

Análisis del efecto de una obra hidráulica en la calidad del agua del Río Teusacá (Cundinamarca, Colombia) a través de la bioindicación con macroinvertebrados acuáticos

Analysis of the effect of a Hydraulic Work on the Water Quality of the Teusacá River (Cundinamarca, Colombia) through Bioindication with Aquatic Macroinvertebrates

Cristian Camilo Lozano Moreno¹, Shelsey Alejandra Martínez Arias², Dayam Soret Calderon Rivera³,
Ángela María Jaramillo Londoño⁴

¹<https://orcid.org/0000-0001-8441-1955>, Bogotá D.C., Colombia, cristianlozanom@usantotomas.edu.co

²<https://orcid.org/0009-0005-0756-9480>, Bogotá D.C., Colombia, shelseymartinez@usantotomas.edu.co

³<https://orcid.org/0000-0002-7604-0581>, Bogotá D.C., Colombia, dsoretcalderon@ucundinamarca.edu.co

⁴<https://orcid.org/0000-0001-9465-8513>, Bogotá D.C., Colombia, angelajaramillo@usta.edu.co



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.11725>

Lozano Moreno, C. C., Martínez Arias, S. A., Calderón Rivera, D. S., & Jaramillo Londoño, Ángela M. . (2024). Análisis del efecto de una obra hidráulica en la calidad del agua del Río Teusacá (Cundinamarca, Colombia) a través de la bioindicación con macroinvertebrados acuáticos. *Avances Investigación En Ingeniería*, 21(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.11725>

Resumen

El objetivo principal de esta investigación consiste en analizar el efecto ocasionado por una intervención hidráulica de dragado en el Río Teusacá (Cundinamarca, Colombia), por medio de bioindicación de macroinvertebrados acuáticos. Se hicieron mediciones de oxígeno disuelto, turbidez, temperatura y pH en cada punto de muestreo, y se calcularon diversos índices de calidad del agua (BMWP/Col, ASTP, IBF, EPT), así como índices de biodiversidad (Shannon Weaver, Simpson, Margalef y Menhinick). Se tomaron cuatro puntos de muestreo en junio, octubre y diciembre de 2021, donde se recopiló 1160 organismos clasificados en 6 clases, 13 órdenes y 19 familias taxonómicas, se usaron para evaluar comparar la calidad del agua antes y después de la obra hidráulica. Para el análisis del efecto de la obra hidráulica sobre la calidad del agua, se consideró un punto de muestreo como referencia posterior a la intervención y como referencias previas a la obra se consideraron investigaciones anteriores en la misma zona. El dragado tuvo un efecto ligeramente positivo en la calidad del agua del río, evidenciado mejoras en los parámetros fisicoquímicos e índices de calidad, que reflejan un aumento en su calidad.

Palabras clave: Biodiversidad, calidad del agua, macroinvertebrados acuáticos, Teusacá, BMWP/Col, Simpson.

Abstract

The main objective of this research is to analyze the effect caused by a hydraulic dredging intervention in the Teusacá River (Cundinamarca, Colombia), using bioindication of aquatic macroinvertebrates. Dissolved oxygen, turbidity, temperature, and pH measurements were taken at each sampling point, and various water quality indices (BMWP/Col, ASTP, IBF, EPT), as well as biodiversity indices (Shannon Weaver, Simpson, Margalef, and Menhinick) were calculated. Four sampling points were taken in June, October, and December, collecting a total of 1160 organisms grouped into 6 classes, 13 orders, and 19 taxonomic families, these organisms were

used for the comparative assessment of water quality before and after the Hydraulic work. For the analysis of the effect of hydraulic work on water quality, one sampling point was considered a post-intervention reference, and previous research in the same area was considered as a reference before the work. The dredging had a slightly positive effect on the river's water quality, evidencing improvements in the physicochemical parameters and quality indexes, which reflect an increase in its quality.

Keywords: Biodiversity, water quality, aquatic macroinvertebrates, Teusacá, BMWP/Col, Simpson.

I. Introducción

En la parte alta de la Cordillera Oriental se encuentra la subcuenca del río Teusacá, ubicada en la cuenca del río Bogotá dentro del departamento de Cundinamarca, Colombia. El río Teusacá discurre por varios municipios como La Calera, Guasca, Sopó y, la capital Bogotá D.C., entre otros. Tiene una extensión de 35.818,42 hectáreas, y una longitud de cauce principal de 69 kilómetros [1].

La ampliación urbana conlleva a la contaminación mediante vertimientos de aguas residuales sin tratamiento y actividades agroindustriales que afectan negativamente las características naturales del río, como la disminución de la biodiversidad y cambios en la calidad del recurso hídrico [2], [3].

Debido a un registro constante de inundaciones y falta de regulación de cauce, las autoridades competentes elaboraron una obra hidráulica de dragado a mediados del 2019 y que tuvo una extensión de 11,7 Km [4], la cual es una obra de irrigación y defensa contra inundaciones que previene y controla desastres, además es un control de la corriente de agua [1]. Esta obra hidráulica se planteó, mediante una obra mínimamente invasiva en el río, con ensanchado de secciones, lo que permite llegar optimando afluencias, evitando una intervención de maquinaria pesada.

El monitoreo de la calidad del agua impone la necesidad de aplicar enfoques distintos al análisis de parámetros físico-químicos, incluyendo el uso de indicadores

biológicos. Uno de estos indicadores destacados es el monitoreo con macroinvertebrados acuáticos, que reflejan las perturbaciones presentes en los cuerpos de agua [2], [4].

En este trabajo se realizaron monitoreos durante el año 2021, donde se muestrean diferentes zonas tras terminar la obra hidráulica. Con el fin de determinar el efecto que tuvo dicha obra hidráulica en la calidad del agua del río Teusacá, se hizo uso de los macroinvertebrados acuáticos y por medio de análisis de comparación entre los índices de calidad biológica, tales como BMWP, adaptado para Colombia por Roldán [5], Average Score Per Taxon (ASPT), el Índice Biológico de Familias (IBF), e índices de diversidad biológica tales como Simpson, Shannon-Wiener, Margalef y Menhinick.

II. Metodología

La selección de los puntos de muestreo se basó en la identificación de áreas estratégicas utilizando mapas y una exploración previa de toda la región de la cuenca. Finalmente, se seleccionaron cuatro sitios para llevar a cabo el muestreo:

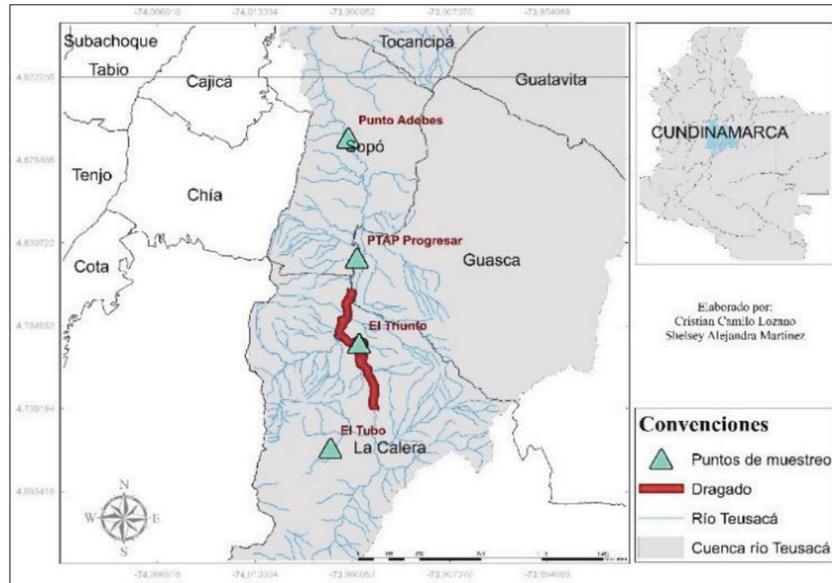
Tabla No. I. Coordenadas de puntos de muestreo

Punto de muestreo	Coordenadas	
Puente Adobes	4° 46' 29.996" N	73° 57' 23.264" W
El Triunfo	4° 43' 1.657" N	73° 58' 19.179" W
PTAP Progresar	4° 53' 18.5" N	73° 57' 44.2" W
El Tubo	4° 46' 13.465" N	73° 58' 1.288" W

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 1 se muestra la distribución de los puntos de muestreo a lo largo de la cuenca del río y también el terreno donde ocurrió la obra hidráulica.

Figura 1. Mapa de puntos de monitoreo y dragado en el río Teusacá



Fuente: Elaboración Propia

Los muestreos se realizaron en el segundo semestre del año 2021, en agosto, octubre y diciembre, con un tiempo de recuperación de un mes tras cada monitoreo, para permitir que el ecosistema se recupere tras la perturbación de la intervención realizada al raspar las orillas del río [6].

En cada estación de muestreo, se copiaron los macroinvertebrados acuáticos mediante un barrido en contra de la corriente utilizando una red D-net. Este proceso se realiza durante 5 minutos en una longitud de 10 metros en ambas orillas del cauce del río previamente delimitado. Se hizo un barrido en troncos y rocas dentro del cauce para asegurar la cobertura de los posibles hábitats. Además, se muestrearon los parámetros fisicoquímicos in-situ como pH, ORP, Oxígeno Disuelto, Conductividad, Resistividad, TDS (Sólidos Disueltos Totales), Salinidad, Turbidez y Temperatura.

Las muestras de macroinvertebrados recolectadas se preservaron en alcohol al 70% a una temperatura de 4°C, se etiquetaron adecuadamente con número de estación y

número de muestra, y se destinaron para su posterior separación, identificación y conteo.

Identificación de los macroinvertebrados acuáticos

Usando la metodología de identificación de macroinvertebrados acuáticos del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt [7], la cual consiste en una serie de claves taxonómicas como herramienta de referencia de identificación en laboratorio [7], [8], [9], [10], se reconocieron morfológicamente los macroinvertebrados hasta el nivel taxonómico de familia, presentes en las muestras tomadas en los puntos de muestreo en la cuenca del río, después se realizó un conteo de cada individuo por familia para calcular los índices de calidad y diversidad biológica del agua

Con la ayuda del conteo realizado anteriormente se utilizó para evaluar la calidad del agua y la diversidad. Para la evaluación de calidad se implementaron los índices de BMWP-Col, ASPT (Average Score Per Taxon) modificado según Roldán Pérez

[5] y adaptado por Álvarez Arango, el IBF (Índice Biótico de Familias) de Hilsenhoff, los cuales serán mostrados a continuación [11]-[19]. La evaluación de la diversidad se llevó a cabo utilizando tres indicadores: el índice de equidad de Shannon-Weaver (H), el índice de Margalef y el índice de Menhnick. Además, se determinó la dominancia utilizando el índice de Simpson (1-D).

Análisis estadístico de los datos

En 2016, previas a la obra hidráulica y las del 2021 como posteriores, se determinó que las estaciones de mayor interés para este estudio fueron la estación E3 cuyos monitoreos se realizaron en julio, septiembre y noviembre en el 2016[20], y el punto de El Triunfo en el 2021, ya que son más cercanos al dragado ocurrido en la cuenca del río. A partir de los anteriores grupos de datos se realizaron pruebas de homogeneidad de varianza (normalidad con Shapiro – Wilk y homocedasticidad de Levene) para determinar su

distribución y definir las pruebas de comparación que se ajustaran apropiadamente a la naturaleza de los datos y para demostrar las posibles diferencias significativas entre las variables de respuesta previas y posteriores a la obra hidráulica. Estas pruebas estadísticas se por medio del software de R Studio y el software Past.

III. Resultados

Se lograron recolectar e identificar un total de 1160 organismos agrupados en 6 clases, 13 órdenes y 19 familias taxonómicas. Se observa un mayor número de macroinvertebrados en el punto de monitoreo El Triunfo, lo cual representa el 49,22% del total de organismos encontrados. En el estudio que se utilizó para la comparación de calidad del agua posterior a la obra, se encontraron un total 6781 individuos de macroinvertebrados acuáticos pertenecientes a 3 phylum, 5 clases, 11 órdenes y 21 familias [20].

Tabla No. 2. Recuento de macroinvertebrados por punto de monitoreo río Teusacá

Familia	El Tubo	Puente Adobes	El Triunfo	PTAP Progresar
Aeshnidae	-	2	1	-
Ceratopogonidae	3	-	89	9
Chironomidae	-	-	1	-
Corixidae	-	2	-	6
Dryopidae	-	-	1	-
Dugesidae	6	-	8	-
Empididae	2	-	-	-
Gammaridae	2	16	331	225
Glossiphoniidae	7	-	90	285
Hydrophilidae	1	-	-	-
Leptohiphidae	1	-	-	-
Lestidae	-	1	-	-
Libellulidae	-	-	1	-
Lymnaeidae	-	-	12	-
Philopotamidae	-	-	-	1
Physidae	-	1	2	11
Polycentropodidae	-	-	1	1
Simuliidae	6	-	34	-
Tubificidae	1	-	-	-
Total	29	22	571	538

Fuente: Elaboración Propia

Se evidencia que la familia con mayor cantidad de individuos encontrados fue Gammaridae con una cantidad de 574 individuos correspondiendo al 49,48% respecto a la totalidad de familias e individuos encontrados en los conteos de las muestras recolectadas a lo largo del río, esta familia se caracteriza por habitar cuerpos de agua en buenas condiciones de calidad, que además viven en presencia de altas conductividades y están asociados a un consumo de vegetación acuática [21]. Se evidencia que, entre los 4 puntos de monitoreo, El Triunfo fue el que presentó mayor concentración de macroinvertebrados.

Así mismo, también se encontraron familias que son indicadoras de aguas de mala calidad como Tubificidae y Glossiphoniidae

[22], ya que habitan en recursos hídricos con altos índices de contaminación. En cada punto de monitoreo se encontró una amplia variabilidad de especies relacionada con la heterogeneidad espacial de los sitios de muestreo que es influenciada por la estructura física, la calidad del agua y los ecosistemas aledaños [23]

Variables fisicoquímicas

Debido a lo anterior, y por su ubicación cercana a la obra hidráulica se seleccionó el punto de “El Triunfo” para realizar el análisis del efecto generado por dicha intervención. En la tabla No. 3 se exponen los niveles de los parámetros fisicoquímicos in situ encontrados previa y posteriormente a la obra hidráulica.

Tabla No. 3. Comparación de parámetros fisicoquímicos antes y después de la obra hidráulica. [20]

Parámetro	Antes			Después		
	jul-16	sep-16	nov-16	jun-21	oct-21	dic-21
pH	7,22	6,96	6,70	6,39	7,51	7,21
Temperatura (°C)	12,3	16,04	12,65	15,63	14,65	18,38
Oxígeno disuelto (mg/L)	2,03	0,37	3,39	5,3	6,72	3,86
Turbidez (UTN)	10,1	86,3	618,00	20,7	17,20	11,3

Fuente: Elaboración Propia.

A partir del análisis de homogeneidad de varianza (prueba de normalidad Shapiro – Wilk y de homocedasticidad de Levene), se afirma que tanto las variables posteriores como previas a la obra hidráulica tienen una distribución normal, a excepción del parámetro de turbidez evaluado previo a la obra (p value = 0.0038), ya que con este margen de error se puede tener un 95% de certeza que los datos arrojados en las pruebas estadísticas se encuentran calculados con valores confiables para el estudio.

Según estudios realizados previamente, los cuales emplearon la técnica de monitoreo de bioindicación con macroinvertebrados acuáticos en las zonas de Cundinamarca como en el río Chicú [24], el humedal Gaulí [21] o el río Frío [25], entre otros, el nivel

ideal para el parámetro de oxígeno disuelto se encuentra entre 9 y 10 mg/L [26]. Antes de la obra hidráulica realizada en el río Teusacá se evidenciaron niveles entre 0,3 y 3,4 mg/L de oxígeno disuelto lo que es un posible indicador que la calidad del agua se encontraba moderadamente contaminada, con tendencia a muy contaminada. [20]. El monitoreo realizado en este estudio muestra niveles comprendidos entre 3,86 mg/L de oxígeno disuelto en el mes de diciembre y 6,72 mg/L de oxígeno disuelto en el mes de octubre, posteriores a la obra hidráulica, siendo estos niveles favorables para algunas familias de macroinvertebrados como las familias Gammaridae, Simuliidae, Chironomidae que favorece su comunidad por su afinidad a este parámetro fisicoquímico [27].

Los datos evaluados de oxígeno disuelto previas y posteriores de la obra hidráulica en las pruebas estadísticas, demostraron distribuciones normales y sometidos a una prueba t test, se pudo afirmar la existencia de diferencias significativas (p value = 0.0022), lo cual evidencia que la calidad del agua posterior a la obra ha mejorado significativamente teniendo un aumento en las medias en el conjunto de resultados previos de 2,44 mg/L a resultados posteriores de 7,39 mg/L de oxígeno disuelto.

Se considera que este aumento en los niveles de oxígeno disuelto es debido a que la obra hidráulica no introdujo materiales ajenos al río, sino que al realizar una remoción con el mismo lecho de las riberas no representan una amenaza significativa para la calidad del agua, este puede llegar incluso a desempeñar un papel positivo al proporcionar hábitats para la vida acuática y ayudar a estabilizar las orillas de los ríos aumentando su salud [1].

Al extraer el material directo del río, se puede mantener la composición fisicoquímica sin necesidad de alterar sus componentes abióticos (como el uso de concretos y/o arenas de diferentes orígenes), que podrían alterar la calidad del río que en vez de implementar materiales propios del mismo [28].

En cuanto al parámetro fisicoquímico de turbidez, hay valores relativamente bajos

comparados a los previos a la obra hidráulica, la disminución de este parámetro simboliza un decrecimiento en el material suspendido presente en el agua.

Previo a la obra había valores de un mínimo de 10,1 UTN a un máximo de 618 UTN y posteriores a la obra la amplitud del rango de datos es inferior, ya que cuenta con un mínimo de 11,3 UTN a 20,7 UTN.

De acuerdo con la distribución no normal de este parámetro, se realiza de prueba no paramétrica de Mann - Whitney la cual demostró que no se encuentran diferencias significativas en la turbidez (p value = 0,574) con un error del 5%, es decir que a pesar la amplitud de este parámetro en ambos escenarios es diferente, estadísticamente no se evidencia que estos grupos de datos tengan diferencias significativas de uno a otro.

Calidad biológica del agua

Después del análisis de los parámetros fisicoquímicos, se calcularon índices de calidad biológica del agua (BMWP/Col, ASPT e IBF), realizados a partir de la identificación de los macroinvertebrados en las muestras de agua recolectadas. Con estos datos se hace un conteo e identificación de las familias presentes, para así calcular los índices de calidad biológica del agua.

Tabla No. 4. Comparaciones de índices de calidad biológica [20]

Índices de calidad biológica	2016			2021		
	jul-16	sep-16	nov-16	jun-21	oct-21	dic-21
BMWP/Col	21	37	40	109	32	63
ASPT	5,25	6,17	5	5,74	4,57	5,73
IBF	6,2	6,21	6,94	0,21	0,89	5,73

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la calidad biológica del agua, se evidencia un aumento en la calidad del índice biótico de BMWP/Col, que permite asignar puntuaciones a las diferentes familias encontradas en las muestras de macroinvertebrados según una lista establecida adaptada para Colombia [5], la mayor o menor puntuación asignada a un taxón es por su sensibilidad a la contaminación orgánica y al déficit de oxígeno en los ríos [29].

Los resultados obtenidos en el índice del BMWP/Col presentan diferencias significativas posteriores a la obra hidráulica (p value = 0,047) con un error del 5%. Previo a la obra se encuentra que la calidad del agua del río Teusacá es moderadamente contaminada, con tendencia a muy contaminada evidenciando valores de calidad dudosa y crítica [20]; sin embargo, posterior a la obra la calidad del agua estaba en un estado ligeramente contaminado con calidad aceptable, presentando efectos de contaminación. Se calcula el índice ASPT, en donde los resultados arrojados no evidenciaron diferencias significativas (p value=0,5327) con un error del 5%, comparados con literaturas previas a la obra, por lo tanto, la calidad del agua evaluada por este índice se encuentra en el mismo estado previo al dragado.

Los resultados obtenidos para el índice IBF dan indicios positivos, así como índices previamente calculados ya que se evidencia diferencias significativas (p value= 0,0211) con un error del 5%, comparados con literatura previa a la obra, donde se tienen registros de calidad ligeramente a contaminada, mientras que los resultados obtenidos en este estudio demostraron una mejora

positiva con clasificaciones de ligeramente a no contaminadas.

Los índices y parámetros arrojan resultados prometedores, en donde es evidente que la intervención hidráulica que sufrió el río Teusacá tuvo repercusiones positivas, donde no únicamente mejoró a simple vista el flujo del caudal del río, disminución de inundaciones y mejora estética de este, sino que también el impacto positivo a largo plazo de la calidad del río es relevante.

La relevancia de la unidad biológica escogida, en este caso los macroinvertebrados, ha sido relevante, ya que son organismos sensibles a las alteraciones de las condiciones fisicoquímicas del agua, lo que permite analizar las condiciones del agua durante sus cambios. Este dragado es positivo en la calidad del agua, ya que la intervención hidráulica permite renovar aguas (por la remoción de posibles estancamientos y otros eventos que pueden afectar el ciclo de la corriente) [30].

Diversidad biológica

La diversidad biológica se calculó a partir de la cantidad de especies e individuos de estas, mediante los índices de Simpson, el cual toma en cuenta la representatividad de las especies dominantes con respecto a las demás, el índice de Shannon – Weaver, el cual es el grado de igualdad de la distribución de las abundancias de las especies, el índice de Margalef que mide de forma sencilla la biodiversidad y el índice de Menhinick, el cual mide la relación entre el número de especies y el número total de individuos encontrados.

Tabla No. 5. Comparaciones de índices de diversidad biológica [20].

Índices de diversidad biológica	2016			2021		
	jul-16	sep-16	nov-16	jun-21	oct-21	dic-21
Simpson / Dominancia	0,44	0,45	0,48	0,35	0,54	0,48
Shannon / Equidad	0,95	0,95	1,07	0,65	0,50	0,58
Margalef / Riqueza	0,64	1,06	1,47	1,03	0,97	1,07
Menhinick	0,22	0,14	0,37	1,01	0,51	0,43

Fuente: Elaboración Propia

Posterior a la obra hidráulica, se puede probar la existencia de poca diversidad y alguna especie dominante con respecto al índice de Simpson ya que sus resultados son cercanos a cero y que la mayor cantidad de individuos recolectados pertenecen a las familias de Gammaridae y Glosiiphoniidae. La familia Gammaridae se distingue por su preferencia de hábitat en aguas con niveles considerables de oxígeno, en un rango que oscila entre 4,63 y 8,52 mg/L de oxígeno disuelto [31], mientras que la familia Glosiiphoniidae es más susceptible a encontrarlos en aguas contaminadas con altos niveles de turbidez y sólidos disueltos totales (SDT)[22].

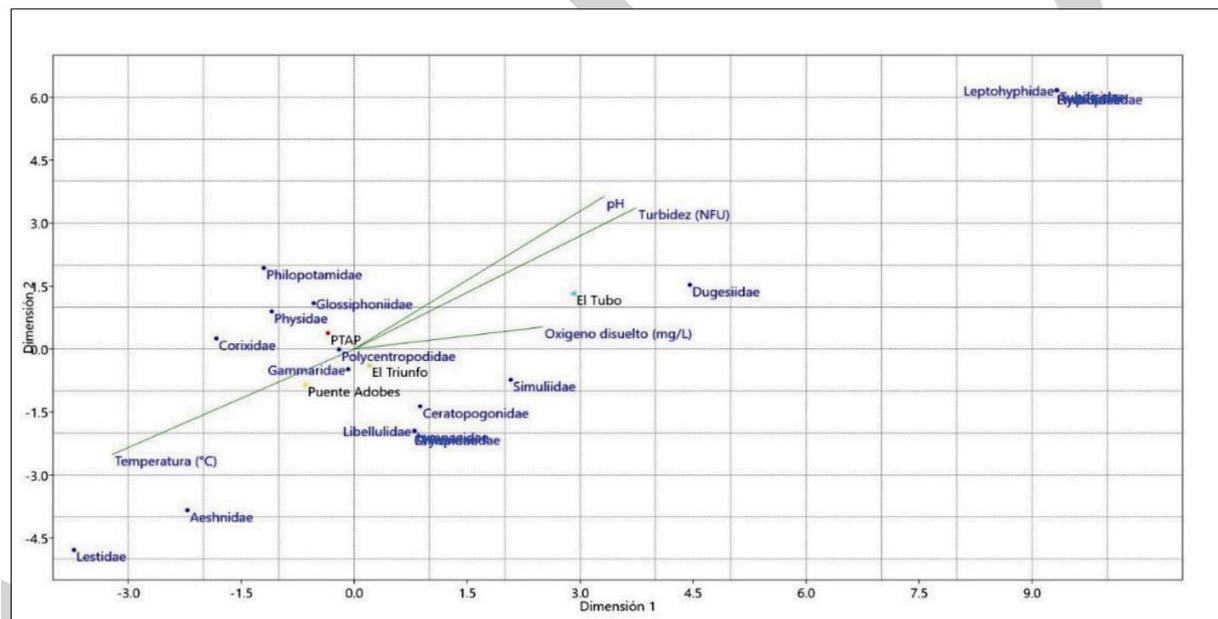
Lo anteriormente expuesto acerca de la poca diversidad encontrada posterior a la obra hidráulica se corrobora de igual manera con el índice de Margalef y Menhinick ya que sus valores se encuentran en la categoría de poca diversidad, y finalmente con el índice de Shannon se encontraron valores entre 0,5 y 0,65 lo cual representa una baja diversidad.

Para evidenciar diferencias significativas en los valores previos y posteriores a la intervención hidráulica por parte de los índices, se

realizó una prueba de normalidad Shapiro Wilk y homocedasticidad de Levene, para determinar la prueba de comparación con un error del 10%, ya que es un margen óptimo para experimentación biológica [32]. Los resultados arrojaron una distribución normal en cuanto a índices de diversidad. Para la prueba de comparación se optó por una prueba paramétrica t-test debido a la distribución normal de los grupos de datos.

A pesar de que se presentaran alteraciones a las condiciones en la calidad del agua debido a la intervención, no se evidencian diferencias significativas en la diversidad de especies encontradas después de la obra hidráulica con respecto a los índices de Simpson, Margalef y Menhinick, el índice de Shannon-Weaver indica que sus valores no siguen una distribución normal, lo que lleva a rechazar la hipótesis nula de normalidad. Como alternativa, se usa la prueba no paramétrica de Mann-Whitney, que revela diferencias significativas (p -valor = 0,076). Aunque en ambos escenarios la diversidad según la categorización de este índice es baja, el rango de los valores de Shannon fue más estrecho tras la obra, ya que se demuestran valores entre 0,97 y 1,07.

Figura 2. Análisis multivariado de correspondencia canónica



Fuente: Elaboración Propia

En la figura 2 se observa que cada familia presentó un grado de afinidad distinto frente a cada parámetro físico químico del agua, siendo las más afines las de valores de -1,5 a 1,5 en ambos ejes, además de las familias más cercanas a los parámetros fisicoquímicos, además de realizar este análisis con un 82,38% de confiabilidad.

A lo largo del estudio se identifica que la mayoría de las familias cuenta con una sensibilidad a la variación de los parámetros fisicoquímicos del agua, principalmente al oxígeno disuelto ya que influye en la calidad del agua [33], algunas de las familias encontradas son sensibles a los cambios de este parámetro, siendo las familias de Simuliidae, Libellulidae, Lymnaeidae, Ceratopogonidae, Dryopidae y Chironomidae.

El punto de la PTAP Progresar y El Triunfo son los puntos en donde se concentran una considerable cantidad de familias de macroinvertebrados, con especial énfasis en las familias Glossiphoniidae y Polycentropodidae que cuenta con mayor afinidad a la turbidez. También se encuentra la familia Physidae, esta especie se distingue por su capacidad para resistir niveles elevados de contaminación y por habitar en cuerpos de agua que carecen de movimiento, como lagos o estanques [34].

En términos de buena calidad de agua se encuentra en el punto de interés de El Triunfo la familia Simuliidae, a pesar de que solo se encontró en este punto específico posee relevancia al efecto que tuvo la obra hidráulica sobre la calidad del río, ya que esta familia se suele encontrar en cuerpos de agua limpias [5].

IV. Conclusiones y recomendaciones

Los macroinvertebrados presentes en los muestreos cuentan con una afinidad a los parámetros fisicoquímicos recolectados en campo, a pesar de la poca variación que

presentaron los índices de calidad biológica se determinó un ligero aumento en la calidad del agua en el río Teusacá posterior a la obra hidráulica.

Para los cuatro puntos de monitoreo establecidos se encuentra que la mayor diversidad está presente en las estaciones de PTAP Progresar y El Triunfo, que a su vez entre estas estaciones tienen la mayor dominancia entre las familias Gammaridae y Glosiiphoniidae.

Se determina que el efecto de la obra hidráulica en la calidad del agua y las comunidades biológicas del río es positivo, ya que se evidencia el aumento de oxígeno disuelto y la disminución de la turbidez, ya que estas obras mejoran la circulación del agua disminuyendo los sólidos suspendidos, y también estas reducen los sedimentos contaminantes, lo que ayuda a reducir la carga contaminante en el agua y mejora su calidad y prevenir inundaciones. Este parámetro es uno de los que presenta mayor sensibilidad al impacto que produjo la obra hidráulica, reflejado como un impacto positivo por su aumento en la concentración, dando como resultados que los índices de calidad biológica del agua tengan diferencias posteriores a la obra y que sean de tendencia a los cuerpos de agua no contaminados.

La diversidad del río no presenta variaciones significativas en las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en términos de dominancia y equidad, posiblemente a la alteración que sufrieron los hábitats de los macroinvertebrados acuáticos que dejó la intervención por la perturbación física en el lecho del río, ya que implica remover sedimentos y materiales del río, lo que puede alterar los refugios naturales de los macroinvertebrados acuáticos, como grietas, rocas y vegetación sumergida.

Las familias que presentan una mayor tolerancia a los cambios en las condiciones fisicoquímicas son las familias Lestidae, Aeshnidae, Dugesiidae, Leptohyphidae ,

Tubificidae, Empididae, en cambio las que son relevantes para identificar la calidad del agua del río debido a su sensibilidad a los cambios en los parámetros son las familias Simuliidae, Libellulidae, Lymnaeidae, Ceratopogonidae, Dryopidae, Chironomidae, Philopotamidae, Physidae, Glossiphoniidae, Corixidae y Gammaridae por sensibilidad a las variaciones entre oxígeno disuelto, turbidez y pH.

En futuras investigaciones que empleen la técnica de monitoreo por bioindicación con macroinvertebrados acuáticos, se recomienda extender considerablemente el área de muestreo en las orillas del río durante el proceso de raspado, ya que se podrá garantizar una cobertura más extensa de la zona de estudio y facilitará la recolección de material biológico en mayor cantidad y diversidad de especies, lo cual resultará fundamental para llevar a cabo un inventario exhaustivo de macroinvertebrados para poder optimizar los estudios estadísticos y obtener resultados más precisos.

Se recomienda manejar un error del 10% en las pruebas estadísticas, ya que al realizar un estudio que involucra macroinvertebrados como unidad biológica, se deberá considerar variables significativas que pueden alterar o afectar la precisión de los resultados, esto con base a el margen de error propuesto de hasta un 20% en estudios de muestro y análisis de macroinvertebrados previamente divulgados [35], los cuales a su vez están basados en la metodología de análisis estadístico de muestras de invertebrados bénticos [36].

V. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Santo Tomás, por la financiación del proyecto “Adaptación de la metodología IFIM-PHABSIM para la estimación de caudales ambientales ante escenarios de cambio climático en la cuenca del Río Chicú”

Referencias bibliográficas

- [1] Planeación Ecológica Ltda. y Ecoforest Ltda., «Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá, Subcuenca del río Teusaca», Diagnóstico 2120-13, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac25d-4c03bce.pdf>
- [2] P.-O. Johansen et al., «Temporal changes in benthic macrofauna on the west coast of Norway resulting from human activities», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 128, pp. 483-495, mar. 2018, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.01.063.
- [3] C. J. H. Lahme, D. A. M. Visintin, y D. A. Mangeaud, «Universidad Nacional de Córdoba Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Ciencias Biológicas».
- [4] R. González, «Regulación hídrica y adecuación hidráulica Río Teusacá.», Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, ago. 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.car.gov.co/uploads/files/estudios_Previos_Rio_Teusaca.pdf
- [5] G. Roldán Pérez, Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: propuesta para el uso del método BMWP/Col, 1. ed. en Ciencia y tecnología. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia, 2003.
- [6] L. Poorter et al., «Multidimensional tropical forest recovery», *Science*, vol. 374, n.o 6573, pp. 1370-1376, dic. 2021, doi: 10.1126/science. abh3629.
- [7] L. F. Álvarez y E. M. D. Ospina, «Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua», p. 263, 2005.
- [8] A. G. Pérez et al., «subdirector de gestión ambiental».
- [9] C. Dúran Lalaguna, J. Oscoz, D. Galcia, y R. Miranda, Clave dicotómica para la identificación de macroinvertebrados de la cuenca del ebro. España: Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2011.
- [10] J. Gonzáles Garrido, C. João Benetti, y A. Perez Bilbao, ID-TAX, Catalogo y claves de identificación de organismos invertebrados utilizados como elementos de calidad en las redes de control del estado ecologico - AAVV - 9788449112027, 1a ed. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Accedido: 8 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.agapea.com/libros/Id-Tax-catalogo-y-claves-de-identificacion-de-organismos-invertebrados-utilizados-como-elementos-de-calidad-en-las-redes-de-control-del-estado-ecologico-9788449112027-i.htm>
- [11] M. Zeybek, H. Kalyoncu, B. Karakaş, y S. Özgül, «The use of BMWP and ASPT indices for evaluation of water quality according to macroinvertebrates in Değirmendere Stream (Isparta, Turkey) », *Turk. J. Zool.*, vol. 38, pp. 603-613, 2014, doi: 10.3906/zoo-1310-9.
- [12] K. Ariella y A. Moesriati, «The implementation of biological monitoring working party average score per taxon (BMWP-ASPT) in a water quality analysis at Kalibokor drainage in Surabaya region», presentado en 8TH International Conference on Global Resource Conservation (ICGRC 2017): Green Campus Movement for Global Conservation, Malang, Indonesia, 2017, p. 030007. doi: 10.1063/1.5012707.
- [13] M. Sánchez, «Determinación del índice BMWP/Col, mediante la utilización de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad de agua, en el cauce del río Guachicos, que surte el acueducto del municipio de Pitalito», Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Pitalito, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/21168/36281677.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [14] C. Zamora-Muñoz, C. E. Sáinz-Cantero, A. Sánchez-Ortega, y J. Alba-Tercedor, «Are biological indices BMPW' and ASPT' and their significance regarding water quality seasonally dependent? Factors explaining their variations», *Water Res.*, vol. 29, n.o 1, pp. 285-290, ene. 1995, doi: 10.1016/0043-1354(94)E0125-P.
- [15] S. Ayala Ramírez, W. A. Reinoso González, D. S. Calderón Rivera, Á. M. Jaramillo Londoño, y D. J. Mesa Fernández, «Determinación de la calidad del agua del río Frío (Cundinamarca, Colombia) a partir de macroinvertebrados bentónicos», *Av. Investig. En Ing.*, vol. 16, n.o 1, pp. 49-65, ago. 2019, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.5191.
- [16] S. A. Peña Perea, H. A. Bohórquez Garzón, A. K. Barrera Rodriguez, S. S. Salamanca Velandia, D. A. A. Jiménez Medina, y W. A. Botello-Suárez, «Macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua en la quebrada La Calabozza (Yopal, Casanare)», *Entre Cienc. E Ing.*, vol. 13, n.o 25, pp. 14-22, jun. 2019, doi: 10.31908/19098367.4010.
- [17] J. L. Carter, V. H. Resh, y M. J. Hannaford, «Macroinvertebrates as Biotic Indicators of Environmental Quality», en *Methods in Stream Ecology*, Elsevier, 2017, pp. 293-318. doi: 10.1016/B978-0-12-813047-6.00016-4.

- [18] W. L. Hilsenhoff, «Rapid Field Assessment of Organic Pollution with a Family-Level Biotic Index», *J. North Am. Benthol. Soc.*, vol. 7, n.o 1, pp. 65-68, mar. 1988, doi: 10.2307/1467832.
- [19] E. Cárdenas Castro, L. Lugo Vargas, Universidad Santo Tomás, J. A. González Acosta, y A. I. Tenjo Morales, «Aplicación del índice biótico de familias de macroinvertebrados para la caracterización del agua del Río Teusacá, afluente del Río Bogotá», *Rev. UDCA Actual. Divulg. Científica*, vol. 21, n.o 2, dic. 2018, doi: 10.31910/rudca.v21.n2.2018.1004.
- [20] S. López Mendoza, D. F. Huertas Pineda, Á. M. Jaramillo Londoño, D. S. Calderón Rivera, y J. L. Díaz Arévalo, «Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia)», *Ing. Desarro.*, vol. 37, n.o 02, pp. 269-288, jun. 2022, doi: 10.14482/inde.37.2.6281.
- [21] S. M. Bustos Espinosa y A. Huertas Buitrago, «Determinación de la calidad de agua del humedal Gaulí mediante el uso de macroinvertebrados acuáticos en el Municipio de Funza Cundinamarca», Thesis, 2019. Accedido: 11 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/2788>
- [22] A. Z. O. Durán y D. A. G. Suarez, «Determinación del tratamiento y la calidad de agua utilizando macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores», *Din. Ambient.*, n.o 2, Art. n.o 2, dic. 2018.
- [23] M. Buenaño, C. Vásquez, H. Zurita Vásquez, G. Parra, y R. Pérez, «Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua en la cuenca del Pachanlica, provincia de Tungurahua, Ecuador | *Intropica*», vol. 13, n.o 1, pp. 41-49, dic. 2018.
- [24] M. T. Rincón-Bello, F. Y. Soler-Romero, D. S. Calderón-Rivera, R. J. Sierra-Parada, y Á. M. Jaramillo-Londoño, «Aquatic macroinvertebrates as water quality bioindicators in Chicú river, Cundinamarca, Colombia», *Hidrobiológica*, vol. 31, n.o 1, pp. 17-29, abr. 2021, doi: 10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n1/rincon.
- [25] S. A. Ramírez, W. A. R. González, D. S. C. Rivera, Á. M. J. Londoño, y D. J. M. Fernández, «Determinación de la calidad del agua del río Frío (Cundinamarca, Colombia) a partir de macroinvertebrados bentónicos», *Av. Investig. En Ing.*, vol. 16, n.o 1 (Enero-Junio), Art. n.o 1 (Enero-Junio), ago. 2019, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.5191.
- [26] L. A. Galindo L., L. M. Constantino C., P. Benavides M., E. C. Montoya R., y N. Rodríguez V., «Evaluación de macroinvertebrados acuáticos y calidad de agua en quebradas de fincas cafeteras de Cundinamarca y Santander Colombia», *Evaluation of aquatic macroinvertebrates and water quality in streams of coffee farms in Cundinamarca and Santander Colombia*, sep. 2014, Accedido: 11 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/514>
- [27] J. J. Rivera-Usme, G. A. Pinilla-Agudelo, y J. O. Rangel-Ch., «Ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos y su relación con las variables físicas y químicas en el humedal de Jaboque-Colombia», *Caldasia*, vol. 35, n.o 2, pp. 389-408, dic. 2013.
- [28] M. V. Pozzobon, «Cambios en la calidad del agua y de la ribera por una obra hidráulica en el arroyo Las Garzas (Lobos, Bs.As.)», Thesis, Universidad Nacional de Luján, 2021. Accedido: 11 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://ri.unlu.edu.ar/xmlui/handle/rediunlu/1008>
- [29] L. Lozano Ortiz, «La bioindicación de la calidad del agua: importancia de los macroinvertebrados en la cuenca alta del río Juan Amarillo, cerros orientales de Bogota», *Umbral Científico*, n.o 7, pp. 5-11, 2005.
- [30] F. Vega Desdín et al., «Estudio de impacto ambiental para el dragado del tramo del río Almendares desde calle 23 hasta la desembocadura», *Mapping*, n.o 136, pp. 38-46, 2009.
- [31] A. E. Rico-Sánchez, A. J. Rodríguez-Romero, E. López-López, y J. E. Sedeño-Díaz, «Patrones de variación espacial y temporal de los macroinvertebrados acuáticos en la Laguna de Tecocomulco, Hidalgo (México)», *Rev. Biol. Trop.*, vol. 62, pp. 81-96, abr. 2014.
- [32] U. López De Heredia, «Las técnicas de secuenciación masiva en el estudio de la diversidad biológica», *Munibe Cienc. Nat.*, vol. 64, 2016, doi: 10.21630/mcn.2016.64.07.
- [33] L. A. Rocca Mendoza, «Variación del oxígeno disuelto y su influencia como indicador de Calidad del Agua en Bahía Independencia – Pisco, 2000-2018», *Repos. Inst. - UCV*, 2021, Accedido: 9 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/78661>
- [34] E. A. Parra y L. F. Carvajal Serna, «Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca

hidrográfica para la estimación de caudales ambientales.», sep. 2012, Accedido: 9 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11036>

- [35] M.E.Maroñas,G.Marzoratti,A.Vilches,T.Legarralde, y G. Darrigran, «Guía para el estudio de macroinvertebrados II.- Introducción a la metodología de muestreo y análisis de datos.», 2010, [En línea]. Disponible en: <https://aquadocs.org/bitstream/>

[handle/1834/23510/12-Mar%C3%B1as_et_al-Gu%C3%ADa_de_macroinvertebrados.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unal.edu.co/handle/1834/23510/12-Mar%C3%B1as_et_al-Gu%C3%ADa_de_macroinvertebrados.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- [36] J. M. Elliott, Some methods for the statistical analysis of samples of benthic invertebrates, 4. impression. en Scientific publication/ Freshwater Biological Association, no. 25. Ambleside: Freshwater Biological Assoc, 1993.