectados de las clases Euhirudine, Turbellaria y Oligochaeta fueron menores en relación con la Insecta en todos los puntos. Además, los datos categorizados por espécimen muestran que la clase Insecta es la que representa la mayor cantidad de macroinvertebrados presentes en el agua, siendo Chironomidae la familia más prevalente en todos los puntos. La diversidad de macroinvertebrados encontrada podría indicar la presencia de contaminantes específicos en el agua o un perfil específico del agua.

Figura 7. Abundancia de los macroinvertebrados colectados por punto de muestreo

Figura 8. Abundancia relativa de los macroinvertebrados colectados por punto de muestreo

Como conclusión, los resultados obtenidos muestran que las familias Simuliidae y Chironomidae fueron las más frecuentes a lo largo del estudio. De acuerdo con Sierpe y Sunico (2019), la familia Chironomidae es frecuentemente utilizada como indicadora de varios niveles tróficos de alta contaminación acuática. Por otro lado, en lo que refiere a la familia Simuliidae, esta se encuentra típicamente en aguas corrientes muy oxigenadas, debajo de rocas y troncos, siendo indicadores de aguas oligotróficas (Roldan, 1996). Pese a que su índice BMWP es de 8, indicando baja contaminación, el macroinvertebrado Simuliidae (moscas negras) tiene la capacidad de adaptarse a ambientes con cierto grado de contaminación orgánica, debido a sus hábitos alimenticios y estrategias de vida (Umaña et al., 2020). Al respecto, los trabajos demuestran que los Simuliidae son organismos filtradores que se alimentan de materia orgánica particulada en suspensión en el agua. Esta estrategia alimenticia les permite aprovechar los aportes de materia orgánica que suelen darse en ambientes con cierto grado de contaminación, lo que les confiere una mayor tolerancia a la contaminación orgánica en comparación con otros macroinvertebrados más sensibles (Umaña et al., 2020). En este sentido, varios estudios han reportado la presencia y abundancia de Simuliidae en ríos y quebradas con moderada a alta contaminación orgánica. Por ejemplo, en la quebrada La Chaparrala, los Simuliidae se encontraron en abundancia junto a otros organismos tolerantes como Chironomidae, indicando condiciones de

contaminación moderada a alta (Montoya y Escobar, 2019). Lo anterior explica el porqué de la aparición de Diptera en el río Teusacá y, a la par, deja ver que es necesario realizar adecuaciones a la guía de Roldán, la cual no contempla las posibles adaptaciones de los diversos macroinvertebrados.

Asimismo, es importante considerar que la temporada puede influir significativamente en la recolección de macroinvertebrados, ya que los organismos varían su distribución y abundancia según las condiciones ambientales que prevalecen en cada época del año. Como ejemplo, se sabe que, en áreas con estaciones secas, la abundancia disminuye debido a la disminución de la disponibilidad de alimentos y la reducción de la calidad del agua. Por otro lado, en áreas con estaciones húmedas, la abundancia aumenta gracias a la mayor disponibilidad de alimentos y la mejora de la calidad del agua (Motta-Díaz y Vimos-Lojano, 2020).

9.1.2. RIQUEZA

Cuando se analiza la riqueza de macroinvertebrados usando el índice de Margalef por punto (figura 9), los datos obtenidos muestran una mayor cantidad de organismos colectados en el Punto 1 (P1), seguido de los puntos 2 (P2), 3 (P3), 4 (P4) y 5 (P5). Con lo anterior es posible concluir que, dependiendo de la altura del punto de recolección, se encuentra una cantidad mayor o menor de especímenes de macroinvertebrados. Esto a su vez se relaciona con lo hallado en el trabajo de los guardianes del Teusacá (2023) y el trabajo realizado por López-Mendoza (2019), quienes demostraron que la altitud de los puntos de recolección y sus consecuentes niveles de contaminación influyen en la riqueza de los macroinvertebrados colectados.

Figura 9. Riqueza de macroinvertebrados por punto de muestreo.

Cuando se analiza cada familia por punto geográfico (Tabla 5), nuevamente los datos evidencian que Chironomidae, Simuliidae, Ceratopogonidae y Baetidae, pertenecientes a la clase Insecta, son las familias que mayoritariamente se recolectan en todos los puntos, sin importar la época en la que se haga el muestreo.

Tabla 5. Especificación de las familias presentes en cada punto

Macroinvertebrados					
	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5

Riqueza	6	5	5	4	4
	<i>Chironomidae</i>	<i>Chironomidae</i>	<i>Chironomidae</i>	<i>Chironomidae</i>	<i>Chironomidae</i>
	<i>Simillidae</i>	<i>Simullidae</i>	<i>Simillidae</i>	<i>Simillidae</i>	<i>Simillidae</i>
	<i>Ceratopogonidae</i>	<i>Ceratopogonidae</i>	<i>Ceratopogonidae</i>	<i>Ceratopogonidae</i>	<i>Ceratopogonidae</i>
	<i>Baetidae</i>	<i>Baetidae</i>	<i>Baetidae</i>	<i>Baetidae</i>	<i>Baetidae</i>
	<i>Hydrobiosidae</i>	<i>Haplotaxidae</i>	<i>Planariidae</i>		
	<i>Glossiphonidae</i>				

Fuente: Elaboración propia

Para comparar la riqueza a lo largo de los diferentes puntos, se calcularon el índice de riqueza de Margalef, el índice de dominancia (Simpson) y el índice de Shannon.

Como se muestra en la tabla 6, a pesar de la alta cantidad de organismos recuperados, todos los puntos mostraron una diversidad relativamente baja, siendo el Hato el punto geográfico que mostró poseer una mayor cantidad de familias. En lo que refiere al índice de Dominancia de Simpson, este muestra que Green Park tiene mayor riqueza en relación con los otros puntos geográficos, lo que indica una variabilidad de especies entre las ubicaciones comparadas Finalmente, los resultados mostrados por el índice de Shannon muestran que la riqueza en todos los puntos es baja, siendo el Hato y Green Park los que muestran una mayor diversidad en los organismos encontrados.

Pese a que los resultados mostrados en la tabla 6 difieren ligeramente, parece que el índice de Shannon es mucho más sensible al nivel de riqueza de las muestras recolectadas en este estudio, demostrando que el punto el Hato y Green Park son los sitios con mayor riqueza de invertebrados.

Tabla 6. Índices ecológicos aplicados a los macroinvertebrados acuáticos colectados por encuentro casual en 5 puntos del muestreo del río Teusacá

	Índice de riqueza de Margalef	Índice de Dominancia (Simpson)	Índice de Shannon
Punto 1 Hato	1,59	0,68	0.056
Punto 2 Libano	1,01	0,37	0.014
Punto 3 Kurtnik	0,83	0,60	0,042
Punto 4 Green Park	1,07	0,74	0.056

Punto 5 El Tubo	0,61	0,58	0.02
------------------------	------	------	------

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para evaluar la similitud de riqueza entre los diferentes puntos geográficos, se calculó el índice de similitud de Jaccard, el cual mide el grado de similitud entre dos conjuntos. Los resultados obtenidos y descritos en la siguiente matriz (Tabla 7) muestran, de manera muy similar a lo obtenido en la caracterización biológica, que la similitud entre los puntos es alta.

Tabla 7. Índices de similitud de Jaccard aplicado a la comparación de cada punto

Índice de similitud de Jaccard	Punto 1 Hato	Punto 2 Libano	Punto 3 Kurtnik	Punto 4 Green Park	Punto 5 El Tubo
Punto 1 Hato		0,5	0,5	0,44	0,57
Punto 2 Libano	0,5		0,66	0,57	0,8
Punto 3 Kurtnik	0,5	0,66		0,57	0,8
Punto 4 Green Park	0,44	0,57	0,57		0,66
Punto 5 El Tubo	0,57	0,8	0,8	0,66	

- **Evaluación del índice BMWP y datos fisicoquímicos**

9.2.1. Índice BMWP-COL

El índice BMWP-COL, presentado en la tabla 8, muestra los resultados de cada punto de muestreo evaluando el puntaje asignado a cada familia encontrada. Al sumar estos valores, se concluye que, en los cinco puntos analizados, la calidad del agua se clasifica como altamente contaminada.

Cuando se comparan estos resultados contra los obtenidos por los Guardines del Teusacá (2023), se observa que los resultados obtenidos son similares con relación a trabajos previos que se describen a continuación. Así pues, tanto Zabala et al. (2021) como los Guardianes del Teusacá (2023), las investigaciones realizadas en el río encontraron que la calidad de las aguas de la cuenca alta-media iba de dudosa o moderadamente contaminada. Al respecto, el presente trabajo muestra que la variabilidad de las especies recolectadas indica aguas altamente contaminadas, por lo que habría que determinar

posteriormente si estos niveles de contaminación se deben a la región en la que se hizo el muestreo, a la temporada en la que se realizó la recolección o si hay algún factor asociado a la actividad humana que haya generado este decaimiento en la calidad del agua.

Tabla 8. Identificación de BMWP-COL por cada punto

Macroinvertebrados				Periodo marzo 2024				
Clase	Orden	Familia	BMWP-COL	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5
Insecta	Diptera	<i>Chironomidae</i>	2	12	40	60	35	76
		<i>Simillidae</i>	8	20	9	44	26	26
		<i>Ceratopogonidae</i>	3	1	1	2	7	11
		<i>Tipulidae</i>	3	2	0	0	5	0
	Ephemeroptera	<i>Baetidae</i>	7	1	1	7	27	15
	Trichoptera	<i>Hydrobiosidae</i>	9	5	0	0	0	0
	Coleoptera	<i>Gyrinidae</i>	9	0	0	0	4	0
	Euhirudinea	<i>Rhyncho bdellida</i>	<i>Glossiphonidae</i>	3	2	0	0	0
	Turbellaria	Tricladida	<i>Planariidae</i>	7	0	0	7	0
	Oligochaeta	<i>Haplotaxida</i>	<i>Haplotaxidae</i>	1	0	1	0	0
		BMWP-COL	Altamente Contaminada	35	21	27	32	27

Fuente: Elaboración propia

9.2.2 Datos fisicoquímicos

El análisis de los macroinvertebrados acuáticos se complementó con la toma de datos de parámetros fisicoquímicos en cada uno de los puntos de muestreo como se observa en la tabla 9.

En el caso de la temperatura del agua, se observó que El Tubo presentó la temperatura promedio más alta con 15,4°C, seguido de El Líbano con 14,8°C y Kurnik con 14°C, mientras que Green Park registró la temperatura más baja con 13°C y El Hato con 12,4°C.

Respecto al pH del agua, Green Park mostró el valor más alto con 7,58, seguido por Kurnik con 7,40, siendo más alcalino, y los valores más bajos fueron registrados en El Tubo con 6,90, El Hato con 6,58 y El Líbano con 6,45, siendo más ácidos.

En cuanto a la conductividad del agua, se encontró que El Tubo tuvo la mayor conductividad con 28 mmS, seguido por Green Park con 25 mmS y El Líbano con 24 mmS, mientras que Kurnik y El Hato presentaron menor conductividad con 22 mmS y 20 mmS, respectivamente.

Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos por punto geográfico

	El Hato	Líbano	Kurnik	Green Park	El Tubo
pH	6,58	6,45	7,40	7,58	6,90

T°	12,4°	14,8°	14°	13°	15,4°
Conductividad (mmS)	20	24	22	25	28

Cuando se comparan estos resultados con trabajos previos (López Mendoza, 2019), los resultados de esta investigación muestran que las estaciones o puntos geográficos con mayor elevación exhiben una tendencia a tener valores más bajos con respecto a las estaciones con menor elevación. Esto puede ser explicado por el hecho de que el río Teusacá nace en zona de páramo, donde los suelos son ácidos, sin embargo, a medida que el río desciende altitudinalmente el pH se va neutralizando. En este sentido, el pH obtenido en los diferentes puntos puede ser catalogado como aceptable.

En lo que refiere a la temperatura, este es un elemento importante en la cualificación de la calidad del agua ya que determina la tendencia de sus propiedades físicas y la riqueza y distribución de las familias de macroinvertebrados. De manera particular, se observa que la temperatura varía dependiendo de la altitud del punto elegido, lo que podría influir de manera significativa en la abundancia y riqueza de los organismos colectados.

Finalmente, en lo que refiere a la conductividad del agua, los resultados arrojan valores parecidos a los obtenidos en el trabajo reportado por los Guardianes del Teusacá (2023), quienes mostraron que la conductividad era aceptable.

- **Recomendaciones para fortalecer el muestreo de macroinvertebrados**

El enfoque de la ciencia participativa durante la recolección de macroinvertebrados resulta una herramienta útil para la evaluación de la calidad del agua pues facilita la recolección de organismos y su posterior análisis. A continuación, y con el objetivo de proponer adecuaciones al abordaje desde el enfoque de ciencia participativa, se muestra una tabla de las recomendaciones para fortalecer la investigación:

Tabla 10. Recomendaciones para fortalecer la investigación

Aspecto a fortalecer	Recomendación	Imagen
Estrategia de colecta por encuentro casual.	Como se mencionó en el marco referencial, esta técnica implica que, con ayuda de una red d-net, los participantes recuperan a los organismos del entorno con el máximo cuidado, procurando no lastimar a los macroinvertebrados para	

	regresarlos a su hábitat (Gómez, 2023). A pesar de ello, si no se cuenta con la experiencia o conocimiento necesarios, existe la posibilidad de que el muestreo no sea exitoso. (Gómez, 2023) En este sentido, se recomiendan dos medidas: por un lado, es preciso instruir a los participantes, expertos y público en general, en el correcto uso de la técnica para evitar tener efectos negativos sobre la fauna del punto de muestreo; por otro lado, es importante repetir el procedimiento de recolección por encuentro casual y extenderlo por unos minutos más, frotando y haciendo el barrido.	
Muestreo	Contar con una guía a la mano que sea concreta y comprensible para el público en general para identificar a los organismos con facilidad (López-Mendoza et al., 2019). En lo que refiere al presente trabajo, durante los muestreos se encontraron mayormente Chironomidae o mosquitos “no picadores”. Esto facilitó la identificación ya que estos macroinvertebrados son evidentes simple vista. Sin embargo, con el fin de analizar mejor cada Chironomidae y fortalecer la validez y confiabilidad del muestreo, se requiere la presencia de estas guías para llegar a la especie o al género de manera específica.	
Bioseguridad	Al ser una investigación relacionada con la cualificación de la calidad del agua, se hace evidente que el entorno al que se exponen los participantes involucra inmersión a aguas repletas de vertimientos y contenido orgánico. En este sentido, resulta importante mejorar el equipo y las recomendaciones con las que se ingresa a los puntos de recolección para procurar tanto el bienestar de la fauna local, como el de las personas que realizan el muestreo (Lara-Villegas et al., 2008).	
Interés por el muestreo y enfoque de	Finalmente, los chicos del salitre demuestran amor y pasión a la ciencia, realizando los muestreos en las diferentes	

ciencia participativa	zonas piedra corriente, rápida, lenta y musgo. A manera de recomendación propia, sugiero no perder esa motivación de seguir participando en la ciencia e incentivar a los más jóvenes a involucrarse en el monitoreo de los macroinvertebrados con el fin de analizar el estado del agua. Asimismo, se sugiere continuar con el enfoque de ciencia participativa para el abordaje de este tipo de estudios y así seguir enriqueciendo la base de datos de información relevante sobre el estado del agua.	
Integración de datos al SiB Colombia	La integración del estudio sobre macroinvertebrados del río Teusacá con el Sistema de Información sobre Biodiversidad (SiB) de Colombia representa una oportunidad valiosa para fortalecer los resultados y el impacto de esta investigación. En primer lugar, el registro de los datos de composición y abundancia de las comunidades de macroinvertebrados encontradas en el río Teusacá en el SiB Colombia permitirá que esta información esté disponible en una plataforma nacional, facilitando su acceso y uso por parte de investigadores, gestores ambientales y el público en general. Esto contribuye a la generación de conocimiento sobre la biodiversidad y calidad de los ecosistemas acuáticos a nivel nacional. Además, la utilización de los protocolos estandarizados por el SiB Colombia para la recolección, identificación y análisis de macroinvertebrados acuáticos asegurará que los datos generados en el estudio del río Teusacá sean comparables con otros estudios a nivel nacional, fortaleciendo el valor y la confiabilidad de la información. Por otro lado, la capacitación del equipo de investigación en el uso de herramientas y recursos del SiB Colombia, como las guías de identificación y los sistemas de clasificación taxonómica, mejorará la calidad y confiabilidad de la identificación	

	de los macroinvertebrados, lo que a su vez fortalecerá los resultados sobre la calidad del agua del río Teusacá. Finalmente, la publicación de los resultados del estudio sobre macroinvertebrados en el SiB Colombia permitirá que esta información sea consultada y utilizada por otros investigadores y gestores ambientales, contribuyendo a una mejor gestión y conservación de los recursos hídricos a nivel regional y nacional.	
--	---	--

Fuente: Elaboración propia

• CONCLUSIONES

Con base en los resultados encontrados, se concluye que el uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua comprende una estrategia eficiente para realizar el monitoreo de la calidad del agua en los diferentes puntos. Asimismo, se encuentra que la recolección de estos organismos desde un enfoque de ciencia participativa fortalece el muestreo y esto puede ser aplicado tanto a las distintas regiones del río Teusacá, como a otros recursos hídricos de interés.

Es importante mencionar que el tipo y la cantidad de organismos colectados dependen de diversos factores, entre los que se pueden mencionar la altura del punto de recolección, sus niveles de contaminación, la temperatura, el clima, el tipo de muestreo y el expertis de los recolectores.

Como elemento innovador, la presente tesis muestra que la recolección por encuentro casual es tan eficiente como otras estrategias de recolección para observar macroinvertebrados, permitiendo la conservación de la fauna. Por otro lado, también propone recomendaciones que fortalezcan el muestreo, entre las que se incluyen mejorar las técnicas de recolección e instruyendo a los alumnos participantes en el correcto manejo y cuidado de estos organismos. Asimismo, se hace énfasis en mejorar los temas de bioseguridad.

• **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia por su constante apoyo y creencia en mí en cada paso que doy. En particular, a mi madre, Johanna Naranjo, quien ha estado a mi lado en todos los momentos difíciles, infundiéndome valor y amor con sus palabras, siendo mi motor y mi fuerza diaria para superarme. A mi abuelo Lucho, por siempre creer en mí y apoyarme en mi proceso académico, siendo como un segundo padre durante toda mi vida. A mi padre, por su apoyo y por darme la libertad de elegir mi camino. Y a mi hermano Christopher, por ser siempre mi adoración y motivarme todos los días a sacar adelante este hermoso proyecto. Mi familia es la base fundamental en mi vida, y me siento feliz de tenerlos orgullosos. Espero seguir logrando mucho más y poder darles todo lo que se merecen.

Agradezco también a mi tutora, Angela Mocaleano, por creer en mí y en mi proyecto, por brindarme su apoyo y guiarme hacia el éxito, por tener paciencia conmigo y hablarme con amor. A mi director de carrera, Sebastián Restrepo, quien me guió y aconsejó en momentos difíciles durante la realización de mi proyecto de grado. También agradezco a mi carrera en su totalidad, por proporcionarme los conocimientos necesarios para poder culminar esta maravillosa carrera que llevo en mi corazón.

Quiero reconocer a la empresa Progresar por permitirme ser parte del proyecto "La Gran Cuenca" y por permitirme conocer a profundidad este proyecto tan significativo. A Lina,

por su constante apoyo y por abrirme las puertas para realizar mi proyecto de grado. Puedo sentir y comprender el gran amor que ella tiene por este proyecto, y espero sinceramente seguir siendo parte de él.

También quiero agradecer al Colegio El Salitre, en especial a los chicos guardianes del Teusacá, por estar conmigo en este proceso tan especial. Agradezco por mostrarme el amor y la pasión que tienen por este proyecto, y a la profesora Mayerly por confiar en mí para trabajar con los chicos y por brindarme el apoyo necesario para llevar a cabo mi trabajo de grado. Y en general a los demás colegios donde pude ser participe. Son personas increíbles, y estoy agradecido por ser parte de este hermoso proceso.

• LISTA DE REFERENCIAS

- Alanya Sánchez, C., & Carrera Salas, V. D. (2023). Identificación de macroinvertebrados bentónicos y su relación con la calidad del agua de la zona urbana de la subcuenca del río Ichu, Huancavelica–2023.
- Alba, L. E., & Moreno Landero, E. F. (2024). *Análisis Multitemporal Del Cuerpo De Agua Del Embalse Tominé, En El Departamento De Cundinamarca, Para El Período 1977–2023* [Trabajo de grado]. Universidad Antonio Nariño
- Alcaldía de Sopó (2020) *Diagnóstico del Plan de Desarrollo Municipal de Sopó*. Obtenido de: <https://www.sopo-cundinamarca.gov.co/documentos/56/plan-dedesarrollo/>
- Alloway, B. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. In B. Alloway, *Environmental Pollution - Third Edition* (pp. 215-217). Amsterdam: Springer Netherlands.
- Alonso, A. (2006). Valoración del efecto de la degradación ambiental sobre los macroinvertebrados bentónicos en la cabecera del río Henares. *Ecosistemas*, 15(2), 101–105.
- Andrade Flórez, E. (2019). *ACTUALIZACION DEL PERFIL AMBIENTAL DEL MUNICIPIO DE LA CALERA, CUNDINAMARCA* [UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS].
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/21459/2020jenyferandrade.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Angulo, A., J. V. Rueda-Almonacid, J. V. Rodríguez- Mahecha y E. La Marca. (2006). Técnicas de inventario y monitoreo para los anfibios de la región tropical andina. Conservación Internacional-Colombia, Series Manuales de Campo No. 2, Panamericana Formas e Impresos S. A., Bogotá D.C. 298 pp.
- Arévalo, S., & Vanessa, S. (2023). *Aplicación de tecnología móvil en el monitoreo biológico de calidad de agua: ciencia participativa en la Comunidad Campesina*

- Cordillera Blanca* [Universidad Nacional Agraria La Molina].
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5902>
- Baggio, J., & Calderón-Contreras, R. (2017). Socioecosistemas y resiliencia. fundamentos para un marco analítico. *Los Sistemas Socioecológicos y Su Resiliencia. Casos de Estudio*, 23–38.
- Bernal, C. A. (2014). *Metodología para la estimación de cargas contaminantes difusas en zonas agrícolas de alta montaña con posibilidad de modelación*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Buitrago Cadena, L. T. (2024). *Propuesta de proyecto de inversión para el diseño de la red de alcantarillado sanitario del barrio Los mangos en el municipio de Cúcuta, Norte de Santander, bajo la metodología de marco lógico* [Tabajo de máster]. Universidad Santo Tomás, Bucaramanga.
- Bullón, V. (2016). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad de agua en la cuenca del río Perene, Chanchamayo. In *Universidad Nacional Del Centro Del Centro De Posgrado*. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3462>
- Caleño Ortiz, L. N., & Toro Figueredo, W. Y. (2018). Evaluación de la huella hídrica del río Teusacá, subcuenca de la cuenca alta del río Bogotá [Tesis de grado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de:
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/15233/Cale;jsessionid=35BBC2A436FB039CE0E6FD77168035F1?sequence=1>
- CAR. (2006). *PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO BOGOTÁ*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>
- CAR. (2018). Río Bogotá. In *Vive el Río Bogotá*. https://www.car.gov.co/rio_bogota
- Caro Riveros, K. M. (2022). *Análisis y Evaluación de la calidad del agua en la cuenca del Río Teusacá municipio de Sopó* [Trabaja de grado]. Universidad Antonio Nariño.
- Carrasco, C., Rayme, C., Del Pilar Alarcón, R., Ayala, Y., Arana, J., & Aponte, H. (2020). Macroinvertebrados acuáticos en arroyos asociados con bofedales altoandinos, Ayacucho Perú. *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol)*, 68, 116–131.
- Carrero, J. (2020). *Estudio preliminar de la deriva de macroinvertebrados acuáticos y el transporte de materia orgánica particulada gruesa en la cabecera de un río altoandino del municipio de Rondón, Boyacá* [Tesis]. Universidad de La Salle.
<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1096&context=biologia>
- Carrillo
- Carrero, L. (2012). *Reconstrucción histórica e interpretación de los procesos de transformación en el uso y manejo del paisaje en la cuenca alta del río Teusacá, Bogotá, Cundinamarca. Últimos cuarenta años (1970-Presente)* [Trabajo de grado]. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/12459>
- Arroyo, S. J., Gómez Piracoca, X. P., & Montes Carvajal, O. F. (2020). *Modelación hidrológica de la subcuenca del río Teusacá, para determinar las posibles causas en*

- la disminución del caudal captado por el acueducto ACUALCOS ESP* [Trabajo de grado]. Universidad Piloto de Colombia.
- Castro, E., Lugo-Vargas, L., Acosta, A. G., & Tenjo-Morales, I. A. (2018). Aplicación del índice biótico de familias de macroinvertebrados para la caracterización del agua del Río Teusacá, afluente del Río Bogotá. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 587–597. <https://doi.org/10.31910/RUDCA.V21.N2.2018.1004>
- Challenger, A., Bocco, G., Equihua, M., Lazos Chavero, E., & Maass, M. (2014). La aplicación del concepto del sistema socioecológico: Alcances, posibilidades y limitaciones en la gestión ambiental de México. *Investigación Ambiental: Ciencia y Política Pública*, 6(2), 1–21.
- Chanatasig Chicaiza, A. Y., & Parra Toro, M. F. (2024). *Determinación de la calidad de agua por bioindicadores macroinvertebrados en el Río Quindigua, parroquia Guasaganda, cantón La Maná* [Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <http://localhost/handle/27000/11829>
- Consorcio Planeación Ecológico-Ecoforest (2006). Elaboración del Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Teusacá.
- Correa, I. (2000). *Desarrollo de un Índice Biótico para evaluar la calidad ecológica del agua en los ríos de la cuenca alta del Río Chama, utilizando Macroinvertebrados Bénticos*. June, 61.
- Dalu, T., Wasserman, R. J., Tonkin, J. D., Mwedzi, T., Magoro, M. L., & Weyl, O. L. (2017). Water or sediment? Partitioning the role of water column and sediment chemistry as drivers of macroinvertebrate communities in an austral South African stream. *Science of the total environment*, 607, 317-325.
- Diez Hernández, J. M., & Ruiz Cobo, D. H. (2008). Determinación De Caudales Ambientales Confiabiles En Colombia: El Ejemplo Del Río Palacé (Cauca). *Gestión y Ambiente*, 10(1), 153–166. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/1387/2000>
- Encalada, A. C., Río-Touma, B., García, N., & Narcís, P. (2011). *Protocolo simplificado y guia de evaluación de la calidad ecológica de ríos andinos* (Issue september 2016). http://www.ub.edu/riosandes/docs/CERA-S_finalLR.pdf
- Espinoza Freire, E. E. (2020). Reflexiones sobre las estrategias de investigación acción participativa. *Conrado*, 16(76), 342-349.
- Forero, J. A. M. (2022). Turismo comunitario, desarrollo rural y socio ecología: Estudio de caso Asoproam–Bogotá, Colombia. *Ateliê Geográfico*, 16(2), 66-85.
- Gesimba, L. (2020). *A Critical Analysis of the Cooperative Frameworks on Shared Natural Resources in East Africa Community: a Case Study of Lake Victoria* [Tesis doctoral]. University of Nairobi.
- Gómez, I. N. (2023). *DIVERSIDAD y COMERCIALIZACIÓN DE LA CLASE: SUBCLASE ECHINOIDEA EN TRES ECOSISTEMAS DE LA ZONA COSTERA DEL*

MUNICIPIO DE KUSAPÍN, EN LA COMARCA NGÄBE BUGLÉ.

<http://portal.amelica.org/ameli/journal/228/2283848002/html/>

- Guadarrama-Tejas, R., Kido Miranda, J., Roldan Antunez, G., Salas Salgado, M., Mata-García, M., & Vázquez-Briones, M. D. C. (2016). Contaminación del agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(5), 1-10.
- Gualdrón Durán, L. E. (2018). Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros físicoquímicos y biológicos. *Dinamica Ambiental*, 1, 83–102.
<https://doi.org/10.18041/2590-6704/ambiental.1.2016.4593>
- Guardianes del Teusacá 2.0. (2023). Evaluación de la calidad del agua de la cuenca alta y media del río Teusacá con macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores [Informe de proyectos de investigación Ondas Categoría Juvenil]. Unicervantes Ondas Cundinamarca.
- Gutierrez, I., Becerra, P., Gutierrez, I., & Becerra, P. (2018). Composición, diversidad y estructura de la vegetación de bosques ribereños en el centro sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 239–253. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200239>
- Herrera Martínez, E. (2020). Revision bibliografica sobre estudios de sedimentos en el río Bogotá [Trabajo de grado]. Universidad Militar Nueva Granada.
- Jacques-Aviñó, C., Pons-Vigués, M., Mcghie, J. E., Rodríguez-Giralt, I., Medina-Perucha, L., Mahtani-Chugani, V., Pujol-Ribera, E., & Ossó, A. B. (2020). Participación pública en los proyectos de investigación: formas de crear conocimiento colectivo en salud. *Gaceta Sanitaria*, 34(2), 200-203.
<https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2019.08.010>
- Janet Gil, M., María Soto, A., Iván Usma, J., & Darío Gutiérrez, O. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 7(2), 52–73. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
- Kutschker, A., Brand, C., & Miserendino, M. L. (2008). Evaluación de la calidad de los bosques de ribera en ríos del NO del Chubut sometidos a distintos usos de la tierra. *Scielo*, 4(6), 1–6.
<http://www.scielo.org.ar/img/revistas/ecoaus/v19n1/html/v19n1a02.htm>
- La Calera. (2008). *Plan de Desarrollo Municipal La Calera 2008-2011*.
<https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/14416/14469-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Landázury, R. C., & Sánchez, A. M. G. (2017). De la degradación hídrica y las innovaciones institucionales, a la sociedad civil ambientalizada: un análisis de la problemática de la calidad del agua en la cuenca alta del río Cauca, Colombia. *Luna Azul*, (45), 71-106
- Lara-Villegas, H. H., Ayala-Núñez, N. V., & Rodríguez-Padilla, C. (2008). Bioseguridad en el laboratorio: medidas importantes para el trabajo seguro. *Bioquímica*, 33(2), 59-70.
- López Mendoza, S., Huertas Pineda, D., Jaramillo Londoño, Á. M., Calderón Rivera, D. S., & Díaz Arévalo, J. L. (2019). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de

- calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia). *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 269-288.
- Magurran, A. E. (2004). Measuring biological diversity. *Measuring biological diversity*. Oxford: Blackwell Science.
- Marcela, C., Sánchez, A., Doris, V., & Salas, C. (2023). *Identificación de macroinvertebrados bentónicos y su relación con la calidad del agua de la zona urbana de la subcuenca del río Ichu, Huancavelica*.
<https://repositorio.unh.edu.pe/handle/unh/6250>
- Marino, M. (2023). *Participación pública en programas científicos: Ciencia ciudadana para la biodiversidad*. International Science Council.
<https://council.science/es/current/blog/public-participation-in-scientific-programmes-citizen-science-for-biodiversity/>
- Martínez, C. L. (2008). *Servicios ecosistémicos que provee el páramo de la cuenca alta del río Teusacá: Percepción de los actores campesinos y su relación con los planes ambientales en la vereda Verjón Alto*. Bogotá DC: Pontificia universidad javeriana, facultad de estudios ambientales y rurales.
- Molina, C. I., Gibon, F.-M., Pinto, J., & Rosales, C. (2008). Estructura de macroinvertebrados acuáticos en un río altoandino de la Cordillera Real, Bolivia: variación anual y longitudinal en relación a factores ambientales. *Ecología Aplicada*, 7(1–2), 105–116. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162008000100013&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Molineri, C., Tejerina, E. G., Torrejón, S. E., Pero, E. J., & Hankel, G. E. (2020). Indicative value of different taxonomic levels of Chironomidae for assessing the water quality. *Ecological Indicators*, 108, 105703.
- Montero Gonzalez, P. & Torres Verano, J. A. (2016). *Corredor ecológico del embalse de san rafael para la configuración del paisaje ecosistémico* (Issue Embalse San Rafael) [Universidad La Gran Colombia].
https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5065/Corredor_ecológico_embalse_SanRafael.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Montoya Moreno, Y., & Escobar Gutiérrez, A. F. (2019). Los macroinvertebrados acuáticos y la calidad biológica del agua en una quebrada andina, Antioquia-Colombia. *Revista Politécnica*, 15(29), 65–81.
<https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n29a6>
- Motta-Díaz, A. J., & Vimos-Lojano, D. J. (2020). Influencia de la variación temporal de los parámetros hidráulicos en la estructura y la función de la comunidad de macroinvertebrados en un río andino. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 606–621.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.1023>
- Muñoz Real, S. L., & Beltrán Carvajal, D. C. (2010). *Perfil ambiental de la subcuenca del río Teusacá de la cuenca alta del Río Bogotá*. Universidad de La Salle.

- Murillo-Montoya, S. A., Mendoza-Mora, A., Restrepo-Bastidas, E. S., & Rodríguez, M. Á. (2018). Utilization of aquatic macroinvertebrates as a tool to determine water quality in Santo Tomás ravine, Pensilvania municipality (Colombia). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(164), 212–220. <https://doi.org/10.18257/RACCEFYN.655>
- Núñez, J. C., & Fragoso-Castilla, P. J. (2019). Uso de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de contaminación del agua de la ciénaga Mata de Palma (Colombia). *Información tecnológica*, 30(5), 319-330.
- Obando, J., Mora, E., Lievano, L., Hernandez, M., & Cardenas, D. (2019). La calidad del agua y su impacto social. *Espacios*, 40(43), 13.
- Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, 325(3), 419–423. <https://doi.org/10.1016/j.ophtla.2011.11.037>
- PAREDES MORATO, Y., GARCES, P. A., & VILLA, L. M. (2010). *INFORME DE SEGUIMIENTO DE CARACTERIZACION DE 16 RIOS NAVEGABLES Y LA ACTIVIDAD PORTUARIA*. www.supertransporte.gov.co
- Pérez, Johan Hernán, Martínez-Romero, Liceth Carollay, Castellanos-Guerrero, Lizeth Tatinana, Mora-Parada, Angela Rocio, & Rocha-Gil, Zulma Edelmira. (2020). Macroinvertebrados bioindicadores de calidad de agua en sistemas hídricos artificiales del Departamento de Boyacá, Colombia. *Producción + Limpia*, 15(1), 35-48. Epub November 18, 2020. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a3>
- Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia*, 31(8), 583-590. Recuperado en 11 de mayo de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-184420060008000008&lng=es&tlng=es.
- Rincón-Bello, M. T., Soler-Romero, F. Y., Calderón-Rivera, D. S., Sierra-Parada, R. J., & Jaramillo-Londoño, Á. M. (2021). Macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de calidad de agua en el río Chicú, Cundinamarca, Colombia. *Hidrobiológica*, 31(1), 17-29.
- Ríos Torres, Y. T. (2023). *Formulación del programa de uso eficiente y ahorro del agua (PUEAA) para un Acueducto Comunitario del Sistema Chingaza* [Trabajo de grado]. Universidad Libre
- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 254-274.
- Romero, L. T. O. (2015). Determinación de metales pesados e índices de calidad en aguas y sedimentos del río Magdalena–tramo Tolima, Colombia. *Tumbaga*, 2(10), 5.
- Sánchez Herrera, M. J., (2005). El índice biológico BMWP (Biological Monitoring Working Party score), modificado y adaptado al cauce principal del río pamplonita norte de Santander. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 3(2), 54-67.
- Sánchez-Jardón, L., Uribe-Paredes, R., Álvarez-Saravia, D., Aldea, C., Raimilla, V., Velázquez, E., ... & Águila, J. (2022). Gestión regional de la información en

- biodiversidad: fomentando la ciencia participativa en el sur de Chile. *Ecosistemas*, 31(3), 2385-2385.
- Secretaría de planeación de Bogotá. (2022). La Calera en el cumplimiento de ODS.
- Sierpe, C., & Sunico, A. (2019). Familia Chironomidae (Orden Díptera) utilizada como bioindicador para la determinación de calidad ambiental de la cuenca del Río Gallegos (Santa Cruz, Argentina). *Informes Científicos Técnicos-UNPA*, 11(2), 92-105.
- Sierra Ramírez, C. A. (2011). Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico. In *Nuevos sistemas de comunicación e información*. Sello Editorial de la Universidad de Medellín. <https://repository.udem.edu.co/handle/11407/2568>
- Sirvent, M. T., & Rigal, L. (2014). La investigación acción participativa como un modo de hacer ciencia de lo social. *Revista Decisión*, 38, 32-37.
- Solano Guzmán, C. J. (2018). Evaluación de impactos en servicios ecosistémicos de abastecimiento y regulación hídrica, por medio de la implementación del modelo SWAT: caso de estudio: Cuenca del Río Teusacá [Tesis de maestría]. Universidad de los Andes
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, 64, 9–18.
- Taylor, M. P., Isley, C. F., Fry, K. L., Liu, X., Gillings, M. M., Rouillon, M., Soltani, N. S., Gore, D. B., & Filippelli, G. M. (2021). A citizen science approach to identifying trace metal contamination risks in urban gardens. *Environment international*, 155, 106582. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106582>
- Umaña Villalobos, G., Springer, M., & Picado Barboza, J. (2020). Variación estacional y características fisicoquímicas e hidrológicas que influyen en los macroinvertebrados acuáticos, en un río tropical. *Revista de Biología Tropical*, 68, 54-67.
- UNESCO. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. In *Unesco*. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es>
- Urquiza Gómez, A., & Cadenas, H. (2015). Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica. <http://Journals.Openedition.Org/Orda>, 218. <https://doi.org/10.4000/ORDA.1774>
- Valdéz M., Carlos Gerardo, Guzmán L., Marco Antonio, Valdés G., Arcadio, Forougbakhch P., Rahim, Alvarado V., Marco Antonio, & Rocha E., Alejandra. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1674-1682. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32135>
- Vannote. (2007). 1. El Concepto del Continuo del Río (CCR). *CCR*, 4(3), Imagen 1. https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-1-El-Concepto-del-Continuo-del-Rio-CCR-redisenado-a-partir-de-Vannote-et_fig1_317551626
- Vásquez Bernal, J. A., Posada Arrubla, A., Salazar Alonso, M. C., Emilia Guerrero, D., Zambrano, W. R., Lamprea Delgado, Á., & Sandoval Torres, J. (2008). Diseño de un corredor turístico entre los municipios de La Calera y Sopó, Cundinamarca, Colombia. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 11(1), 163-173.

- Vásquez-Ramos, J. M., & Reinoso Flórez, G. (2012). Estructura de la fauna béntica en corrientes de los Andes colombianos. *Revista Colombiana de Entomología*, 38(2), 351–358. <https://doi.org/10.25100/socolen.v38i2.9018>
- Vitta, N., Agrónoma, P., Inia, M., & Platina, L. (n.d.). *Capítulo 1 Orden Diptera Familia Simuliidae*. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6577/NR40629.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Viveros Mena, J. M. (2016). *Evaluación de la calidad de agua a través del método BMWP (Biological Monitoring Working Party) en el humedal Santa María del Lago de la ciudad de Bogotá-Colombia* [Trabajo de grado]. Universidad Militar Nueva Granada.
- Von Gönner, J., Bowler, D. E., Gröning, J., Klauer, A., Liess, M., Neuer, L., & Bonn, A. (2023). Citizen science for assessing pesticide impacts in agricultural streams. *Science Of The Total Environment*, 857, 159607. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159607>
- Ward, J. V. (1989). The Four-Dimensional Nature of Lotic Ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 8(1), 2–8. <https://doi.org/10.2307/1467397>
- Zabala Camayo, N. (2021). *Ciencia ciudadana y Monitoreo participativo para el análisis de la calidad del agua en la Cuenca del Río Teusacá, jurisdicción del Municipio de La Calera (Cundinamarca)* [Trabajo de grado]. Unversidad Antonio Nariño.

• ANEXOS

A continuación, encontrarás una guía que ayudará a comprender la ecología y la biología de cada macroinvertebrado, junto con su clasificación BMWP-Col según Roldan, además de una imagen para identificar y conocer la familia encontrada.

Figura 10. Recolección y depósito de especímenes para su posterior análisis.

Figura 11. Uso de un Microscopio Digital Led Electronico Portatil USB Zoom 1000x para la identificación de macroinvertebrados.