



Evaluación Del Efecto De La Minería De Carbón Sobre La Calidad Del Agua De La Quebrada La Cucalina Mediante La Asociación De Macroinvertebrados Con Parámetros Fisicoquímicos, En El Municipio De Pamplonita, Norte De Santander Colombia

Fabian Jesid Mora Mora

COD. 1.192.814.637

Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Biología
Pamplona, 2024

**Evaluación Del Efecto De La Minería De Carbón Sobre La Calidad Del Agua De La
Quebrada La Cucalina Mediante La Asociación De Macroinvertebrados Con Parámetros
Fisicoquímicos, En El Municipio De Pamplonita, Norte De Santander Colombia**

Autor

Fabian Jesid Mora Mora

Director

Rafael Mauricio Cobos Hernandez. B.Sc.

Codirector

Lizeth Eunice Bolívar Buitrago B.Sc

Trabajo de grado para optar por el título de Biólogo

Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Biología
Pamplona, 2024

TRABAJO DE GRADO REALIZADO CON EL FIN DE OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGO
DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

*El éxito no es un accidente. Es trabajo duro,
perseverancia, aprendizaje, estudio, sacrificio y,
sobre todo, amor por lo que estás haciendo o
aprendiendo a hacer.*

pelé

DEDICATORIA

Dedico con infinito orgullo mi trabajo de grado a mi familia, en especial a mi madre Carmen Fabiola Mora siendo el ser máspreciado en el que con su bendición diaria y sabiduría fortalece cada obstáculo a lo largo de mi vida. A mis hermanos mayores, Jorfhan Mora y Jefferson Mora los cuales son mis consejeros de vida y con los que he guerreado por un “legado Mora” anhelado, también dedico mi compromiso y sacrificio a mis hermanos menores Manuel Mora y Jessica Mora “la bebe de la casa” dando fe que el compromiso, perseverancia y sobre todo dedicación es la receta del éxito.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios y a mi familia por el apoyo brindado a lo largo de mi academia, especialmente a mi madre Carmen Fabiola Mora Maldonado y mis hermanos Jorphan Arístides Mora, Jefferson Duvan Mora, Jhonatan Manuel Mora y Jessica Julieth Mora por el apoyo indispensable.

Agradezco también a mis asesores Rafael Mauricio Cobos Hernández y Lizeth Eunice Bolívar Buitrago por sus orientaciones expertas, paciencia, compromiso, consejos, apoyo y sobre todo creer en mis capacidades para realizar y presentar la investigación no solo como requisito de grado sino también en eventos regionales y nacionales.

Mi agradecimiento también va dirigido al actual docente del programa de Biología en la Universidad de Pamplona, Dilan Vergara Comas por compartir sus conocimientos en áreas afines para culminar con éxito el proyecto y la docente Liliana Rojas Contreras del programa Microbiología de la Universidad de Pamplona por sus enseñanzas en el área de aguas desde una perspectiva microbiológica.

Finalmente, también agradezco a la Universidad de Pamplona por sus espacios e instrumentos físicos y a todos mis compañeros de clase por estar presente en mis enseñanzas profesionales.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	- 10 -
RESUMEN	- 12 -
ABSTRACT	- 13 -
1.INTRODUCCIÓN	-14;Error! Marcador no definido.
2. MARCO TEORICO	- 17 -
2.1 Ecosistema dulceacuícola.....	- 17 -
2.2 Recurso hídrico en el mundo.....	- 18 -
2.3 Recurso hídrico en Colombia.....	- 19 -
2.4 Minería	- 20 -
2.4.1 Colombia país extractivista minero	- 21 -
2.4.2 Minería extractivista carbonífera en Norte de Santander	- 21 -
2.4.3 Minería carbonífera extractivista en el municipio de Pamplonita	- 22 -
2.4.3.1 Mina Santa Elena	- 22 -
2.5 Macroinvertebrados bentónicos como indicadores biológicos	- 22 -
2.5.1 Principales ordenes de Macroinvertebrados	- 23 -
2.5.1.1Ephemeroptera	- 23 -
2.5.1.2 Plecoptera.....	- 24 -
2.5.1.3 Tricoptera.....	- 25 -
2.5.1.4 Odonata	- 26 -
2.6 Índices bióticos.....	- 28 -
2.6.1 Biological Monitoring Working Party (BMWP/COL).....	- 28 -
2.6.2 Índice Biológico de Familias (IBF)	- 30 -
2.6.3 Índice EPT	- 31 -
2.6.4 Biodegradabilidad del agua	- 32 -
2.7 Métodos estadísticos	- 32 -
2.7.1 Análisis de redundancia.....	- 32 -
2.7.2 Perfiles de diversidad.....	- 32 -
2.7.3 Análisis de varianza.....	- 32 -

2.8 Parámetros Fisicoquímicos	33 -
2.8.1 pH	33 -
2.8.1 Conductividad Eléctrica (CE).....	34 -
2.8.2 Color	34 -
2.8.3 Turbidez.....	34 -
2.8.4 Dureza.....	35 -
2.8.5 Alcalinidad.....	35 -
2.8.6 DQO.....	35 -
2.8.7 DB05.....	35 -
3. OBJETIVOS.....	36 -
3.1 General	36 -
3.2 Específicos	36 -
4.MATERIALES Y METODOS	37 -
4.1 Área de estudio.....	37 -
4.2 Fase de campo	38 -
4.2.1. Toma de registro.....	38 -
4.2.2 Monitoreo biológico de macroinvertebrados bentónicos	38 -
4.2.3 Monitoreo de parámetros fisicoquímicos	40 -
4.2.3.1 Monitoreo ex situ	40 -
4.2.3.1 Monitoreo in situ.....	40 -
4.2.4 Monitoreo microbiológico.....	41 -
4.3 Fase de laboratorio	41 -
4.3.1 Monitoreo biológico de macroinvertebrados bentónicos	41 -
4.3.2.1 Alcalinidad.....	42 -
4.3.2.2 Dureza	43 -
4.3.2.3 Demanda química y biológica de oxígeno (DQO-DBO5).....	44 -
4.3.2.4 Cloruro	44 -
4.3.2.5 Solidos totales	44 -
4.3.2.6 Nitrito.....	45 -
4.3.2.7 Sulfato.....	45 -
4.2.3.8 Nitrógeno amoniacal.....	46 -
4.3.2.9 Color	46 -

4.3.2.10 Turbidez	- 47 -
4.3.3 Análisis de datos.....	- 47 -
5. RESULTADOS	- 49 -
5.1 Caracterización taxonómica de macroinvertebrados bentónicos	- 49 -
5.2 Curva de completitud y rarefacción	- 50 -
5.3 Índice de similaridad Cluster Bray Curtis	- 50 -
5.4 Perfiles de diversidad	- 51 -
5.5 Grafica rango-abundancia	- 52 -
5.6 Índices Bióticos	- 53 -
5.7 Determinación de variables fisicoquímicas.....	- 55 -
5.7.1 DQO.....	- 58 -
5.7.2 DBO5.....	- 58 -
5.7.3 Color	- 59 -
5.7.4 TURBIDEZ	- 60 -
5.7.5 DUREZA	- 60 -
5.7.6 FOSFORO	- 61 -
5.7.7 SOLIDOS TOTALES.....	- 62 -
5.8 Índice biodegradabilidad del agua.....	- 62 -
5.9 Monitoreo microbiológico.....	- 63 -
5.10 Análisis de correspondencia canónica.....	- 63 -
6. DISCUSIÓN	- 65 -
7. CONCLUSIONES	- 68 -
8. RECOMENDACIONES	- 69 -
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA	- 70 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Distribución del agua en la tierra-----	18 -
Tabla 2. Distribución de recursos hídricos por países-----	19 -
Tabla 3. Puntaje de familias macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Col-----	29 -
Tabla 4. Calidad biológica del agua - Índice BMWP/Col -----	30 -
Tabla 5. Porcentaje estipulado del índice IBF para la calidad de agua -----	53 -
Tabla 6. Porcentaje estipulado del índice EPT para la calidad de agua-----	54 -
Tabla 7. Puntajes del BMWP/Col de familias macroinvertebrados presentes. -----	57 -
Tabla 8. Resultados BMWP/COL de la calidad del agua-----	62 -
Tabla 9. Resultados de Porcentajes calculados y calidad del agua según el índice EPT -----	63 -
Tabla 10. Valores calculados y grados de contaminación del índice IBF. -----	63 -
Tabla 11. Valores de parámetros fisicoquímicos in situ y ex situ representados para cada estación de muestreo en la quebrada -----	62 -
Tabla 12. Resultado de Puntajes del índice de biodegradabilidad del agua para cada estación de muestreo en la quebrada.-----	63 -
Tabla 13. Valores microbiológicos -----	62 -

INDICE DE FIGURAS

Fig 1. Vista y morfología general de ninfa de Ephemeroptera.....	- 24 -
Fig 2. Vista y morfología general de Ninfa de Plecoptera.	- 25 -
Fig 3. Vista y morfología general de Ninfa de Trichoptera.....	- 26 -
Fig 4. Vista y morfología general de Ninfa de Odonata.....	- 27 -
Fig 5. Area de estudio.....	- 37 -
Fig 6. Recolecta de muestras biológicas.....	- 39 -
Fig 7. Multiparámetro 5 en 1 modelo 9909-SP (A) partes (B) aplicación en campo	- 41 -
Fig 8. Prueba de alcalinidad	- 43 -
Fig 9. Prueba de dureza	- 43 -
Fig 10. Prueba de cloruros.....	- 44 -
Fig 11. Evaporación para solidos totales	- 45 -
Fig 12. Prueba de sulfato.....	- 46 -
Fig 13. Curva de rarefacción	- 50 -
Fig 14: Dendrograma Índice de similaridad Bray Curtis	- 51 -
Fig 15. Perfiles de diversidad.....	- 52 -
Fig 16. Curva de Distribución de abundancia	- 53 -
Fig 17. Tendencia de Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	- 58 -
Fig 18. Tendencia Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).....	- 59 -
Fig 19. Tendencia concentración de color.....	- 59 -
Fig 20. Unidades nefelométricas de turbidez en las estaciones de muestreo	- 60 -
Fig 21. Tendencia de dureza del agua en las estaciones de muestreo	- 61 -
Fig 22. Disponibilidad de Fosforo en el agua en las estaciones de muestreo.....	- 61 -
Fig 23. Solidos Totales del agua en las estaciones de muestreo.....	- 62 -
Fig 24. Análisis de correspondencia canónica (ACC).....	- 64 -

RESUMEN

Los macroinvertebrados bentónicos son organismos de tamaño superior a 500 micrómetros, perceptibles a simple vista y de sencilla colecta estando presentes sobre cuerpos de agua loticos y lenticos exhibiendo características etológicas sedentarias, sensibles y tolerantes a las perturbaciones externas tales como la minería. Es por ello, que el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la minería carbonífera sobre la calidad del agua de la quebrada La Cucalina mediante la asociación de índices bióticos y su estrecha relación con los parámetros fisicoquímicos presentes en la actividad minera legal. De manera en que se realizó levantamiento de 3 estaciones; AG-AR (aguas arriba del lixiviado minero) , LIX (lixiviado minero) y AG-AB (aguas abajo del lixiviado minero) , en época seca específicamente los días 8 y 14 de febrero, así como el 21 de marzo de 2023, con un esfuerzo de muestreo de 660 minutos por día, tomando con un multiparámetros de manera *in situ* variables de temperatura, pH, conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos y salinidad, así mismo *ex situ* el color, turbidez, dureza, alcalinidad, cloruros, fosforo, nitritos, nitrógeno amoniacal, sulfato, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, DQO y DBO5 en el laboratorio de control y calidad de la Universidad de Pamplona. Como resultado, se obtuvo un total de 706 especímenes distribuidos en cuatro ordenes, ocho familias y nueve géneros, presentando distribuciones de diversidad altamente diferenciales en cada estación. Los índices bióticos por su parte estimaron para la estación AG-AR criterio aceptable en contaminación según el método BMWP/Col, en comparación de las estaciones AG-AB y LIX estando en condiciones críticas. En conclusión, el estudio reveló disminución en composición y estructura de macroinvertebrados por actividades de minería asociados a variables fisicoquímicas cambiantes en la trayectoria caudal.

Palabras claves: Actividad minera, Bioindicador, Contaminación, Diversidad, Lixiviado.

ABSTRACT

Benthic macroinvertebrates are organisms larger than 500 micrometers, perceptible to the naked eye and easy to collect, being present in lotic and lentic water bodies, exhibiting sedentary ethological characteristics, sensitive and tolerant to external disturbances such as mining. For this reason, the objective of this research was to evaluate the effect of coal mining on the water quality of the La Cucalina stream through the association of biotic indices and their close relationship with the physicochemical parameters present in legal mining activity. So 3 stations were surveyed; AG-AR (upstream of the mining leachate), LIX (mining leachate) and AG-AB (downstream of the mining leachate), in the dry season specifically on February 8 and 14, as well as on March 21, 2023, with a sampling effort of 660 minutes per day, taking with a multiparameter in situ variables of temperature, pH, electrical conductivity, total dissolved solids and salinity, as well as ex situ color, turbidity, hardness, alkalinity, chlorides, phosphorus, nitrites, ammoniacal nitrogen, sulfate, total solids, total suspended solids, COD and BOD5 in the control and quality laboratory of the University of Pamplona. As a result, a total of 706 specimens were obtained distributed in four orders, eight families and nine genera, presenting highly differential diversity distributions in each station. The biotic indices, for their part, estimated acceptable contamination criteria for the AG-AR station according to the BMWP/Col method, compared to the AG-AB and LIX stations being in critical conditions. In conclusion, the study revealed a decrease in composition and structure of macroinvertebrates due to mining activities associated with changing physicochemical variables in the caudal trajectory.

Keywords: Mining activity, Bioindicator, Pollution, Diversity, Leachate.

Evaluación Del Efecto De La Minería De Carbón Sobre La Calidad Del Agua De La Quebrada La Cucalina Mediante La Asociación De Macroinvertebrados Con Parámetros Fisicoquímicos

Colombia es reconocida como el séptimo país con gran extensión de recursos hídricos en todo el mundo (Ramírez, 2021) y se considera privilegiado aportando promediamente 23.750 kilómetros de aguas superficiales (Perdomo, 2018), atribuido a múltiples fuentes ecosistémicas incluyendo quebradas, lagos, lagunas, humedales y embalses (Hincapié, et al 2022). A finales del siglo XX, se originaron sobre el país varios estudios con el propósito de analizar el estado de los ecosistemas acuáticos, entre ellos el "Aprovechamiento integral de la cuenca del río Bogotá" (Á. Rodríguez, 1973).

Tiempo después la comunidad de macroinvertebrados bentónicos entre los cuales son insectos, crustáceos, moluscos, anélidos, entre otros en el que están adheridos en a la vegetación, rocas y otros sustratos propios del ecosistema (Japa Cando, 2021), abarcaron un campo fundamental al ser utilizados como bioindicadores de contaminación acuática en respuesta a actividades humanas de origen doméstico, agropecuario, industrial, forestal o minero a pequeña y a gran escala, que pueden afectar los ecosistemas dulce acuáticos (Rodiles-Hernández et al., 2013). Entre los estudios destacados se pueden encontrar el de Zamora (1999) titulado "Adaptación del índice BMWP para la evaluación biológica de la calidad de las aguas epicontinentales en Colombia" y "Bioindicadores de calidad de agua y caudal Ambiental: Caso del Río Meléndez en el Valle del Cauca, Colombia" (Del Carmen Zúñiga & Cardona, 2009).

El departamento de Norte de Santander por su parte, establece la primera investigación titulada "Macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de las aguas negras tratadas a través del sistema de eriales de oxidación" (Ortega-Contreras, 1998), por Herrera (2005) el "Índice

biológico BMWP (Biological Monitoring Working Party Score), modificado y adaptado al cauce principal del río Pamplonita norte de Santander” y en el periodo actual la investigación titulada “Diversidad de insectos acuáticos (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera y Odonata) asociados a parámetros fisicoquímicos como evaluación de la calidad del agua del municipio de Bochalema, Norte de Santander, Colombia” (Rojas Fuentes, 2018).

Por otro lado, en Colombia las actividades de minería son destacadas, reflejándose en la última encuesta cuatrianual de empresas mineras del instituto Fraser, el puesto 29 del ranking a nivel mundial como país atractivo en inversiones mineras y a su vez el segundo en América Latina (Yunis & Aliakbari, 2021), llevando el sector minero a creciente economía del país sobre los últimos años por su alta participación en el producto interno bruto y su potencial geológico (C. R. Pérez *et al.*, 2019). Sin embargo, es indispensable sobre el año 2024 aumentar estudios que respalden la importancia y el papel necesario de la comunidad de macroinvertebrados para evaluar efectos negativos medioambientales atribuidos por actividades mineras.

Es así, en que al momento sobresalen en Colombia estudios representativos como “Efecto de la minería en macroinvertebrados acuáticos de la ciénaga plaza seca, Atrato, Chocó” (Aguilar-Baldosea *et al.*, 2022), “evaluación de la calidad de aguas residuales mineras en el tajo patilla cerrejón norte de barrancas la guajira” (Medina, L. A., Brito, C. R., Vega, M. R., & Murgas, J. A, 2022) y el “Impacto ambiental en la microcuenca Cascabel ocasionado por la actividad minera del municipio de Marmato, Caldas” (Henao Gonzalez, 2022). Sin embargo, en el departamento de Norte de Santander hay nulos registros investigativos que relacionen la comunidad de macroinvertebrados bentónicos con actividades mineras.

Tomando como base lo expuesto con anterioridad, la presente investigación se centró en evaluar el impacto actual de la actividad minera en la calidad del agua de la quebrada La

Cucalina, situada en el municipio de Pamplonita, en el departamento Norte de Santander, Colombia. Dada la escasa presencia de investigaciones en cuerpos de agua con la comunidad de macroinvertebrados asociados a las actividades mineras de la región, contribuyendo a el enriquecimiento y estados de salubridad acuáticos del país.

2. MARCO TEÓRICO

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de la minería carbonífera en la calidad del agua de la quebrada La Cucalina. Con este fin, se abordan los siguientes apartados: La descripción del agua como sustancia, importancia del ecosistema dulceacuícola, el recurso hídrico en Colombia y a nivel global, aspectos generales de la minería en Colombia y específicamente en Norte de Santander, por último, se detallan los tres principales órdenes de macroinvertebrados, junto con los índices bióticos y las variables físico-químicas consideradas en la investigación

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) define el agua como compuesto químico el cual contiene pequeñas cantidades de agua pesada, gases y sólidos con sales en disolución. También, es catalogado como un compuesto básico e insustituible con características únicas para mantener toda forma de vida, siendo sustancial en los procesos físicos, químicos y biológicos que gobiernan el medio natural (Correa-Calderón & Romero-Salinas, 2022) y el componente más abundante de la superficie terrestre cubriendo más del 71 % de la superficie de la tierra (Vide, 2020) circulando naturalmente a través de océanos, atmosfera, lagos, ríos, glaciales y aguas subterráneas (Ramírez, 2021)

2.1 Ecosistema dulceacuícola

Sobre el ecosistema dulceacuícola, el agua cumple múltiples funciones importantes para mantener con rigurosidad la homeostasis ecológica pudiendo actuar como disolvente de rocas, erosión de terrenos, arrastrar sedimentos y formar los hábitat acuáticos para muchas formas de vida acuática en el que prefieren la concentración fluvial de baja concentración salina, formando cuerpos de agua como lagunas costeras, estuarios, lagos, ríos, llanuras aluviales, pequeños

arroyos, manantiales, acuíferos y humedales que presentan una elevada productividad biológica (Rodiles-Hernández *et al.*, 2013).

2.2 Recurso hídrico en el mundo

En la actualidad, en los cuerpos de agua dulce superficiales, tales como agua subterránea dulce, lagos, ríos y ciénagas, se puede observar una disparidad significativa en cuanto a la satisfacción de las necesidades básicas humanas, como se detalla en la Tabla 1 (Ramírez, 2021)

Tabla 1

Distribución del agua en la tierra (Ramírez, 2021)

Situación del sistema	Volumen en km3		Porcentaje	
	Agua dulce	Agua salada	Agua dulce	Agua total
Océanos y Mares	-	1.338.000.000	-	96.5
Casquetes y glaciares polares	24.064.000	-	68.7	1.74
Agua subterránea salada	-	12.870.000	-	0.94
Agua subterránea dulce	10.530.000	-	30,1	0.76
Glaciares continentales	300.000	-	0,86	0,002
Lagos de agua dulce	91.000	-	0,26	0,007
Lagos de Agua salada	-	85.400	-	0,006
Humedad del suelo	16.500	-	0,05	0,001
Atmosfera	12.900	-	0,004	0,001

Embalses	11.470	-	0,03	0,0008
Rio	2.120	-	0,006	0.0002
Agua biológica	1.120	-	0,003	0,0001
Total, agua dulce	35.029,110		100	-
Total, agua en la tierra	1.386.000.000		-	100

2.3 Recurso hídrico en Colombia

Colombia es reconocida como el séptimo país con gran extensión de recursos hídricos en todo el mundo (Ramírez, 2021), superando los 68 metros cúbicos por habitante. Esta abundancia se refleja en la extensión de diversas fuentes ecosistémicas, que incluyen ríos, quebradas, arroyos, lagos, lagunas, humedales y embalses, los cuales se estiman en 19,710,972 hectáreas hídricas (Hincapié, *et al* 2022). Además, Colombia cuenta con cuatro vertientes principales (Botero, 2020) seis nevados y más de 48,000 cuerpos de agua (Parra, 2021) favoreciéndose por tener el 50% de los páramos andinos del mundo, más de 30 grandes ríos, 1.277 lagunas y un registro superior a 1,000 ciénagas (Fernández Ladino, 2020).

TABLA 2.

Distribución de recursos hídricos por países

Tabla A. Países con mayor recurso hídrico		Tabla B. Países con menor recurso hídrico	
Países	Cantidad Km3/ año	Países	Cantidad Km3/ año/KM2
Brasil	8.233	Bahréin	Casi nada
Rusia	4.507	Kuwait	0.02
USA	3.051	Bahamas	0.02
Canadá	2.856	Maldivas	0.03
Indonesia	2.838	Qatar	0.1
China	2.830	Malta	0.1
Colombia	2.132	Barbaros	0.1
Perú	1.913	Antigua y bermudas	0.1
India	1897	Emiratos Árabes	0.2

NOTA. Tabla 2.A corresponde a los países que se destacan con mayor recurso hídrico. Tabla 2.B corresponden a aquellos países con deficiencia hídrica en el mundo. (Ramírez, 2021)

2.4 Minería

La minería tiene propósito la explotación económica de un yacimiento mineral, pudiendo ser a cielo abierto, en superficie o subterránea (Arango Mendoza, 2014) Generando Esta actividad, según la Agencia Nacional Minera de Colombia (ANM) ventajas a nivel social y económico promoviendo el aumento laboral sobre el sector directa e indirectamente causando divisas e inversiones, para el estado (Agencia Nacional de Minería colombiana [ANM], s.f.).

2.4.1 Colombia país extractivista minero

El carbón actualmente es considerado como el segundo producto más importante para el mercado de exportación en Colombia atribuyendo a los materiales de construcción el 57%, seguido por carbón que representa un 17%, metales preciosos 11%, calizas 5%, minerales Industriales 4%, piedras preciosas 4% y otros Metales 2% (Chia Pinto, 2020). Es así, en que, a inicios del siglo XX, el sector del carbón aporta una producción total de 58.990.702 anualmente (Gerstenberg & González, 2019) contribuyendo un total de 1009 títulos mineros de carbón vigentes sobre el 2021 según el reporte del censo de catastro por la Autoridad Nacional de Minería finalizado el 30 de noviembre del 2022.

Colombia a mediados del Siglo XIX ya era reconocido como un destino atractivo para empresas mineras de oro, y debido a la reforma del código de minas en el 2001 (ley 685 de 2001), vuelve a dar paso a la exploración y explotación minera por parte de empresas con capital canadiense, peruano y africano (Horta-Gaviria & García-Rodríguez, 2022).

2.4.2 Minería extractivista carbonífera en Norte de Santander

En cuanto a Norte de Santander carbón representa el 90% de las exportaciones totales del departamento, aportando en regalías más de 10 billones de pesos en los últimos 5 años aportando (Laguado Nieto, 2022) y cerca de 14.187 empleos. Así mismo, en el 2020 la fabricación de productos minerales no metálicos se ubicó en la primera posición con un porcentaje del 27.7% de las diez actividades industriales que patentan el 98.7 % de la producción total sobre el departamento norte de Santander (Perfiles económicos y comerciales por departamentos | MINCIT - Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, s/f) ya para el 2021 se registró una producción total de 1.032.585 de toneladas en carbón sobre el departamento según cifras de la unidad de planeación minera energética colombiana (UPME, 2022).

2.4.3 Minería carbonífera extractivista en el municipio de Pamplonita

La minería de carbón ha sido una de las principales actividades económicas en diversas regiones de Colombia, incluido el departamento de Norte de Santander (Ramos & Rico, 2023). Mientras esta actividad ha contribuido significativamente al desarrollo económico local y nacional, también ha suscitado preocupaciones en cuanto a su impacto ambiental (Rodríguez *et al.*, 2018). Las fuentes hídricas y quebradas, como la Cucalina en el municipio de Pamplonita, desempeñan un papel fundamental en la sostenibilidad ecológica, económica y el desarrollo de la región, siendo particularmente sensibles a las perturbaciones antropogénicas.

En el municipio de Pamplonita, se registran 3 títulos mineros de carbón que presentan licencia ambiental de acuerdo a el censo de catastro minero (ANM, 2023) uno de ellos la minería de santa helena. En otra instancia para el año 2021 de acuerdo a la base de datos en la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) indico un registro de producción total de 1.320 toneladas de carbón propias del municipio Pamplonita.

2.4.3.1 Mina Santa Elena

La minera Santa Helena se encuentra ubicada en la vereda San Antonio del municipio de Pamplonita presentando consigo licencia ambiental N° 01080 y contrato de concesión No 4596 para la exploración y explotación del carbón en los términos y condiciones establecidos en la ley “Código de Minas”

2.5 Macroinvertebrados bentónicos como indicadores biológicos

Según Ladrera y Rieradevall (2013) definen a la comunidad de macroinvertebrados como:

“Aquellos organismos invertebrados con un tamaño superior a 500 μm habitantes en algún momento de ciclo de vital inmaduro (lavas o huevo) de hábitat acuático mientras los adultos suelen ser terrestres, siendo los más ampliamente distribuidos en aguas dulces los insectos (p.3).

En este marco de ideas, la comunidad de macroinvertebrados tiene sin duda alguna importancia en los ecosistemas acuáticos radicando su importancia en la capacidad sedentaria de las familias, donde la presencia o ausencia a ciertos factores fisicoquímicos del cuerpo de agua, explican su dominancia en ciertos microhábitats (Terneus-Jácome & Yáñez, 2018) sirviendo de tal manera como excelentes indicadores biológicos.

2.5.1 Principales ordenes de Macroinvertebrados

2.5.1.1Ephemeroptera

Los efímeros se caracterizan principalmente por poseer un estadio terrestre volador previo a la clase adulta, presenciar morfológicamente branquias plumosas en posición ventral, dos o tres colas largas conocidas como filamentosos o cercos terminales y seis patas segmentadas en la sección media del cuerpo delgado alcanzando longitud de hasta 3 cm (Stroud & Bó, 2011), su comportamiento es altamente susceptibles a cambios ambientales siendo un orden importante para otros organismos interaccionando en ríos y arroyos (Flowers & De la Rosa, 2010).

Este orden presenta una metamorfosis incompleta llamada hemimetábolos, que consta de huevo, ninfa y adulto (Cárdenas López, 2022). Las hembras ponen sus huevos directamente en el agua en cualquier temporada del año a una cantidad aproximada de 400 y 1000 huevos cada una, la mayoría prevaleciendo sobre aguas torrentosas, limpias y con buena oxigenación, por ende, se considera uno de los mejores ordenes bioindicadores del agua.

El hábitat de los efimeros es ampliamente distribuido sobre piedras, arena o barro; sin embargo, las ninfas de las familias Ephemeridae y Polymitarcyidae excavan madrigueras en forma de “U” en las orillas de charcos y arroyos, ondulan sus branquias para producir corrientes dentro de las madrigueras y filtran partículas con las patas delanteras (Vásquez et al., 2009).

Entre las principales familias se encuentran: Baetidae, Leptophlebiidae, Leptohyphidae, Polymitarcyida, Eutyplocidae.

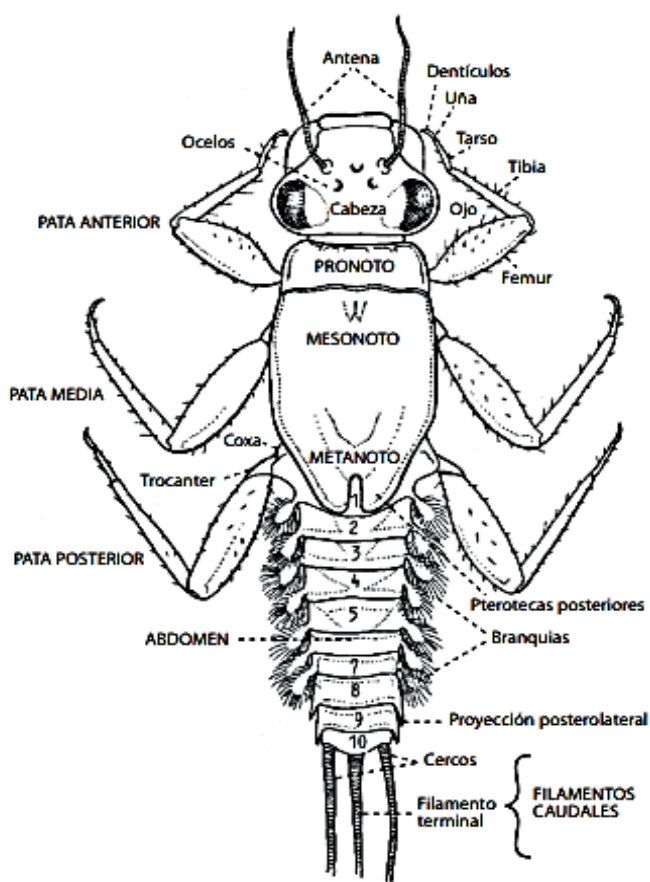


Figura 1. Vista y morfología general de ninfa de Ephemeroptera. (Domínguez *et al.* 1992)

2.5.1.2 Plecoptera

Los Plecopteros, coloquialmente llamados moscas de piedra incluye un número aproximado de 3.500 especies, con baja tolerancia a altas temperaturas y ciclo vital mixto

observándose etapas de vida acuática: Huevos y ninfas, y terrestres: imago o adulto (Gutiérrez-Fonseca, 2010). Morfológicamente se diferencian entre el orden Ephemeroptera por que las ninfas tienen dos cercos terminales, branquias torácicas, un par de uñas en cada pata dos antenas largas, y Seis patas segmentadas en la sección media del cuerpo en el que cada pata termina en uñas bifurcadas (Tamayo Lema, 2018)

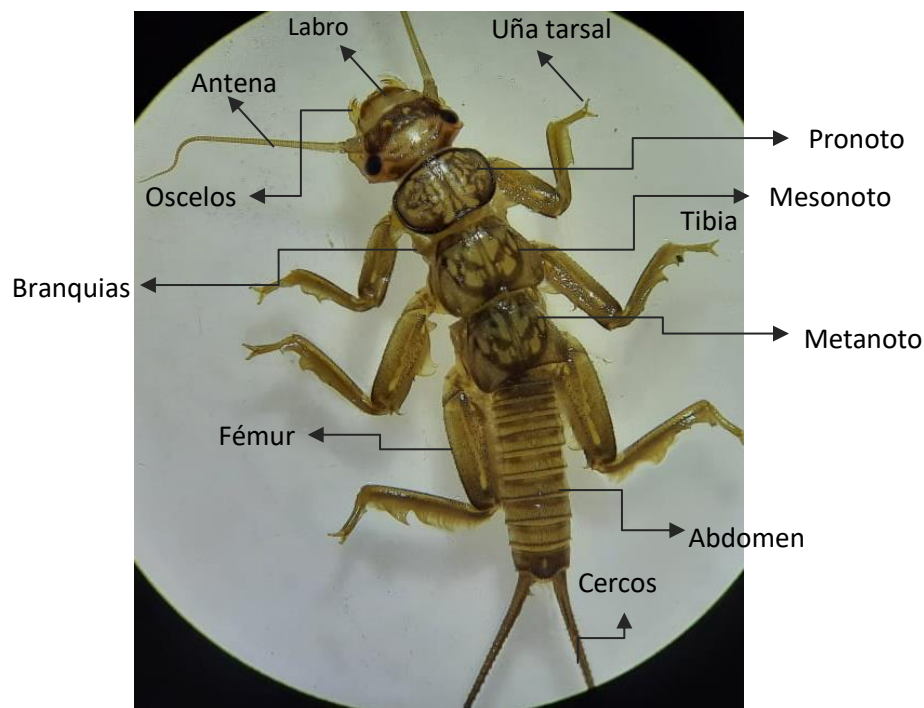


Figura 2. Vista y morfología general de Ninfa de Anacroneuria sp.

2.5.1.3 Tricoptera

Los Tricopteros son un orden de insectos fundamentales en los ecosistemas de aguas continentales, especialmente en aguas corrientes diferenciándose de los anteriores por su ciclo vital como insectos holometábolos ya que desarrollan estados de huevo, larva, pupa y adulto (González, 2019).

Sin embargo, la característica más relevante son sus alas estar cubiertas de pelos en lugar de escamas (aunque hay excepciones). Este orden sistemáticamente es perteneciente al superorden Amphiesmenoptera, que a su vez se divide en tres subórdenes: Annulipalpia, Spicipalpia e Integripalpia (Oliveros, 2020).

Su morfología diferencial a excepción de sus alas, es sus piezas bucales las cuales no forman una proboscis, aunque poseen palpos bien desarrollados, el tamaño de los adultos varía entre 2 a 30mm, y la mayoría son de colores oscuros de pigmentación café a negra (Springer, M.2010).

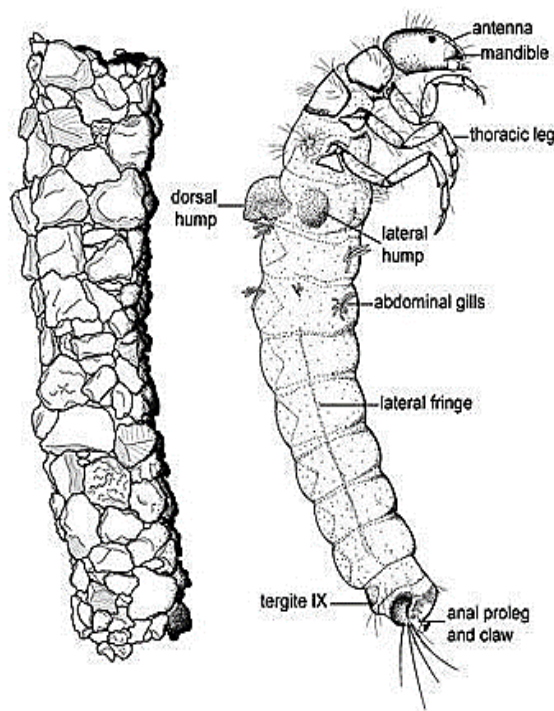


Figura 3. Vista y morfología general de Ninfa de Trichoptera. (Costas, 2014)

2.5.1.4 Odonata

Los Odonatos son un orden popular y extenso de la clase insectos, se distribuyen por todos los continentes a excepción de la Antártida, conociéndose alrededor de 6330 especies

(Paulson et al., 2021) los cuales pertenecen y se clasifican en tres subórdenes: Zygoptera, Anisoptera (fig.4) y Anisozygoptera: representados por un único género, Epiophlebia (Rivas Torres, 2020)

El estado adulto se distingue como libélulas o caballitos los cuales son de hábitat terrestres, mientras su estado inmaduro de ninfa pertenece netamente a hábitats acuáticos presentando morfología distinguible en su cabeza rectangular, con ojos compuestos grandes, un par de antenas filiformes pequeñas, tres ocelos en la parte anterior, aparato bucal especializado presentando un labio modificado que forma una máscara plegadiza ubicada bajo la cabeza, el tórax es de forma semejante a la del adulto sobresaliendo esbozos alares, finalmente el abdomen es elongado llevando en su ápice tres láminas branquiales: Zigópteros, o tres cercos en forma de gancho: Anisópteros (Carvajal, 2020).

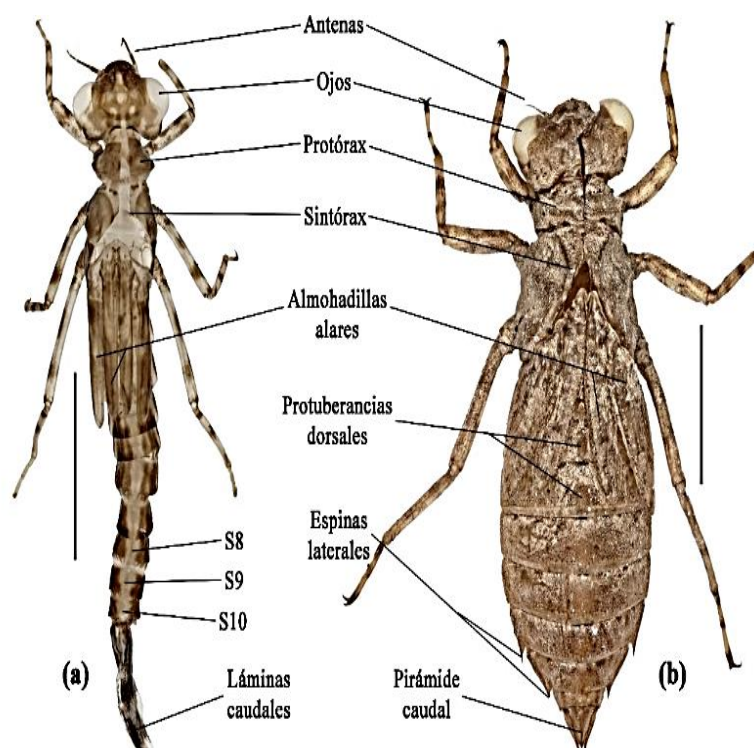


Figura 4. Vista y morfología general de Ninfa de Odonata (a) *Argia inculta* (Zygoptera). (b) *Brechmorhoga praecox* (Anisoptera). (Meléndez Quinto, 2018)

2.6 Índices bióticos

Los índices bióticos (IB), tal como lo menciona Leiva en el (2020) son ampliamente utilizados para estimar por medio de taxones biológicos las condiciones actuales de un ecosistema a partir del nivel de tolerancia o sensibilidad a las perturbaciones del ambiente pudiendo ser respaldados por estudios físicos y químicos del ambiente (Merino et al., 2020)

Es de esta manera que al considerar las características fundamentales de los macroinvertebrados y la composición biológica se utilizan varios índices para la determinación de la calidad del agua, encontrándose principalmente el Biological Monitoring Working Party (BMWP/COL) , el Índice Average Score Per Taxa (PTE) y el Índice Biológico por Familia (IBF).

2.6.1 Biological Monitoring Working Party (BMWP/COL)

El BMWP es un índice biótico básico en calidad de aguas asociado a los macroinvertebrados, desarrollado generalmente en el siglo XX a partir de la década de los años setenta en Europa. No obstante, en pleno siglo XXI aún se continúa abordando sobre el continente latinoamericano con adaptaciones propias de cada región o país (Jara Valverde, 2020).

El principio básico de la adaptación del índice BMWP/Col es basado en asignar puntajes específicos para cada uno de las familias de macroinvertebrados identificados, teniendo como prevalencia datos cualitativos de presencia o ausencia de modo que los puntajes (tabla 3) siendo las familias más sensibles como Odontoceridae del orden Trichoptera y Perlidae del orden Plecoptera sensibles a la contaminación orgánica con puntaje de 10 o cercano a este valor (Tobias-Loaiza & Guzmán-Soto, 2022), mientras que las menos sensibles tienen una puntuación

cercana o de 1 las cuales corresponderían a las familias más tolerantes a los cambios (Sánchez Rodríguez & García Martínez, s/f)

Tabla 3.

Puntaje de familias macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Col (Roldán, 2016)

Familia	Puntaje
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae.	10
Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae.	9
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae.	8
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossossomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae.	7
Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Hydropsychidae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae.	5
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolycopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae.	4
Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae	3
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae.	2
Tubificidae	1

Al obtener la sumatoria total de familias de macroinvertebrados presentes, se compara con las distintas clases de calidad del agua en la adaptación del índice BMWP/COL (tabla 4).

Tabla 4.

Calidad biológica del agua - Índice BMWP/Col (Roldán, 2016)

CLASE	CALIDAD	BMWP/Col	SIGNIFICADO	COLOR
1	BUENA	>150	Aguas muy limpias	AZUL VERDE AMARILLO NARANJA ROJO
		101-120	Aguas limpias	
2	ACEPTABLE	61-100	Aguas ligeramente contaminadas	
3	DUDOSA	36-60	Aguas moderadamente contaminadas	
4	CRITICA	16-35	Aguas muy contaminadas	
5	MUY CRITICA	<15	Aguas fuertemente contaminadas	

2.6.2 Índice Biológico de Familias (IBF)

Haciendo referencia a su denominación, este índice permite emplear porcentajes de tolerancia para todas las familias encontradas, variando en un rango de 0 a 10. En esta escala, Los valores de tolerancia para cada familia varían entre 0 (taxón sensible) y 10 (taxón tolerante). El cálculo se efectúa haciendo la sumatoria del producto del número de individuos encontrados por cada familia por el valor de tolerancia respectivo de esa familia, dividido entre el número total de individuos de la muestra.

Este índice se destaca por su alta sensibilidad a la contaminación orgánica y tiene como objetivo principal realizar evaluaciones de la calidad del agua en cuerpos acuáticos ubicados en sitios predefinidos (Álvarez & Tonalmitzin, 2022)

Tabla 5.

Porcentaje estipulado del índice IBF para la calidad de agua (Carter et al., 2017)

VALOR PORCENTUAL	GRADO DE CONTAMINACIÓN
0.00-3.75%	Agua limpia. Contaminación orgánica baja probable
0.76-4.25 %	Con leve contaminación orgánica
4,26-5,00 %	Con algo de contaminación orgánica
5,01-5,75 %	Contaminación orgánica presente
5,76-6,50 %	Alta contaminación orgánica
6,51-7,25 %	Fuerte contaminación orgánica
7,26-10,00 %	Contaminación orgánica severa

2.6.3 Índice EPT

Este índice se fundamenta en tres órdenes de macroinvertebrados particularmente sensibles a la contaminación incluyendo a los órdenes de insectos acuáticos Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, según la clasificación propuesta por Carrera y Fierro (2001). La presencia y abundancia de estos macroinvertebrados en un ecosistema acuático, es clave en la estimación de salubridad en cuerpos de agua, ya que suelen ser afectados significativamente por alteraciones. El cálculo, se basa en dividir el número de EPT recolectados en la muestra para la cantidad total de macroinvertebrados (Mosquera Restrepo & Peña Salamanca, 2021).

Tabla 6.

Porcentaje estipulado del índice EPT para la calidad de agua (Carrera & Fierro, 2001).

PORCENTAJE EPT	CALIDAD DEL AGUA
75-100%	Muy buena
50-74 %	Buena
25-49 %	Regular
0-24 %	Mala

2.6.4 Biodegradabilidad del agua

Últimamente se es necesario incluir el índice de biodegradabilidad del agua en el diseño de tratamientos en aguas contaminadas al hacer relación de la demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno (DBO5/DQO) en donde valores inferiores a 0,2 indican biodegradabilidad baja, de manera paralela a una biodegradabilidad normal los valores se ajustan de 0,2 a 0,4 y finalmente superior de los 4 una biodegradabilidad alta. (Garavito, *et al* 2020).

2.7 Métodos estadísticos

2.7.1 Análisis de redundancia

El análisis de Redundancia es un análisis estadístico el cual tiene como objetivo cuantificar la validez de la relación, en este caso entre los dos conjuntos de variables; dependiente e independiente (Badii & Castillo, 2007)

2.7.2 Perfiles de diversidad

El análisis por medio de perfiles de diversidad es basado en análisis de diversidad de orden cero (Q0), o riqueza de especies, diversidad de orden uno (Q1), el cual representa el exponencial de la entropía del índice Shannon y la diversidad de orden dos (Q2), que es el inverso del índice Simpson así como índices de Inequidad para determinar sobre un estudio qué tan diferentes fueron las estaciones de muestreo (Olarte-Quiñonez *et al.*, 2021).

2.7.3 Análisis de varianza

El análisis de varianza es un conjunto de técnicas estadísticas con gran utilidad y ductilidad jugando un papel importante cuando hay más de dos grupos que necesitan ser comparados, cuando hay mediciones repetidas en más de dos ocasiones, cuando los sujetos pueden variar en una o más características que afectan el resultado y se necesita ajustar su efecto (Dagnino, 2014).

2.7.4 Correlación canónica (CCA)

El Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) es aquel análisis multivariado en el que permite relacionar en cualquier estudio ambiental la abundancia de especies con las variables del entorno (Ter, 1986). Sin embargo, no solo en investigación es apetecido la correspondencia canónica, ya que es posible usar este método en otros dominios. Como por ejemplo El análisis demográfico y el geomarketing pueden igualmente beneficiarse del mismo (Hernández-Navarro & Sánchez-García, 2020).

2.7.5 Clúster Bray-Curtis

El índice de Bray–Curtis se considera como una medida de la diferencia entre las abundancias de cada especie presente (Brower *et al.*, 1998) , se expresa mediante:

$$I_{BC} = 1 - \frac{\sum(X_I - Y_I)}{\sum(X_I + Y_I)}$$

Donde:

x_i abundancia o densidad de especies

i en un conjunto 1

y_i abundancia de las especies en el otro

2.8 Parámetros Fisicoquímicos

2.8.1 pH

El pH al ser uno de los parámetros fisicoquímicos indispensables del agua, brinda información valiosa a cerca de la dinámica de un cuerpo de agua resaltando la acidez o alcalinidad del de la misma, soportado en una escala logarítmica con valores de 0 a 14

interpretando la acidez como disminución de pH y alcalinidad aumento del mismo, químicamente se denota como la concentración de iones de hidrógenos en la misma. (3140sp - *Saguridas y salud en el trabajo - Folleto Informativo pH ¿Qué es el pH?, s/f*)

2.8.1 Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica juega un rol importante en la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica siendo expresada como siemens por metro (S/m), este parámetro se relaciona con la concentración de sales en disolución cuya disociación genera iones capaces de transportar la corriente eléctrica sin embargo la solubilidad de esas sales en el agua depende un factor importante como la temperatura, por lo que la conductividad varía en conformidad con la temperatura del agua (Castro & Alvarado, 2018).

2.8.2 Color

El color al ser considerado como una de las propiedades organolépticas del agua es influido por la presencia de material disuelto, suspendido o coloidal (Trujillo & Cajigas, 2018). En este sentido, puede ser el resultado de la descomposición de la materia orgánica provocado por la presencia de iones metálicos como el hierro y magnesio, así como el vertimiento de diversos tipos de afluentes industriales (Prado et al., 2017)

2.8.3 Turbidez

La turbidez por su parte, es señalada como medida en el que da a conocer la cantidad de partículas en suspensión en el agua, siendo participes, sedimentos en suspensión y materia orgánica contaminantes que pueden enturbiar un cuerpo de agua. Por otra parte, el incremento en el número de turbidez puede provocar erupción natural pudiendo afectar lechos y transportar contaminantes patógenos, así como también nutrientes (AGUAS, P. P. E., & TRATADAS, R. D. N. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales)

2.8.4 Dureza

La dureza en el agua se representa como una cantidad de metales alcalinotérreos fundamentalmente calcio y magnesio provenientes de la disolución parcial de rocas y minerales, Su forma de expresión más conocida es en mg/L como carbonato de calcio (Castro & Alvarado 2018).

2.8.5 Alcalinidad

En relacion a la variable de alcalinidad se encuentra estrechamente relacionado con el pH y se define como la capacidad del cuerpo del agua en neutralizar o regular cambios en acidez (Sigler & Bauder, 2017).

2.8.6 DQO

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es uno de los parámetros más apetecidos por analistas hidrológicos en el que este Parámetro determina la cantidad de oxígeno requerido permitido por el cuerpo hídrico para oxidar la materia orgánica de las sustancias disueltas en suspensión en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo utilizándose tal parámetro fisicoquímico para medir el grado de contaminación. (C. Rodríguez *et al.*, 2007)

2.8.7 DB05

La demanda Biológica de Oxigeno es otro de los ensayos más importantes para analizar el grado de perturbación contaminante hídrica, analizando consigo la concentración de la materia orgánica de aguas residuales por medio del ensayo de DBO en un periodo de cinco días a 20 °C a determinando la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas (Navarro *et al.*, 2007)

3. OBJETIVOS

3.1 General

Evaluar el efecto de la minería carbonífera sobre la calidad del agua de la quebrada La Cucalina, mediante la asociación de los macroinvertebrados bentónicos con parámetros fisicoquímicos en el municipio de Pamplonita, Norte de Santander, Colombia

3.2 Específicos

- Estimar la diversidad de macroinvertebrados bentónicos (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera y Odonata) presentes en la quebrada La Cucalina del municipio de Pamplonita Norte de Santander, Colombia
- Analizar las propiedades fisicoquímicas de la quebrada La Cucalina del municipio de pamplonita Norte de Santander, Colombia
- Establecer la relación de macroinvertebrados bentónicos y parámetros fisicoquímicos con base a índices biológicos en la quebrada La Cucalina del municipio de pamplonita Norte de Santander, Colombia

4.MATERIALES Y METODOS

4.1 Área de estudio

La investigación realizada se llevó a cabo en la quebrada La Cucalina ubicada en la vereda San Antonio del municipio de Pamplonita, Norte de Santander, Colombia (Figura 5), abarcando unidad de superficie de 50,60 km² con localización geográfica del bosque montano bajo presentando cobertura abierta con coordenadas de 7°27'24,27" a 7°28'1,86" latitud norte y 72°36'4,02" a 72°38'6,45" longitud occidente, (E.O.T, 2016) altitud de 1.722 m.s.n.m y precipitaciones anuales de 1.000 a 1.500 mm, asimilando temperaturas oscilantes de 18 a 24 °C. Su ubicación es en el sur-oriente del departamento Norte de Santander, limitando al norte de Bochalema, al sur del municipio de Labateca y al nororiente del municipio de Toledo,

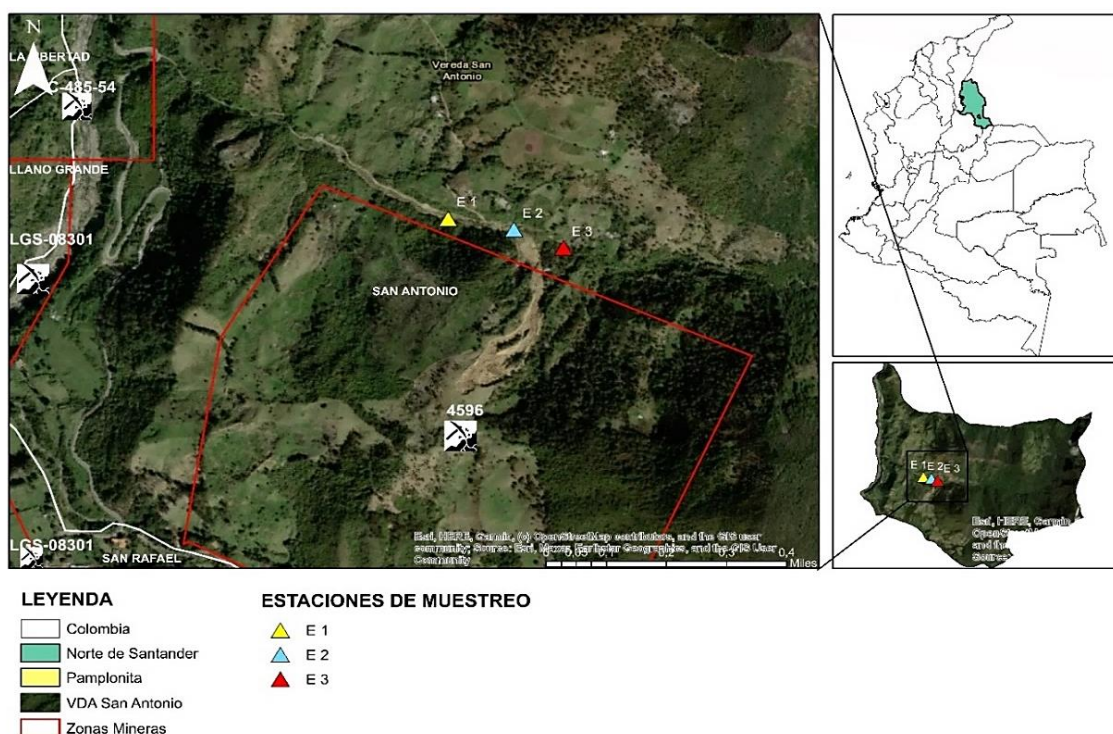


Figura 5. Mapa de la vereda san Antonio (verde claro- satelital) con zonas mineras vigentes (marco rojo) en el municipio de pamplonita (amarillo) del departamento norte de Santander (azul) de Colombia (blanco). Realizado en Arcgis versión 10.6

4.2 Fase de campo

4.2.1. Toma de registro

El muestreo se llevó a cabo durante la época seca, puntualmente los días 08 y 14 de febrero, así como el 21 de marzo del año 2023. Durante tres muestreos realizados semanalmente, se obtuvo registro de tres estaciones utilizando un GPS marca Garmin en el que la primera estación fue ubicada aguas abajo, e identificada con las siglas AG-AB. La segunda estación se localizó en el área de lixiviado minero, siendo designada con las siglas LIX. Finalmente, la tercera estación se posicionó aguas arriba del lixiviado minero y se identificó con las siglas AG-AR. Se obtuvieron nueve repeticiones por día de muestreo con esfuerzo de campo triplicado por estación, obteniendo 27 réplicas en total y 224 minutos por día de muestreo.

La toma de coordenadas fue posicionada la primera estación (AG-AB) a distancia de 150 metros aguas abajo del primer vertimiento minero con coordenadas de 07°27'46.5"N 072°37'35.3"W, la segunda estación (LIX) a 10 metros de distancia aguas abajo del vertimiento minero con coordenadas 07°27'45.5"N 072°37'29.6"W para la tercera y última estación (AG-AR) estar posicionada a 150 metros de distancia respecto al vertimiento minero en dirección aguas arriba 07°27'43.8"N 072°37'25.3"W abarcando un total de 300 metros analizados del cuerpo de agua en relación a la minera.

4.2.2 Monitoreo biológico de macroinvertebrados bentónicos

La colecta de macroinvertebrados bentónicos se realizó los días 08 - 14 de febrero y 21 de marzo del año 2023 en las coordenadas previamente establecidas, en el que se utilizó como instrumento principal de colecta se utilizó la red Surber con medidas de 31 x 31 cm durante 15 minutos por cuadrante flotante de PVC de 1m² en contra del flujo de cuerpo de agua, realizando turbidez sobre el afluente con el propósito de extraer a flote los macroinvertebrados bentónicos

presentes en los sustratos de vegetación y rocas (Figura 6) para ser depositados en la red Surber (Machado, *et al* 2018).

Luego se retiró y limpio, tanto el sustrato orgánico como inorgánico dentro de la red de manera manual, con el uso de un colador depositando los residuos en bolsas Ziploc de poliestireno con sello hermético. Seguidamente, se procedió a fijar las muestras utilizando solución pampel en proporción 1/3 partes ; una parte de solución y 3 partes de agua y el total de sedimentos (Juárez Ortiz, *et al* 2018). En este orden de pasos, las muestras fueron etiquetadas con información detallada que incluía la localidad, municipio, coordenadas, estación de muestreo, altitud, código de muestra, fecha, hora y nombre del colector, en el que finalmente se preservaron en el laboratorio de entomología de la Universidad de Pamplona con alcohol al 75% de concentración (Macias Diaz, 2021)



Figura 6. Recolecta de muestras biológicas.

4.2.3 Monitoreo de parámetros fisicoquímicos

4.2.3.1 Monitoreo *ex situ*

En relación a la toma de parámetros fisicoquímicos *ex situ*, sobre cada estación : AG-AB, LIX y AG-AR se tomó por duplicado 1.000 mL de manera compuesta en contracorriente la toma de la parte fótica y afótica del cuerpo de agua, sobre envases plásticos debidamente esterilizados, en el que fueron transportados al laboratorio de control y calidad de la Universidad de Pamplona en el que se analizó la demanda biológica de oxígeno (DBO), dureza, alcalinidad, cloruros, fosforo, nitritos, nitrógeno amoniacal, sulfato, hierro, solidos totales y suspendidos totales.

De manera similar, se tomaron 300 mL sobre el envase de vidrio en el cual para la toma DQO se adiciono 1 gota de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 97 % de concentración, luego se realizó su respectiva rotulación con datos de la estación como localidad, municipio, coordenadas, estación de muestreo, altitud, código de la muestra, fecha, hora y nombre del colector. Posteriormente, fueron transportadas a el laboratorio de control y calidad de la Universidad de Pamplona.

4.2.3.1 Monitoreo *in situ*

El uso directo de un multiparámetro 5 en 1 modelo 9909-SP (Figura 7) fue implementado sobre las tres estaciones, tomando registros de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), salinidad (PPM) y total de solidos disueltos (PPM).



Figura 7. Multiparámetro 5 en 1 modelo 9909-SP (A) partes (B) aplicación en campo.

4.2.4 Monitoreo microbiológico

Se realizó la toma de muestras microbiológicas sobre las tres estaciones empleando frascos de vidrio previamente esterilizados efectuando de manera compuesta en el cuerpo de agua: parte fótica y afótica, Seguidamente al ser debidamente sellados, rotulados y conservados a bajas temperaturas, se transportaron hasta el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona.

4.3 Fase de laboratorio

4.3.1 Monitoreo biológico de macroinvertebrados bentónicos

Las muestras biológicas depositadas en campo sobre bolsas ziploc, fueron separadas paulatinamente en el laboratorio de entomología de la Universidad de Pamplona sobre bandejas y cajas de petri, descartando el material orgánico e inorgánico y procediendo a la identificación con el estereoscopio Stime DV4 de luz blanca utilizando oculares de 25X y 10X junto al uso de guías taxonómicas internacionales como la guía de macroinvertebrados de la provincia de

orellana (A. Pérez et al., 2016) y nacionales e ilustrativas del departamento de Antioquia (Roldan, 1988) identificando los morfotipos hasta su taxon de género, distanciandolos de los demás registrando la abundancia y riqueza de cada uno de ellos por estación.

Finalmente, los individuos biológicos se conservaron en viales con alcohol etílico al 75% en donde fueron rotulados y almacenados en el laboratorio de la Universidad de Pamplona.

4.3.2 Monitoreo de parámetros fisicoquímicos *ex situ*

Las pruebas fisicoquímicas ejecutadas en el laboratorio de control y calidad de la Universidad de Pamplona fueron realizadas de acuerdo a los siguientes protocolos:

4.3.2.1 Alcalinidad

Con el método de titulación se añadió a 50 mL de la muestra colectada, 2 gotas de naranja de metilo en un erlenmeyer en el que se adiciono gota a gotas ácido sulfúrico H_2SO_4 al 0.02 N, agitando simultáneamente hasta la observación de coloración naranja intenso (Figura 8B)

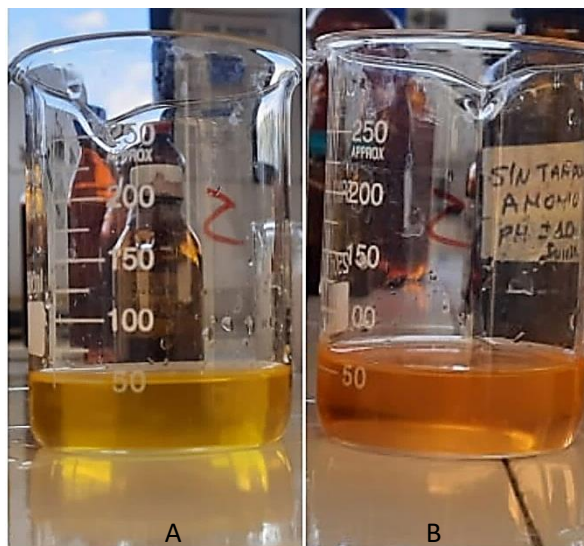


Figura 8. Prueba de alcalinidad (A) coloración inicial (B) Coloración final.

4.3.2.2 Dureza

Se tomó 50 mL de la muestra colectada del cuerpo de agua a un vaso de precipitado adicionando solución tampón de amonio al 0.5 de pH y 2 gotas de negro de ericomo T. Luego, con el método de titulación se procedió a adicionar poco a poco EDTA al 0.001 M hasta pasar de pigmentación purpura a azul (Figura 9)

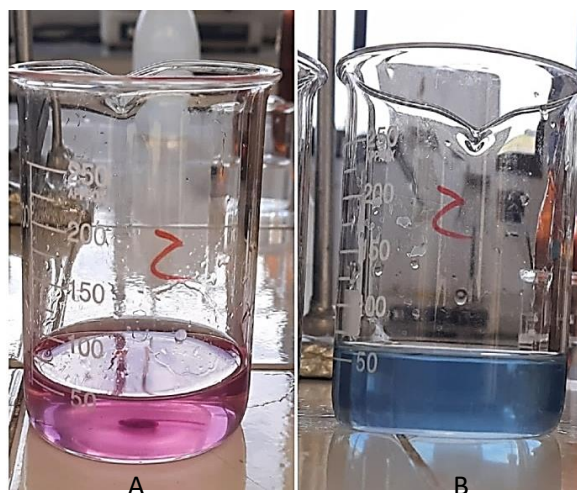


Figura 9. Prueba de dureza (A) coloración inicial (B) Coloración final.

4.3.2.3 Demanda química y biológica de oxígeno (DQO-DBO5)

Para la demanda química de oxígeno (DQO) se utilizó el método de reflujo cerrado, añadiendo 1.5 mL de solución digestora de dicromato de potasio ($\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) a 2.5 mL de muestra en tubos de ensayo en el que se adicionó 2.5 mL de catalizador llevando a un termociclador TR 300 marca merck por 2 horas, analizando las muestras con el uso del espectrofotómetro Hach vis DR 3800.

Por otro lado, para la determinación de DBO5 se utilizaron 400 mL de muestra en el que se adiciono 1 gramo de hidróxido de sodio (NaOH) y tres gotas de inhibidor nitrificante.

4.3.2.4 Cloruro

Con el método de titulación se añadió a 50 mL de muestra, 3 gotas de Cromato de potasio (K_2CrO_4) en un Erlenmeyer en el que se adiciono gota a gotas nitrato de plata (AgNO_3) al 0.01 M, agitando simultáneamente hasta la observación de coloración rojo ladrillo (fig. 10).



Figura 10. Prueba de cloruros. (Fuente: autor)

4.3.2.5 Sólidos totales

Para la determinación de los sólidos totales (ST) se llevó a cabo la evaporación de 30 mL de muestra de agua en el que fueron contenidos sobre recipientes de crisol y efectuando una

temperatura de 116°C con el uso de la Mufla Vulcan 3-550 (fig. 11). Seguidamente, se registró el peso en mg/L con una balanza analítica

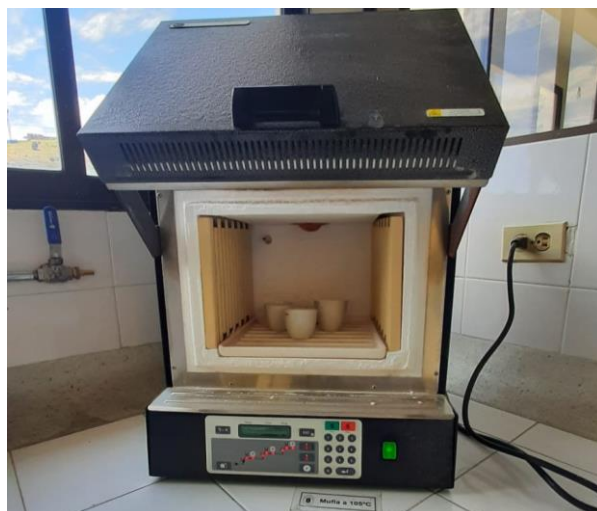


Figura 11. Evaporación para sólidos totales con Mufla Vulcan 3-550.

4.3.2.6 Nitrito

La prueba de Nitrito, se realizó por duplicado en el espectrofotómetro ubicando la primera celda con agua destilada como blanco control y la segunda celda con 10 mL de la muestra de agua a analizar más 3 gotas de colorante de nitritos, se registraron los valores reportados por el software.

4.3.2.7 Sulfato

En el análisis de sulfato, se tomaron 10 mL de la muestra problema en un vaso de precipitado añadiendo 2.5 mL de solución tampón B en el que paulatinamente se le adicionaba una pequeña porción de Cloruro de Bario (BaCl_2), finalmente se llevó al espectrofotómetro y se registró los valores reportados por el espectrofotómetro (fig 12-B).



Figura 12. Prueba de sulfato. A) 1 celda control, 2 celda muestra de agua. B) Espectrofotómetro.

4.2.3.8 Nitrógeno amoniacal

Para la determinación de nitrógeno amoniacal mediante el método Nessler (método Hach 8038) se utilizó 10 mL de muestra de agua adicionándole 2 gotas de estabilizador mineral agitándolos la solución en la que seguidamente se le añadió 0.5 mL de reactivo Nessler y llevando la muestra a el espectrofotómetro en un envase de celda de cuarzo registrando los valores proporcionados.

4.3.2.9 Color

Para la toma de la cuantificación del Color en unidades platino cobalto, en el que se llevó a cabo con el uso del espectrofotómetro por duplicado, ubicando la primera celda con agua destilada como blanco control y la segunda celda con 10 mL de la muestra de agua a analizar.

4.3.2.10 Turbidez

El registro de la turbidez se realizó depositando 10 mL de la muestra en una celda y agitando vigorosamente para ser registrado el dato en la primera lectura del equipo turbumetrico Hach 2100N.

4.3.3 Análisis de datos

Se registró el número de especies por estación y la sumatoria total de individuos en el estudio, con el fin de evaluar la representatividad del muestreo por medio de curvas de completitud basadas en rarefacción empleando el estimador propuesto por Chao y Jost (2012) en programa online iNext (Hsieh *et al.*, 2016)

Se llevó a cabo un análisis de diversidad alfa utilizando perfiles de diversidad y empleando los llamados números equivalentes o números de Hill, basados en los órdenes de diversidad. Para ello, se utilizó la diversidad de orden cero (0D), que representa la riqueza de especies; el orden uno (1D), que corresponde al valor exponencial del índice de Shannon, teniendo en cuenta las especies más comunes en el muestreo; y el orden dos (2D), que representa el inverso de Simpson y muestra las especies más abundantes de cada género (Jost *et al.*, 2010).

Por otro lado, se diseñó la gráfica Rango-abundancia con base al logaritmo 10 en el programa Excel para visualizar la distribución de los géneros en cuanto a riqueza y abundancia de las estaciones.

En este orden de ideas, se hizo uso de índices bióticos para estimar el grado de contaminaciones orgánicas indicando la calidad de los cuerpos de agua con el uso de la adaptación para Colombia Biological Monitoring Working Party, “BMWP/Col” a cada estación (Roldan, 2016). Así mismo, índices EPT e Índice Biológico por Familia (IBF).

Por otro lado, con los valores fisicoquímicos fueron resaltadas las variables fisicoquímicas con más significado para evaluar la contaminación del agua en la quebrada la Cucalina sobre los tres puntos estratégicos: Antes (AG-AR), Durante (LIX) y después (AG-AB) del vertimiento minero obteniendo una visión integral de las variaciones y transformaciones que experimenta el cauce a medida que fluye a través de la quebrada. Al fraccionar la demanda biológica de oxígeno con la demanda química de oxígeno (DBO5/DQO) se calculó el índice de Biodegradabilidad del agua, estimando alta, normal o baja Biodegradabilidad del agua por parte de los contaminantes presentes en cada estación, los cuales valores inferiores a 0,2 indican una biodegradabilidad baja, de manera paralela a una biodegradabilidad normal los valores se ajustan de 0,2 a 0,4 y finalmente a un índice superior de los 4 una biodegradabilidad alta. (Garavito-Bermúdez *et al.*, 2020)

Los datos microbiológicos fueron analizados por el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) para cada una de las estaciones realizando diluciones seriadas en busca de la concentración de las unidades microbiológicas.

Finalmente, en el programa estadístico Past V 4.08 se realizó análisis de correlación canónica (ACC) y análisis de Cluster Bray-Curtis, el primer análisis tomó las variables fisicoquímicas relacionándose con la presencia de la biota, explicando el 81.32% de las variables fisicoquímicas que se relacionaron con los insectos acuáticos estudiados y el segundo análisis correspondiente al Cluster Bray-Curtis Para comparar la similitud de la composición de macroinvertebrados en las tres estaciones de muestreo se realizó un análisis de Clúster.

5. RESULTADOS

5.1 Caracterización taxonómica de macroinvertebrados bentónicos

Se obtuvo un registro total de 706 individuos distribuidos en ocho familias y nueve géneros. De manera que, para el orden Ephemeroptera se registraron 243 individuos en la estación AG-AR, 12 individuos en la estación LIX y 15 individuos en la estación AG-AB para un total de 270 individuos representados en tres familias con sus respectivos géneros. Para el orden Plecóptera se registraron 243 individuos en la estación AG-AR, 9 individuos en la estación LIX y 3 individuos en la estación AG-AB para un total de 255 individuos representados en una familia con único género. Para el orden Tricoptera se registra 128 individuos en la estación AG-AR, 33 individuos en la estación LIX y 4 individuos en la estación AG-AB para un total de 165 individuos representados en tres familias y tres géneros. Para el orden Odonata no se registran individuos en la estación AG-AR y en la estación LIX sin embargo se da la presencia de 16 individuos en la estación AG-AB para un total de 16 individuos representados en dos familias y dos géneros.

En este sentido, el orden con mayor abundancia es Ephemeroptera con el 38% del total estudiado, seguido de Plecóptera con el 36.12 %, Tricoptera con el 23.38 % y finalmente Odonata con el 2.27%. Ahora bien, entre las familias encontradas Baetidae presenta una mayor abundancia con respecto a las demás con el 36.83% del total de la investigación, seguida de Perlidae con 36.12%, Hidropsychidae con 19.97%, Calamoceratidae con 3.40%, Libellulidae 1.42%, Calopterygidae y Leptophebiidae con 0.85%, y por ultima Oligoneuridae con 0.56%

5.2 Curva de completitud y rarefacción

En el análisis de curva de completitud se da a consideración el esfuerzo de muestreo con un 99% general en todas las estaciones, es así que la gráfica (fig.13) resalto mayor representatividad de los morfotipos en la estación AG-AR, seguida de la estación LIX y por último con menor riqueza estimada la estación AG-AB.

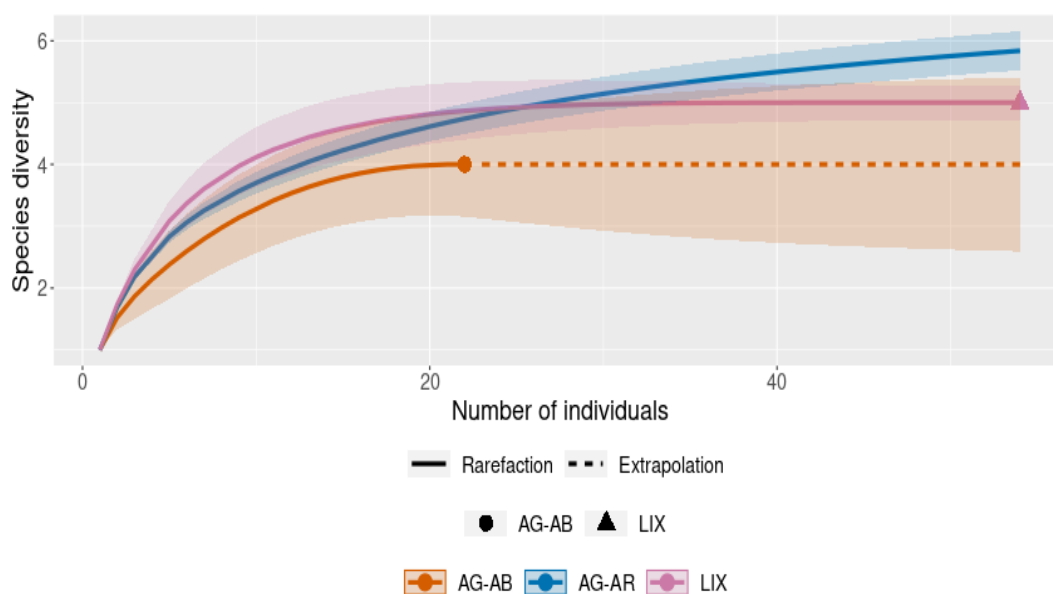


Figura 13. Curva de rarefacción de riqueza y abundancia para el ensamblaje de la comunidad macroinvertebrados acuáticos en las diferentes estaciones de muestreo. AG-AB: aguas abajo del lixiviado minero; LIX: lixiviado minero; AG-AR: aguas arriba del lixiviado minero.

5.3 Índice de similitud Cluster Bray Curtis

El análisis de similitud Bray Curtis (Figura 14) mostró un coeficiente de correlación cofenética de 0.9932/1 correspondiente al 99,32 % en donde arrojo dos grupos diferenciados siendo el primero con el 53 % en similitud del total de los géneros encontrados junto a un Bootstrap de 100. El segundo grupo, con el 62% en similitud de los géneros compartidos entre las estaciones LIX y AG-AB junto a un Bootstrap de 94.

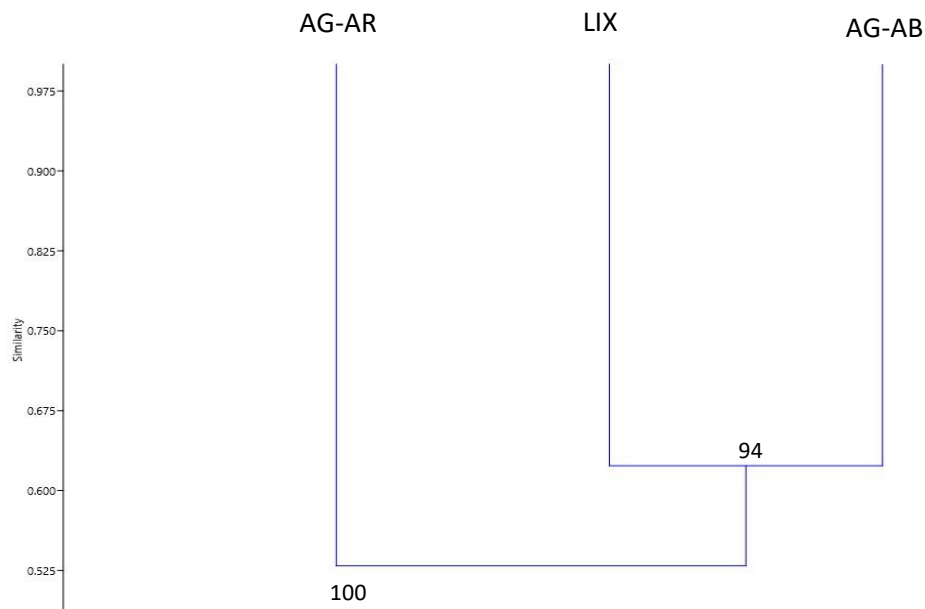


Figura 14. Dendrograma de clasificación para los macroinvertebrados basado en el Índice de similaridad Bray Curtis en las estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina de la vereda San Antonio en el municipio de Pamplonita. 2023

5.4 Perfiles de diversidad

El perfil de diversidad de orden cero (0D) mostró que la estación AG-AR cuenta con 7 especies efectivas, seguida de la estación LIX con 5 especies efectivas y por último 4 especies efectivas en la estación AG-AB. Para el orden uno (1D) la estación con mayor número de especies abundantes fue LIX con 4,21 especies efectivas, seguida de la estación AG-AR con 3,97 especies efectivas y por último 2,63 especies efectivas en la estación AG-AB. En este lineamiento de ideas, para la diversidad de orden dos (2D) se denota que la estación LIX presenta mayor dominancia con 3,62 especies efectivas, seguida de la estación AG-AR con 3,21 especies efectivas dominantes y finalmente AG-AB con 2 especies efectivas.

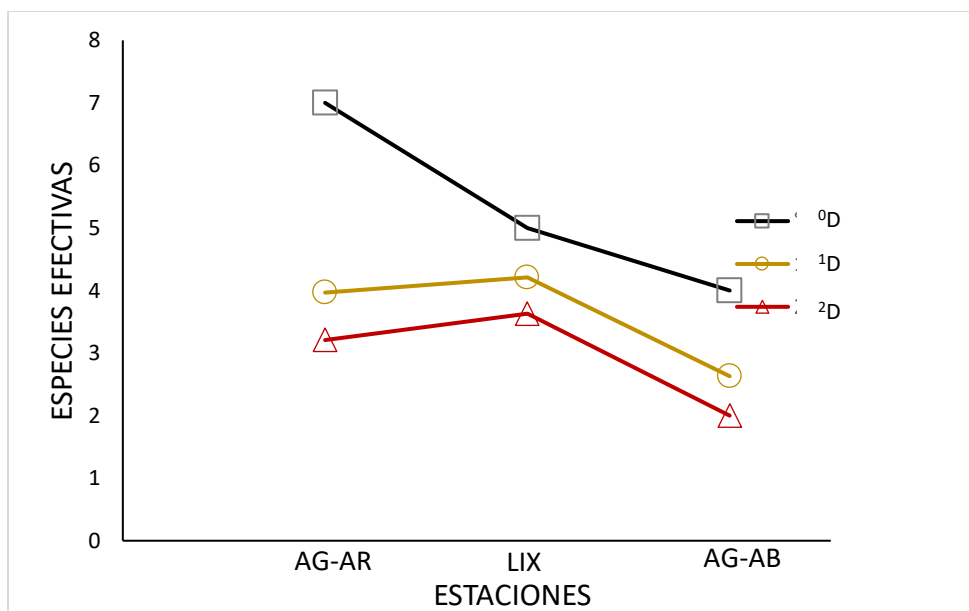


Figura 15. Perfil de diversidad alfa de Ephemeroptera, Plecoptera , Tricoptera y odonata Por estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina, Pamplonita Colombia, diversidad de orden cero (0D); diversidad de orden 1 ($1D$), diversidad de orden 2 ($2D$). Aguas arriba del lixiviado minero: **AG-AR**, lixiviado minero: **LIX**, aguas abajo del lixiviado minero: **AG-AB**.

5.5 Grafica rango-abundancia

Por otra parte, la gráfica de Rango-abundancia (Figura.16) mostro diferenciacion de los generos en cada una de las estaciones, de manera que la estación AG-AR presento nueve géneros, en donde se denota alta abundancia de *Anacroneuria* y *Baetodes* junto a la baja participación de *Thraulodes*, *Hetarina*, y *Lachania*.. Para la estación LIX, *Smicridea* fue el género más abundante de los cinco identificados. Finalmente, la distribución y abundancia de los géneros en la estación AG-AB presento poca participación con cuatro géneros totales.

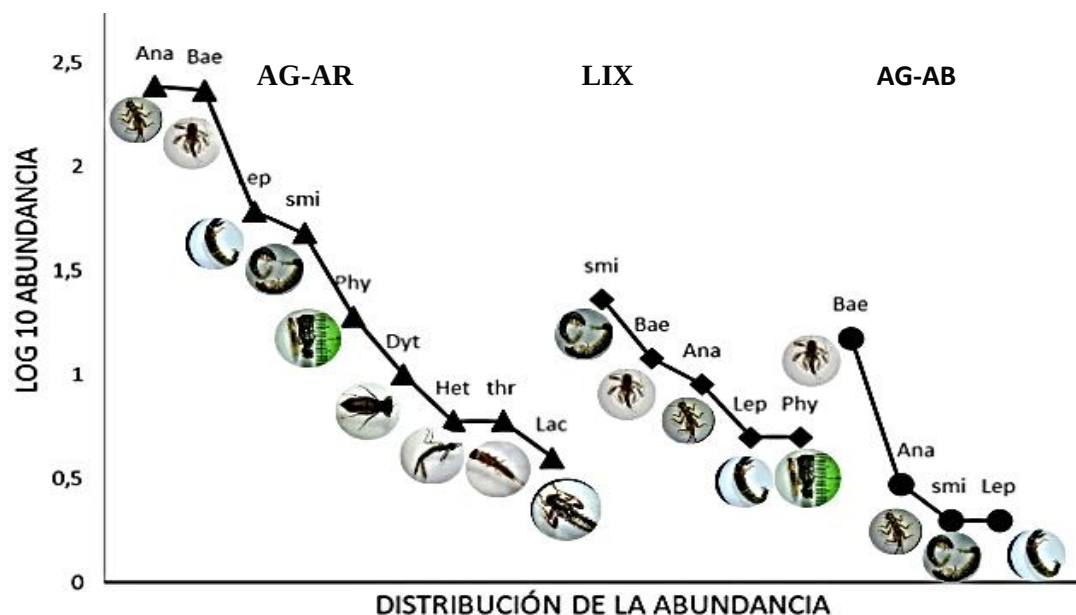


Figura 16. Curva de Distribución de abundancia de los géneros representados en las diferentes estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina. Aguas arriba del lixiviado minero: **AG-AR**, lixiviado minero: **LIX**, aguas abajo del lixiviado minero: **AG-AB**. Plecoptera:Perlidae:Anacroneuria (**Ana**), Ephemeroptera:Baetidae:Baetodes (**Bae**), Ephemeroptera:Leptophebiidae:thraulodes (**Tha**), Ephemeroptera, Oligoneuriidae:Lachlania (**Lac**) Tricoptera, Hidropsychidae:Leptonema (**Lep**) Tricoptera: Hidropsychidae:Smicridea (**Smi**), Tricoptera:Calamoceratidae:Phylloicus (**Phy**), Odonata:Libellulidae:Dythemis (**Dyt**), Odonata: Calopterygidae:Hetarina (**Het**).

5.6 Índices Bióticos

5.6.1 Índice BMWP/Col

Tabla 7.

Puntajes del BMWP/Col de familias macroinvertebrados presentes en cada estación de muestreo en la quebrada La Cucalina.

ORDEN	FAMILIA/PUNTAJE	GENERO	AG-AR	LIX	AG-AB
Plecoptera	Peridae (10)	Anacroneuria	X	X	X
	Baetidae (7)	Baetodes	X	X	X
Ephemeroptera	Leptophebiidae (9)	Thraulodes	X	X	
	Oligoneuriidae (10)	Lachlania	X		
Tricoptera	Hydropsychidae (5)	Smicridea	X	X	X
		Leptonema	X	X	X

Odonata	Calamoceratidae (10)	Phylloicus	X
	Libellulidae (6)	Dythemis	X
	Calopterygidae (7)	Hetarina	X

NOTA. Aguas arriba; **AG-AR**, Lixiviado; **LIX**, Aguas abajo; **AG-AB**.

Con respecto al índice BMWP/Col según la clasificación de Roldán, 2016 (tabla 4) en la estación AG-AR se identificaron nueve géneros representados en ocho familias obteniendo un puntaje de 64 determinando aguas ligeramente contaminadas, representadas por el color verde, perteneciente a la clase II, con calidad aceptable. Para la estación LIX, se identificaron cinco géneros representados en cuatro familias obteniendo un puntaje de 32 determinando aguas moderadamente contaminadas, representadas por el color amarillo, perteneciente a la clase III, con calidad dudosa. Finalmente, para la estación AG-AB se identificó 5 géneros representados en cuatro familias obteniendo un puntaje de 27 determinando aguas muy contaminadas, representadas por el color Naranja, perteneciente a la clase IV, con calidad Critica (Tabla 8).

Tabla 8.

Resultados de la calidad del agua en las estaciones de muestreo según el índice BMWP/Col en la quebrada La Cucalina del municipio de Pamplonita.

ESTACION	PUNTAJE	CALIDAD	SIGNIFICADO	COLOR
AG-AR	64	ACEPTABLE	Aguas ligeramente contaminadas	VERDE
LIX	32	DUDOSA	Aguas Moderadamente contaminadas	AMARILLO
AG-AB	27	CRITICA	Aguas muy contaminadas	NARANJA

NOTA. Aguas arriba; **AG-AR**, Lixiviado; **LIX**, Aguas abajo; **AG-AB**.

5.6.2 Índice EPT

Los porcentajes calculados en el índice EPT (Tabla 9), mostró cálculos del 88.98% para la estación AG-AR correspondiente en calidad buena. La estación LIX con el 7.82% presentando calidad mala compartiéndose este criterio de calidad con la estación AG-AB en el que obtuvo el 3.20%.

Tabla 9.

Resultados de Porcentajes calculados y calidad del agua según el índice EPT en la quebrada La Cucalina

ESTACION	PORCENTAJE CALCULADO	CALIDAD
AG-AR	88.98 %	MUY BUENA
LIX	7.82 %	MALA
AG-AB	3.20 %	MALA

5.6.3 Índice IBF

Tabla 10.

Valores calculados y grados de contaminación del índice IBF para la calidad de agua en la quebrada La Cucalina.

Según el índice biológico por familia (Tabla 9), mostró el valor calculado del 0.94 para la estación AG-AR correspondiente a grado de contaminación en aguas limpias. La estación LIX con el valor calculado del 3.92 presentó grado de contaminación orgánica leve. Finalmente, la estación AG-AB en el que obtuvo el valor calculado de 5.04 presento algo de contaminación orgánica.

ESTACION	VALOR CALCULADO	GRADO CONTAMINACIÓN
AG-AR	0.94	Agua limpia
LIX	3.92	Contaminación orgánica leve

AG-AB	5.04	Algo de contaminación orgánica
-------	------	--------------------------------

5.7 Determinación de variables fisicoquímicas

A continuación, se exhiben análisis fisicoquímicos *in situ* y *ex situ* por estación y muestreo (Tabla 11) como son pH, conductividad eléctrica, salinidad y total de solidos disueltos (PPM), dureza, alcalinidad, cloruros, fosforo, nitrito, nitrógeno amoniacal, sulfato, solidos totales, solidos suspendidos totales, hierro, demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO⁵), coliformes totales y coliformes fecales.

Tabla 11. Valores de parámetros fisicoquímicos in situ y ex situ representados para cada estación de muestreo en la quebrada La Cucalina de Pamplonita.

VARIABLE	UNI	M1			M2			M3		
		AG-AB	LIX	AG-AR	AG-AB	LIX	AG-AR	AG-AB	LIX	AG-AR
PH	UND de pH	7.53	6.88	8.17	7.92	6.36	8.01	7.72	6.53	8.30
Conductividad	µS/cm	169.6	192	175.8	175	219	142	290	289	261
Color	Un Pt Co	236	249	28	196	189	47	42		0
Turbiedad	NTU	52.8	45.8	7.33	36.8	39.3	12.5	19.3	17.1	3.70
Dureza	Mg/ CaCO ₃	78	80	82	96	112	74	160	128	108
Alcalinidad	Mg/Caco3	46	50	50	44	42	48	72	68	74
Cloruros	Mg/l Cl	27.9	13.99	16.9	6.38	7.79	7.79	14.6	17.01	18.4
Fosforo	Mg/l P	0.18	0.08	0.25	0.08	0.018	0.23	0.03	0.163	0.84
Nitritos	Mg/l N-NO2	ND	0.007	0.009	0.012	0.013	0.014	ND	0.002	ND
Nitrógeno Amoniacal	Mg/l N-NH3	ND	0.10	0.12	0.09	0.11	0.07	-	-	-
Sulfatos	Mg/l N-NO2	15	13	8	5	3	2	31	26	16
Solidos Totales	Mg/l	193	150	143	106	186	167	220	155	128
Solidos Suspendidos Totales		-	-	--	114	40	104	17	10	<0.1
Hierro	Mg/l fe	ND	0.0564	0.3477	0.125	0.017	0.029	0.206	0.055	0.034
DQO	Mg/l	46.5	37.5	30	36	27	23	8	11	16
DBO5	Mg/l	29.2	23.5	34	22.5	16	13.5	5	6.9	10

5.7.1 DQO

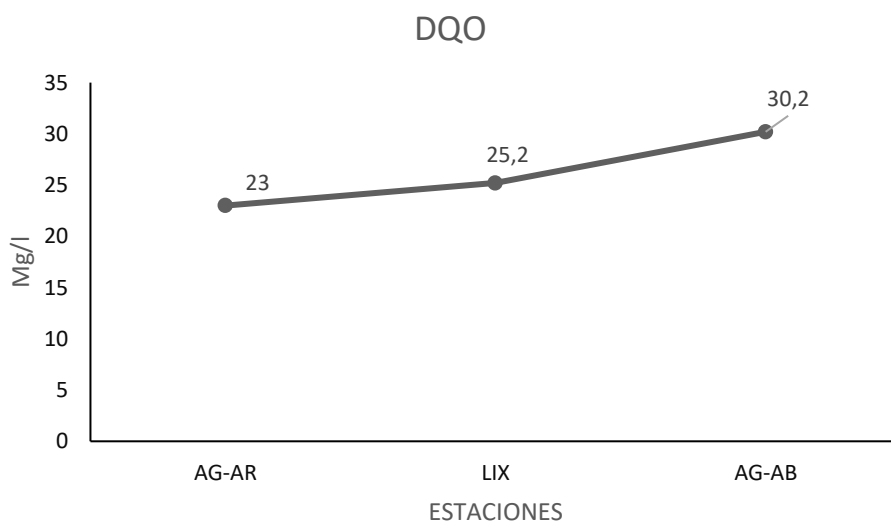


Figura 17. Demanda Química de Oxígeno (DQO) en las estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina de la vereda San Antonio en el municipio de Pamplonita 2023. Aguas arriba del lixiviado minero: **AG-AR**, lixiviado minero: **LIX**, aguas abajo del lixiviado minero: **AG-AB**.

Para la estación AG-AR se registra una demanda química de oxígeno (DQO) promedio de 23 Mg/L seguido de la estación LIX con 25,2 Mg/L y por ultimo mayor concentración de esta variable fisicoquímica en la estación AG-AB con 30.2 Mg/L.

5.7.2 DBO₅

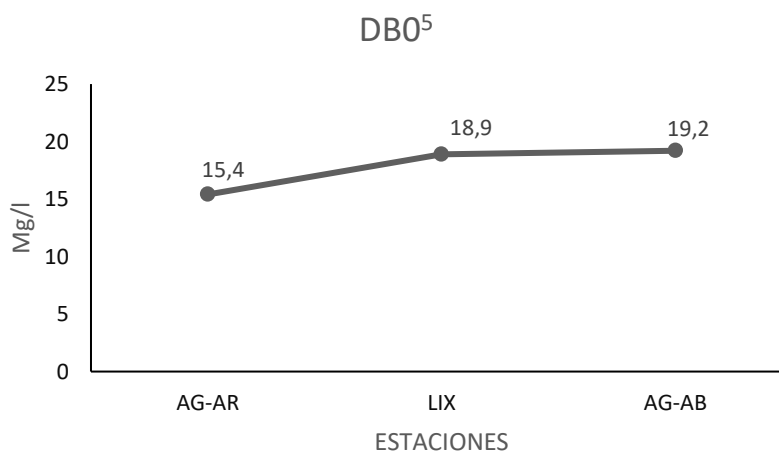


Figura 18. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) en las estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina de la vereda San Antonio en el municipio de Pamplonita 2023. Aguas arriba del lixiviado minero: **AG-AR**, lixiviado minero: **LIX**, aguas abajo del lixiviado minero: **AG-AB**.

La demanda biológica de oxígeno (DBO_5) en la quebrada La Cucalina obtuvo menor concentraciones en la estación AG-AR con el promedio de 15.4 Mg/L, seguido de la estación LIX en el que se homogeniza el lixiviado con la quebrada con una concentración de 18.9 Mg/L y finalmente la estación AG-AB con el 19.2 Mg/L.

5.7.3 Color

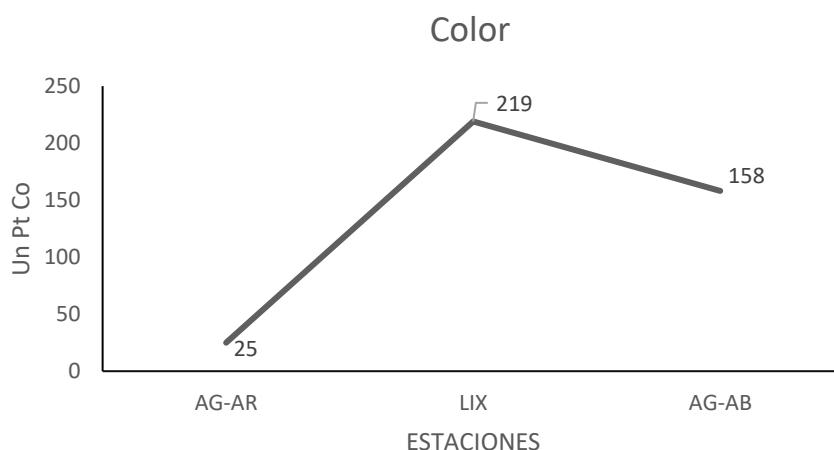


Figura 19. Concentración de color en las estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina de la vereda San Antonio en el municipio de Pamplonita 2023. Aguas arriba del lixiviado minero: **AG-AR**, lixiviado minero: **LIX**, aguas abajo del lixiviado minero: **AG-AB**. (Fuente: autor)

El color, expresado con unidades platino-cobalto (Un Pt Co) permite detallar en la estación AG-AR menor Unidades Platino Cobalto con el promedio de 25. La estación LIX por su parte obtuvo mayor concentración de 219 Un Pt Co seguido de la estación AG-AB con el 158 Un Pt Co.

5.7.4 Turbidez

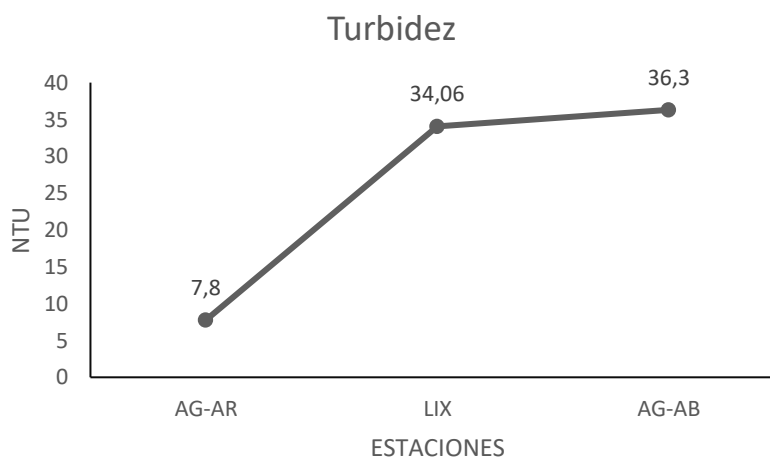


Figura 20. unidades nefelométricas de turbidez en las estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina de la vereda San Antonio en el municipio de Pamplonita 2023. Aguas arriba del lixiviado minero: **AG-AR**, lixiviado minero: **LIX**, aguas abajo del lixiviado minero: **AG-AB**. (Fuente: autor)

La turbidez, la cual se expresa con unidades nefelométricas de turbidez (fig. 20) permite observar en la estación AG-AR menor turbidez con el promedio de 7.8 NTU en el cuerpo de agua a diferencia de las estaciones LIX con 34.06 NTU y AG-AB con 36.3 NTU.

5.7.5 Dureza

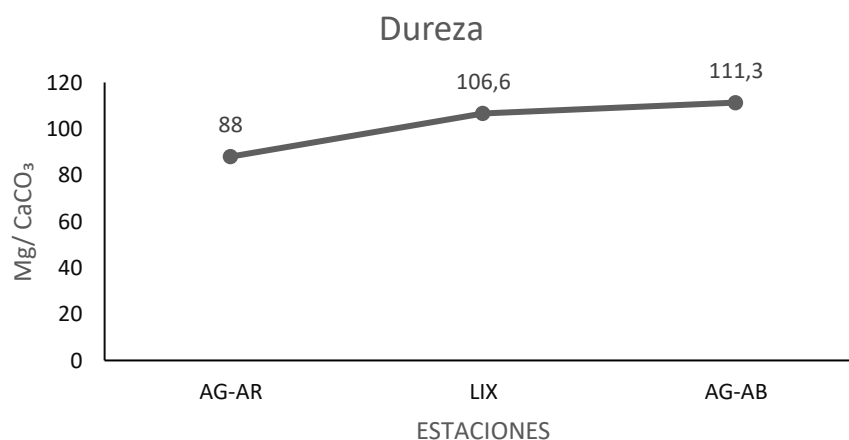


Figura 21. Dureza del agua en las estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina de la vereda San Antonio en el municipio de Pamplonita 2023. Aguas arriba del lixiviado minero: **AG-AR**, lixiviado minero: **LIX**, aguas abajo del lixiviado minero: **AG-AB** (Fuente: autor).

La dureza del agua, indico en la estación AG-AR un promedio de 88 Mg/ CaCO₃ de concentración , seguido de la estación LIX con 106.6 Mg/ CaCO₃ y menor dureza con un promedio de 111.3 Mg/ CaCO₃ para la estación AG-AB.

5.7.6 Fosforo

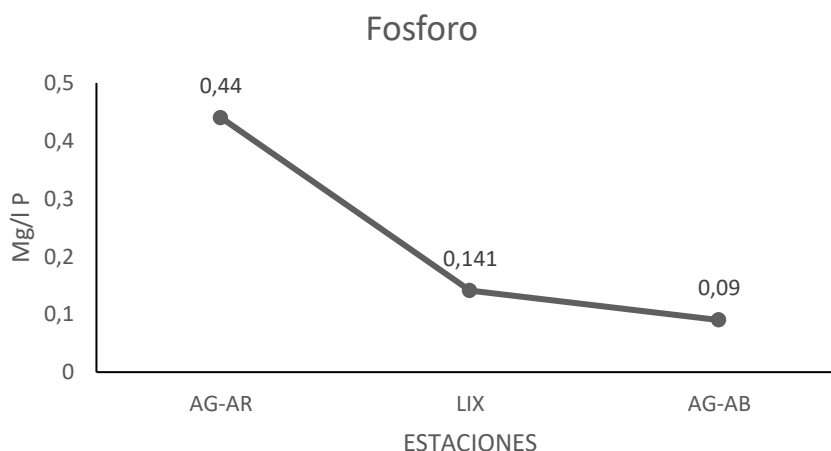


Figura 22. Disponibilidad de Fosforo en el agua en las estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina de la vereda San Antonio en el municipio de Pamplonita 2023. Aguas arriba del lixiviado minero: **AG-AR**, lixiviado minero: **LIX**, aguas abajo del lixiviado minero: **AG-AB** (Fuente: autor).

En relación al fosforo arrojó en la estación AG-AR un promedio mayor de 44 Mg/L P, en concentración , seguido de la estación LIX con 0.141 Mg/L P, y menor fosforo con un promedio de 0.09 para la estación AG-AB.

5.7.7 Sólidos totales



Figura 23. Sólidos Totales del agua en las estaciones de muestreo en la quebrada La Cucalina de la vereda San Antonio en el municipio de Pamplonita 2023. Aguas arriba del lixiviado minero: **AG-AR**, lixiviado minero: **LIX**, aguas abajo del lixiviado minero: **AG-AB**. (Fuente: autor)

En Los sólidos totales arrojo en la estación AG-AR un promedio menor de concentración respecto a las tres estaciones con el 145 Mg/L, seguido de la estación LIX con 163.7 Mg/L, y mayor sólidos totales con el promedio de 173 Mg/L para la estación AG-AB.

5.8 Índice biodegradabilidad del agua

La característica de biodegradabilidad del agua en la quebrada La Cucalina, presento mayor biodegradabilidad del agua en la estación AG-AR con puntaje de 0,7783 seguido de AG-AB con 0,6259 y la estación LIX con menor puntaje en biodegradabilidad del 0,6146.

Tabla 12.

Resultado de Puntajes del índice de biodegradabilidad del agua para cada estación de muestreo en la quebrada La Cucalina de Pamplonita.

BIODEGRADABILIDAD DEL AGUA (DBO5/DQO)	ESTACIONES		
	AG-AB	LIX	AG-AR
PUNTAJE	0.6259	0.6146	0.7783

NOTA. Aguas arriba; **AG-AR**, Lixiviado; **LIX**, Aguas abajo; **AG-AB**.

5.9 Monitoreo microbiológico

Los resultados microbiológicos reportados en el estudio (Tabla 9), arrojo en cada uno de los muestreos (NMP) mayor concentración contaminante de elementos discretos en la estación AG-AB, seguido de la estación AG.AR y finalmente con menos presencia microbiológica (unidades formadoras de colonia) de coliformes en la estación LIX.

Tabla 13.

Valores microbiológicos representados para cada estación de muestreo en la quebrada La Cucalina de Pamplonita.

VARIABLE	UNI	M1			M2			M3		
		AG-AB	LIX	AG-AR	AG-AB	LIX	AG-AR	AG-AB	LIX	AG-AR
Coliformes Totales	BAC/ 100 ml	61	1.6	45	93	20	45	68	1.7	93
Coliforme Fecales	BAC/ 100 ml	40	1.6	45	93	20	45	93	1.7	20

NOTA. Muestreo; **M**, Aguas arriba; **AG-AR**, Lixiviado; **LIX**, Aguas abajo; **AG-AB**.

5.10 Análisis de correspondencia canónica

El análisis de correspondencia canónica (fig.24) explico un 81.32 % la relación de las variables fisicoquímicas con la incidencia de géneros encontrados en el estudio. De manera, que en la estación AG-AR se observó relación entre las variables de alcalinidad y fosforo con los géneros de *Anacroneuria* , *Lachania* , *Thraulodes*, *Leptonema* y *Baetodes*. Por otra parte, en la estación LIX se observa relación en variables de turbidez y color asociados a él genero *Smicridea*. Finalmente, la gráfica representa en la estación AG-AB relaciones entre las variables de hierro, nitrito, cloruros, demanda química de oxígeno (DQO), sulfatos, solidos totales, y dureza en el cuerpo de agua.

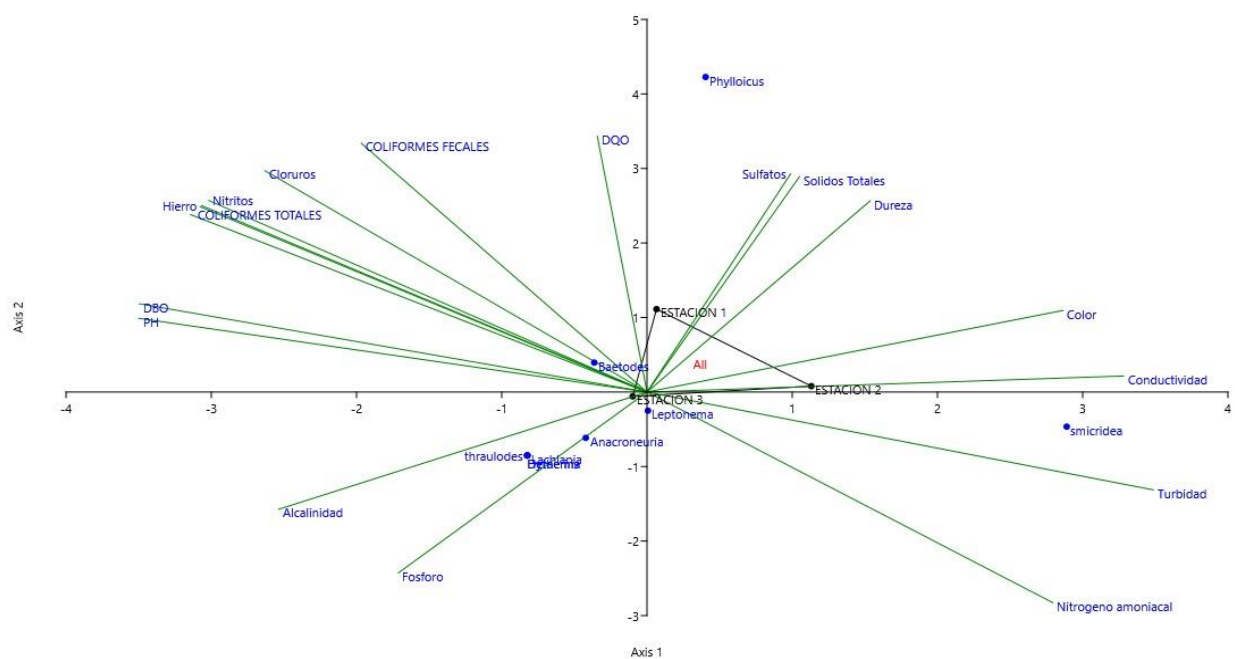


Figura 24. Análisis de correspondencia canónica (ACC) de los parámetros fisicoquímicos, relacionados con los géneros en las diferentes estaciones de muestreo, en la quebrada La Cocalina de Pamplonita, Norte de Santander, Colombia (Fuente: autor).

6. DISCUSIÓN

La abundancia y composición de macroinvertebrados acuáticos reportada en el presente estudio indica bajos individuos, comparados con estudios realizados en el departamento de Norte de Santander por Rojas, J. (2018) y otras investigaciones llevadas a cabo en el país en el río Teusacá de Cundinamarca (López Mendoza et al., 2019), atribuyéndose principalmente a la influencia de los cambios en la biomasa de la cobertura vegetal en áreas aledañas a la actividad minera junto a la influencia de lixiviados en el cuerpo de agua. Sin embargo, el impacto de la actividad minera sobre el cauce de la quebrada La Cucalina, concuerda con el estudio implementado por Aguilar-Baldosea *et al* (2022) en el que explica el bajo ensamblaje de esta comunidad en la ciénaga plaza seca del choco por actividades de minería.

El análisis de diversidad (Figura 15) concuerda con el estudio de Orrego-Meza et al., (2020) en el que indica mayor riqueza específica ($^{\circ}D$) en estaciones no influenciadas por actividades humanas como lo es la estación AG-AR, presentando mayor significancia en este orden de diversidad, seguido de la estación LIX, y por último la estación AG-AB con poca participación de géneros identificados. En este orden de ideas, la diversidad de orden uno (1D) en el cual indica la abundancia y la diversidad de orden dos (2D) correspondiente a la dominancia de los géneros, fue menor en AG-AB a comparación de las demás estaciones ajustándose al estudio de rondan Huaman, (2022), en el que señala tendencia similares en estaciones perturbadas con abundancia superior respecto a la dominancia e los géneros.

En relación a los órdenes, el más abundante fue Ephemeroptera con el 38% del total estudiado, atribuyéndose en el estado ninfa de la familia Baetidae como el más representativo de Colombia sobre hábitats lóticos y lénticos (Manzo et al., 2014) en rocas, restos de troncos y

vegetación emergente. Seguido fue Plecóptera, con el 36.12 %, Tricoptera con 23.38 % y Odonata con baja incidencia del 2.27 % estando en desacuerdo con la abundancia de este último orden por los reportes de Aguilar-Baldosea *et al.*, (2022).

En este sentido en la prueba de similitud Bray Curtuis la presencia y ausencia de géneros sobre las estaciones arrojo alta congruencia entre la matriz de similaridad original y la matriz obtenida con dos grupos diferenciados; el primero, correspondiente para la estación AG-AR en el que comparte 53% de similitud de los géneros encontrados en comparación con las estaciones LIX y AG-AB, concordando cercanías porcentuales en similitud con estudios de Nuñez y Fragoso (2019), siendo *Anacroneuria* , *Baetodes* , *Leptonema* y *Smicrea* mayoritariamente encontrados en la investigación y el segundo grupo, representando por su parte el 62% de similitud de los géneros entre las estaciones AG-AB y LIX encontrados en la investigación.

Por otra parte, la sensibilidad y tolerancia de las familias en la comunidad de macroinvertebrados con ambientes perturbados fue notable. Concordando con estudios implementados por Castillo *et al.*, (2021), al arrojar en la gráfica de rango-abundancia (Figura 15), la familia Perlidae del género *Anacroneuria* ser dominante en la estación AG-AR donde no presentaba intervención minera y a su vez la familia Hidropsychidae del género *Smicredea* ser representativo en la estación LIX para contaminaciones directas del lixiviado minero (Roldán-Pérez, 2016).

Con respecto a los resultados obtenidos en el índice BMWP/Col (Tabla 5), concuerdan con el estudio de Carrillo y Alexandra (2023) en el que coinciden con Pulgarín-Ríos (2023) obteniendo criterios aceptables para la estación AG-AR debido a no ser influyente de acciones mineras. La estación del lixiviado minero (LIX), obtuvo dudosa contaminación siendo aguas medianamente contaminadas, de manera que el estudio está en desacuerdo con Milán Valoes, *et*

al (2011) en el que asocia a el género *Smicrea* encontrados en buena calidad biológica del agua, pero en acuerdo con Moreno y Gutiérrez, (2019) en el que señalan la preferencia oportunista de este género en zonas que recibe vertimientos directos de aguas residuales. Finalmente, la estación AG-AB presenta critica contaminación junto a la disminución de la comunidad de macroinvertebrados.

En este sentido, analizar la relación entre los macroinvertebrados y los parámetros fisicoquímicos en la quebrada La Cucalina, se convirtió en una herramienta crucial para entender el alcance y la profundidad de los efectos de la minería reflejando variaciones en términos diversidad; antes, durante y después de la minería de carbón relacionándose con variables de contaminación como lo son pH, demanda química y biológica de Oxígeno, turbidez , solidos totales, color, sulfatos y dureza (figura 24). De manera que, estudios como el de Baldosea & Mosquera, (2019) señalan de manera precisa observar el impacto dinámico de las perturbaciones antrópicas a los ecosistemas.

Sigler y Bauder (2017) por su parte afirman la relación proporcional en la cual entre mayor sea la alcalinidad en cuerpos de agua dulce mayor capacidad restauradora relacionándose esta variable con la estación AG-AR. La estación LIX, como lo respalda Fernández-Rodríguez & Guardado-Lacaba, (1993), al ser punto de encuentro entre el caudal y los lixiviados mineros, tiene alta relación con la variable de turbidez, provocado junto a la acidificación erosión de rocas aumento del color y la conductividad eléctrica , actuando la acidificación como barrera en la inhibición masiva de unidades formadoras de colonias (Terrerros Castro, 2022). Por último, la estación AG-AB se relaciona principalmente con la demanda química de oxígeno, teniendo también relaciones directas con variables de sulfatos, solidos totales y dureza derivados de la actividad minera.

7. CONCLUSIONES

El estudio reveló disminución en la diversidad de macroinvertebrados acuáticos de la quebrada La Cucalina, generando cambios fisicoquímicos en la trayectoria del caudal y relacionándose principalmente en variables de turbidez, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica, color sulfato, sólidos totales (ST) y dureza.

Las actividades de minería demuestran compromiso con prácticas de manejo adecuadas en sus lixiviados en conformidad con la legislación colombiana, artículo 11 de la resolución 0883 del 2018. Sin embargo, se determina leve incremento por parte de los sólidos suspendidos totales (SST) en estaciones perturbadas.

El análisis de las variables microbiológicas, observó inhibición en las unidades formadoras de colonias (UFC) de coliformes totales por acidificación en la estación de los lixiviados mineros (LIX).

Finalmente, el estudio destaca la relevancia de la entomofauna acuática asociándose con los parámetros fisicoquímicos, como estrategia clave para llevar a cabo un análisis detallado de la salud en los ecosistemas acuáticos, observando diferenciaciones significativas en términos de diversidad.

8.RECOMENDACIONES

Se recomienda a los entes regionales del departamento de Norte de Santander que velan por los recursos hídricos, establecer programas de monitoreo constante en la calidad del agua de quebradas, ríos y lagunas que actúan como deposito final a vertimientos de las industrias mineras, con el fin de que cumplir con las regulaciones ambientales y promover buenas prácticas en sus desechos para mitigar tempranamente los impactos negativos a los ecosistemas.

También, concientizar por medio de campañas ambientales a la comunidad local, campesinos y industrias mineras de los impactos medioambientales que pueden acarrear negativamente los lixiviados a la flora y fauna en el que interactúan con los ecosistemas.

Finalmente, se recomienda que se realice un monitoreo continuo de la calidad del suelo y del agua en la quebrada La Cucalina para evaluar los posibles impactos acumulativos a lo largo del tiempo que pueda presentar el cuerpo de agua.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA

- Aguilar-Baldosea, W., López-Ramírez, I. C., & Murillo, L. R. (2022). Efecto de la minería en macroinvertebrados acuáticos de la ciénaga plaza seca, Atrato, Chocó. *Revista Politécnica*, 18(35), 9–23.
- Alvarez Lobo, A., & Florez Gomez, J. S. (2016). *Monitoreo de la calidad del agua en la quebrada la brava de la reserva adamiuain en el municipio de ocaña norte de santander, por medio de macroinvertebrados acuticos y variables fisicoquimicas* [PhD Thesis].
- Álvarez, Y., & Tonalmitzin, A. (2022). *Análisis de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos de la Zona Lacustre de Xochimilco y su relación con la calidad del agua durante los años 2017-2019*.
<https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/26480>
- Arango Mendoza, J. A. (2014). *Proyecto de minería de oro la Colosa. Identificación ambiental de la zona de explotación y sus Impactos*.
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/13504>
- Badii, M. H., & Castillo, J. (2007). Análisis de correlación canónica (ACC) e investigación científica. *Innovaciones de negocios*, 4(8).
<https://revistainnovaciones.uanl.mx/index.php/revin/article/view/194>
- Baldosea, W. A., & Mosquera, J. N. D. (2019). *Ensamblaje de macroinvertebrados acuáticos y contaminación minera en un humedal de la cuenca media del río Atrato*.
- Botero, L. A. C. (2020). La paradoja de la disponibilidad de agua de mala calidad en el sector rural colombiano. *Revista de ingeniería*, 49, 38–51.
- Brower, J. E., Zar, J. H., & Von Ende, C. N. (1998). *Field and laboratory methods for general ecology* (Vol. 4). WCB McGraw-Hill Boston.

- http://www.sisal.unam.mx/labeco/LAB_ECOLOGIA/Ecologia_de_Poblaciones_y_Comunidades_files/GeneralEcology.pdf
- Cárdenas López, L. T. (2022). *Taxonomía del género Cabecar (Ephemeroptera: Leptohyphidae) mediante datos morfológicos y moleculares*.
<https://repositorio.ucaldas.edu.co/handle/ucaldas/17377>
- Carter, J. L., Resh, V. H., & Hannaford, M. J. (2017). Macroinvertebrates as biotic indicators of environmental quality. En *Methods in stream ecology* (pp. 293–318). Elsevier.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128130476000164>
- Carvajal, V. (2020). *Importancia de los Odonata*.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/21187/1/Importancia%20de%20los%20Odonata3.pdf>
- Castillo, A. R., Rodríguez, J. R., & Vidal, G. M. B. (2021). Macroinvertebrados bentónicos indicadores de calidad biológica del agua de lagunas altoandinas, La Libertad-Perú. *Rebiol*, 41(1), 91–101.
- Chia Pinto, L. A. (2020). *Pasivos ambientales mineros en Colombia*.
<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/37280>
- Correa-Calderón, K. J., & Romero-Salinas, K. Y. (2022). *Estudio cinético e isotérmico de la implementación de carbón activado modificado con nanopartículas magnéticas para remoción de compuestos orgánicos persistentes y metales pesados en aguas*.
<https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/27039>
- Costas, G. (2014, marzo 23). Orden Trichoptera (tricópteros o frigáneas). *Ciencia y Biología*.
<https://cienciaybiologia.com/orden-trichoptera-tricopteros-o-friganeas/>
- Dagnino, J. (2014). Análisis de varianza. *Revista chilena de anestesia*, 43(4), 306–310.

Del Carmen Zúñiga, M., & Cardona, W. (2009). Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental. *Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos*, 1.

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=-](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=-jinEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT155&dq=Z%C3%BA%C3%B1iga,+M.,+2009,+Bioindicadores+de+calidad+de+agua+y+caudal+ambiental:+Caso+del+R%C3%ADo+Me%C3%A9ndez+(Valle+del+Cauca,+Colombia).+En:+J.+Cantera,+Y.+Carvajal+y+L.+Castro+(Compiladores).+Caudal+ambiental:+Conceptos+Experiencias+y+Desaf%C3%ADos.+Programa+Editorial+de+la+Universidad+del+Valle,+Cali+Colombia:+303-310&ots=K-xZAwYF1u&sig=9_0hy-Wrt9-qRT-qmvGKBH5Jv3M)

[jinEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT155&dq=Z%C3%BA%C3%B1iga,+M.,+2009,+Bioindicadores+de+calidad+de+agua+y+caudal+ambiental:+Caso+del+R%C3%ADo+Me%C3%A9ndez+\(Valle+del+Cauca,+Colombia\).+En:+J.+Cantera,+Y.+Carvajal+y+L.+Castro+\(Compiladores\).+Caudal+ambiental:+Conceptos+Experiencias+y+Desaf%C3%ADos.+Programa+Editorial+de+la+Universidad+del+Valle,+Cali+Colombia:+303-310&ots=K-xZAwYF1u&sig=9_0hy-Wrt9-qRT-qmvGKBH5Jv3M](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=-jinEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT155&dq=Z%C3%BA%C3%B1iga,+M.,+2009,+Bioindicadores+de+calidad+de+agua+y+caudal+ambiental:+Caso+del+R%C3%ADo+Me%C3%A9ndez+(Valle+del+Cauca,+Colombia).+En:+J.+Cantera,+Y.+Carvajal+y+L.+Castro+(Compiladores).+Caudal+ambiental:+Conceptos+Experiencias+y+Desaf%C3%ADos.+Programa+Editorial+de+la+Universidad+del+Valle,+Cali+Colombia:+303-310&ots=K-xZAwYF1u&sig=9_0hy-Wrt9-qRT-qmvGKBH5Jv3M)

Fernández Ladino, D. (2020). *Proyección de los ecosistemas estratégicos como pilar para la defensa nacional—una mirada desde las ciencias ambientales*.

<https://repository.udca.edu.co/handle/11158/3625>

Fernández-Rodríguez, M., & Guardado-Lacaba, R. M. (1993). *Evaluación del Índice de Calidad del Agua (ICAsup) en el río Cabaña, Moa-Cuba*.

Flowers, R. W., & De la Rosa, C. (2010). Capítulo 4: Ephemeroptera. *Revista de Biología Tropical*, 58, 63–93.

Garavito-Bermúdez, G. I., Ospina-Romero, L. V., & Ospina-Mora, D. C. (2020). Avaliação de um sistema à escala laboratorial de um filtro de macrófitas em flotação como tratamento de águas residuais do lava-jato. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 12(1), 10–20.

Gerstenberg, F., & González, P. A. V. (2019). La minería de carbón en Colombia y la situación económica de las mujeres rurales: La comunidad El Hatillo (Cesar, Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 23(45), 1–20.

- González, L. M. (2019). Suomen vesiperhoset. Trichoptera of Finland. *Nova Acta Científica Compostelana*, 26. <https://revistas.usc.gal/index.php/nacc/article/view/6000/6372>
- Gutiérrez-Fonseca, P. E. (2010). Capítulo 6: Plecoptera. *Revista de Biología Tropical*, 58, 139–148.
- Henao Gonzalez, A. M. (2022). *Impacto ambiental en la microcuenca Cascabel ocasionado por la actividad minera del municipio de Marmato, Caldas*.
<https://repository.eia.edu.co/handle/11190/5330>
- Hernández-Navarro, Y., & Sánchez-García, J. E. (2020). Combinación de métodos: Análisis de correspondencia, simple y múltiple bajo el enfoque de correlaciones canónicas. Clases latentes. *Polo del Conocimiento*, 5(9), 949–968.
- Herrera, M. J. S. (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.
- Horta-Gaviria, C.-M., & García-Rodríguez, M.-M. (2022). La industria minera en Latinoamérica. *Ánfora*, 29(52), 124–156.
- Hsieh, T. C., Ma, K. H., & Chao, A. (2016). iNEXT: An R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods in Ecology and Evolution*, 7(12), 1451–1456. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12613>
- Japa Cando, J. V. (2021). *Evaluación de la calidad del agua del río Yuquipa, tramo-comunidad Sagrado Corazón, mediante la identificación de macroinvertebrados bentónicos*.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15442>
- Jara Valverde, L. C. (2020). *Determinación de la calidad del agua de la sub cuenca del río Pariac en la quebrada de Rajucolta, Huaraz, mediante el uso de parámetros*

fisicoquímicos y macroinvertebrados bentónicos, 2019.

<http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4420>

Laguado Nieto, Z. Y. (2022). *Evaluar la eficacia de la normativa ambiental en la explotación de carbón en el departamento de Norte de Santander.*

<https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/27626>

LOOR MACÍAS, Y. D., & ZAMBRANO RIVERA, T. X. (2022). *EFFECTIVIDAD DEL PRODUCTO DECON EN AGUAS CONTAMINADAS DE PAMPAS SALINERAS ABANDONADAS EN COMUNA “LAS GILCES* [B.S. thesis, Jijpajapa. UNESUM].

<http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/3425>

López Arias, P. C. (s/f). *Modelo para el diseño conceptual de canales navegables en las vías fluviales de Colombia.* Recuperado el 17 de febrero de 2024, de

<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/40147>

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.

Macias Diaz, D. D. (2021). *Relación entre los usos de suelo y la diversidad de macroinvertebrados acuáticos en el Estero El Barro de La microcuenca Baja del Río Quevedo.* <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6602>

Mancilla-Villa, O. R., Gómez-Villaseñor, L., Palomera-García, C., Hernández-Vargas, O., Guevara-Gutiérrez, R. D., Ortega-Escobar, H. M., Flores-Magdaleno, H., Can-Chulim, Á., Sánchez-Bernal, E. I., & Avelar-Roblero, J. U. (2023). Metales pesados en agua y macroinvertebrados de la cuenca del río Ayuquila-Armería (México) y sus afluentes.

REVISTA TERRA LATINOAMERICANA, 41.

<https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1603>

Manzo, V., Romero, F., Rueda Martin, P., Molineri, C., Nieto, C., Rodriguez, J., & Dominguez, E. (2014). Insectos acuáticos del Parque Provincial Urugua-í, Misiones, Argentina. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 73(3–4), 155–170.

Meléndez Quinto, J. M. (2018). *Odonatofauna larval de ríos, humedales y otros sistemas acuáticos en Lima Metropolitana, Perú*.

<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3735>

Merino, M. A. O., Conforme, M. C. M., Conforme, M. V. M., & Barzola, J. L. S. (2020). Macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua de la parte céntrica del río Jipijapa-Ecuador. *RECIMUNDO*, 4(4), 454–467.

Mosquera Restrepo, D., & Peña Salamanca, E. (2021). Evaluación de la calidad del agua de un río tropical usando índices bióticos, fisicoquímicos y de diversidad. *Rev. Asoc. Colomb. Cien. Biol.(En línea)*, 46–59.

Navarro, M. O., Gaitan, M. S., & Duque, S. M. (2007). Demanda bioquímica de oxígeno 5 días, incubación y electrometría. *TP0087. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). República de Colombia*.

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. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500319>

Olarte-Quíñonez, C. A., Carrero-Sarmiento, D., Vilorio, Á. L., & Ríos-Málaver, I. C. (2021). Patrones de diversidad de las mariposas de la subtribu Pronophilina (Lepidoptera:

- Nymphalidae: Satyrinae) en un gradiente altitudinal del Cerro de Tierra Negra, Cordillera Oriental, Norte de Santander, Colombia. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 25(2), 197–218.
- Orrego-Meza, J. G., Hernández-Cortés, I. C., Marulanda-López, J. F., Rivera-Pérez, J. M., Viteri-Delgado, J. P., Franco-Torres, M., Llano-Arias, C. A., & Gomes Dias, L. (2020). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 560–571. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1027>
- Ortega-Contreras, J. Y. (1998). Macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de las aguas negras tratadas a través del sistema de canales de oxidación. *Respuestas*, 3(1), 30–37.
- Paulson, D., Schorr, M., & Deliry, C. (2021). *World Odonata List*, University of Puget Sound.
- Perdomo, L. E. C. (2018). *Jefe grupo investigación*. 9.
- Pérez, A., Salazar, N., Aguirre, F., Font, M., Zamora, E., Córdova, A., & Acosta, K. (2016). Guía de macroinvertebrados bentónicos de la provincia de Orellana. *Ecuador*. (1ra ed.). *Associació Catalana d'Enginyeria Sense Fronteres*.
- Pérez, C. R., Yepes, C. A. Z., ESCOBAR, J., & MOLINA, M. (2019). La jurisprudencia constitucional colombiana sobre ordenamiento territorial, participación ciudadana y su impacto en la actividad minera. *Revista de derecho*, 51, 90–110.
- Pérez, G. R. (1988). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Fondo para la Protección del Medio Ambiente" José Celestino Mutis".

Perfiles económicos y comerciales por departamentos | MINCIT - Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (s/f). Recuperado el 17 de febrero de 2024, de

<https://www.mincit.gov.co/estudios-economicos/perfiles-economicos-por-departamentos>

Prado, P. B. B., Tangerino, E. P., & Sánchez, I. A. (2017). Remoción de color en agua de abastecimiento utilizando proceso electrolítico y filtración directa. *Entre ciencia e ingeniería*, 11(21), 22–27.

Pulgarín-Ríos, A. (2023). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y calidad del agua de tres zonas agrícolas en la cuenca alta del río San Pedro-Mezquital, México. *Intropica*, Postprint-Postprint.

Ramírez, C. A. S. (2021). *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*. Ediciones de la U.
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2fAYEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA33&dq=Ram%C3%ADrez,+C.+A.+S.+\(2021\).+Calidad+del+agua:+evaluaci%C3%B3n+y+diag%C3%B3stico.+Ediciones+de+la+U&ots=ceVSNp3N7n&sig=sec2JmUE6fd4v63hnKUGgYAOfo](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2fAYEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA33&dq=Ram%C3%ADrez,+C.+A.+S.+(2021).+Calidad+del+agua:+evaluaci%C3%B3n+y+diag%C3%B3stico.+Ediciones+de+la+U&ots=ceVSNp3N7n&sig=sec2JmUE6fd4v63hnKUGgYAOfo)

Ramos, Y. P. R., & Rico, Y. M. S. (2023). La tributación más allá de su cálculo: Un análisis socioambiental de los beneficios tributarios a la minería de carbón. *Contaduría Universidad de Antioquia*, 83, 173–198.

Rivas Torres, A. (2020). *Etodiversidad: Estudio de la variabilidad del comportamiento sexual en el orden Odonata* [PhD Thesis, Ecología e biología animal].

<https://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/handle/11093/1415>

Rodiles-Hernández, R., González-Díaz, A. A., & González-Acosta, A. F. (2013). Ecosistemas acuáticos. *Chiapas*, 73(834), 100.

Rodríguez, Á. (1973). *Estudios de aprovechamiento integral de la cuenca del río Bogotá: Informe técnico sobre contaminación del río Bogotá.*

Rodríguez, C., Coy, A. G., & Duque, M. E. (2007). Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. *Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*: [http://www. ideam. gov. co/documents/14691/38155/Demanda+ Qu% C3% ADmica+ de+ Ox% C3% AD](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno).

Rodríguez, J., Tobón, J., Frías, M., & de Rojas, M. I. S. (2018). Aprovechamiento de un residuo del carbón para reducción del impacto ambiental de la minería del carbón en Colombia: Estudio del potencial de uso en la industria del cemento. *Revista Cintex*, 23(2), 95–102.

Rojas Fuentes, J. E. (2018). *Diversidad de insectos acuáticos (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera Y Odonata) asociados a parámetros fisicoquímicos como evaluación de la calidad del agua del municipio De Bochalema, Norte De Santander, Colombia* [tesis de pregrado] Universidad de Pamplona .
<http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/699>

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.

Rondan Huaman, R. (2022). *Evaluación del impacto de la actividad minera en la calidad de agua y la diversidad de macroinvertebrados bentónicos en quebradas del sector la Pampa, Tambopata-Madre de Dios.*
<http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/20.500.14070/844>

Sánchez Rodríguez, S. N., & García Martínez, G. P. (s/f). *Evaluación de la calidad del agua utilizando especies bioindicadoras en ríos: Caso de la Cuenca del Río Cane, Colombia*

- [PhD Thesis, Universidad Santo Tomás]. Recuperado el 17 de febrero de 2024, de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/44260>
- Sigler, A., & Bauder, J. (2017). Alcalinidad, pH, y sólidos disueltos totales. *Obtenido de Well Educated Educación en el Agua de Pozo: http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS, 20, 2012–11.*
- Stroud, B., & Bó, G. A. (2011). The Year 2009 Worldwide Statistics of Embryo Transfer in Domestic Farm Animals Summary of the International Embryo Transfer (IETS) Data Retrieval Committee Report. *Acta Scientiae Veterinariae*, 39(1), s139–s146.
- Tamayo Lema, G. E. (2018). *Relación entre la calidad del agua del río Daule y la población de macroinvertebrados en los órdenes ephemeroptera, plecóptera y trichoptera, como bioindicadores, año 2018*. [Master's Thesis, Quevedo: UTEQ]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/5011>
- Terneus-Jácome, E., & Yáñez, P. (2018). Principios fundamentales en torno a la calidad del agua, el uso de bioindicadores acuáticos y la restauración ecológica fluvial en Ecuador. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 36–50.
- Terreros Castro, J. M. (2022). *Análisis de la influencia de la fotocatalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales en las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja*. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11536>
- Tobias-Loaiza, M., & Guzmán-Soto, C. (2022). Variación estructural de familias de macroinvertebrados acuáticos y su relación con la calidad del agua en quebradas asociadas con cultivos de café y ganadería vacuna en el sector de La Tagua, Sierra Nevada de Santa Marta. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 206–216.

- Trujillo, A. F. O., & Cajigas, M. E. M. (2018). Validación de un método para el análisis de color real en agua. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 7(1), 143–155.
- Vásquez, D., Flowers, R. W., & Springer, M. (2009). Life history of five small minnow mayflies (Ephemeroptera: Baetidae) in a small tropical stream on the Caribbean slope of Costa Rica. *Aquatic Insects*, 31(sup1), 319–332. <https://doi.org/10.1080/01650420903083096>
- Vide, J. M. (2020). El cambio climático y los mares. *Mediterráneo económico*, 33, 103–118.
- Watywarawan, A., Cascaes, M. F., da Silva Brunelli, N., & Zocche, J. J. (2022). Composição da assembleia de macroinvertebrados bentônicos em área de mineração de carvão em processo de recuperação ambiental. *Research, Society and Development*, 11(9), e35811928809–e35811928809.
- Yunis, J., & Aliakbari, E. (2021). *Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies 2020*. Fraser Institute.
- Zamora, H. (1999). Adaptación del índice BMWP para la evaluación biológica de la calidad de las aguas epicontinentales en Colombia. *Revista Unicauca Ciencia*, 4, 47–60.