

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE
MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS EN LA LAGUNA DE MADURACIÓN DE
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “PTAR” DEL
MUNICIPIO DE AGUAZUL, DEPARTAMENTO DE CASANARE**

Jeniffer Yahaira Chaparro Díaz

Cod. 1116.552.680

Universidad de Pamplona

Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología

Pamplona, Colombia

2022

**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE
MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS EN LA LAGUNA DE MADURACIÓN DE
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “PTAR” DEL
MUNICIPIO DE AGUAZUL, DEPARTAMENTO DE CASANARE”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Presentado para optar al grado académico de:

BIÓLOGA

AUTORA: Jeniffer Yahaira Chaparro Díaz

TUTOR: Luis Parmenio Suescùn Bolívar

Pamplona – Colombia

2022

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a Dios padre todopoderoso por las bendiciones derramadas y por otorgar fuerzas para continuar y nunca dejarme abatir por las adversidades presentadas a lo largo de este camino.

A mis padres Cecilia Díaz Niño y Mauricio Chaparro Mogollón por ser los mejores padres del mundo, por todo su apoyo incondicional en todo momento, y sus consejos oportunos que me ayudaron a superar todos los problemas que se han presentado a largo de este camino, por enseñarme a ser mejor persona y por estar conmigo en los momentos que los necesito, los cuales tendré presentes toda mi vida.

A todos mis familiares, amigos, y personal de ESPA, que estuvieron presentes a lo largo de esta maravillosa etapa de mi vida con quienes he compartido alegrías y tristezas.

Jeniffer Chaparro

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Bendito Padre Celestial Todopoderoso por su infinito amor, por la fortaleza que me dio en todo el camino de mi vida Universitaria, escuchando las oraciones de gratitud y no dejarme derrumbar en los momentos más difíciles.

A la Empresa de Servicios Públicos ESPA, lugar donde recibí los conocimientos necesarios que me ayudaron a crecer como persona y formarme como profesional de excelencia.

Al Ing. Hugo Villalba Molano, quien dedicó tiempo y esfuerzo para el desarrollo del presente trabajo siendo un pilar fundamental para la finalización del presente trabajo.

A mi director de Tesis, Luis Parmenio Suescún Bolívar, por guiarme sabiamente y por compartir sus conocimientos y experiencia que aportaron para la culminación de este proyecto.

Jeniffer Chaparro

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
SUMMARY	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I	17
1 MARCO TEÓRICO	17
1.1 Antecedentes de la Investigación	17
1.2 Bases teóricas	22
1.2.1 El agua	22
1.2.2 Organismos utilizados como bioindicadores.	24
1.2.3 Índices utilizados para evaluar la Calidad del Agua mediante el uso de macroinvertebrados	31
CAPÍTULO II	32
2.1 DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO	32
2.2 Puntos de Muestreo	33
2.3 Muestreo	34
2.3.1 Muestreo de macroinvertebrados	34
2.4 Fase de laboratorio	34
2.5 Análisis de variables	35
CAPÍTULO III	39
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1 RESULTADOS DE MACRO INVERTEBRADOS A TRAVÉS DEL ÍNDICE BIOLOGICAL MONITORING PARTY (BMWP).	39

3.2 Resultados de los índices de diversidad	44
3.2.2 Índice de diversidad de Shannon	45
3.3 Resultados de la Abundancia	47
3.4 Resultados del Índice De Similitud (Clúster)	58
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	63
ANEXOS	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones meteorológicas de PTAR	32
Tabla 2. Puntos Muestreados	33
Tabla 3. Puntajes de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice de BMWP	36
Tabla 4. Categorías de Calificación, Aguas Naturales Clasificadas según el Índice BMWP	36
Tabla 5. Categorías de calificación del Índice de Shannon	37
Tabla 6. Resultado del Índice BMWP para el mes de mayo del año 2021	39
Tabla 7. Resultados del Índice BMWP para el mes de agosto del año 2021	40
Tabla 8. Promedio del Índice BMWP por Punto de Muestreo	41
Tabla 9. Valores de Riqueza, Abundancia y Diversidad de los Macroinvertebrados en el mes de mayo 2021	46
Tabla 10. Valores de Riqueza, Abundancia y Diversidad de los Macroinvertebrados en el mes de agosto 2021	46
Tabla 11. Valores promedios de Riqueza, Abundancia y Diversidad de los Macroinvertebrados en la Laguna de Maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales 2021	46

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la PTAR	33
Figura 2. Ubicación geográfica de los puntos muestreados en la Laguna de Maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	34
Figura 3. Porcentaje promedio del Índice BMWP para los puntos muestreados	44
Figura 4. Curva de acumulación de especies en el mes de mayo 2021	45
Figura 5. Curva de acumulación de especies en el mes de agosto 2021	45
Figura 6. Número de Especies, Familias y Órdenes de Macroinvertebrados	47
Figura 7. Número de Especies de Macroinvertebrados por Órdenes	48
Figura 8. Número de especies de Macroinvertebrados por Familia.....	48
Figura 9. Número de especies de Macroinvertebrados por sitio de muestreo	49
Figura 10. Número de individuos de macroinvertebrados por sitio de muestreo	49
Figura 11. Curva de rarefacción de riqueza y abundancia para el mes Mayo de macroinvertebrados en los diferentes puntos de muestreo mediante el método Chao & Jost 2012. Centro (P2); Entrada (P1) y Salida (P3).	50
Figura 12. Perfiles de diversidad por puntos de muestreo para el mes de mayo 2021, diversidad de orden Q0: riqueza de especie; diversidad de orden Q1: especies comunes; diversidad de orden Q2: especies dominantes.	51
Figura 13. Número de Especies, Familias y Órdenes de Macroinvertebrados	52
Figura 14. Número de Especies de Macroinvertebrados por Órdenes	52
Figura 15. Número de especies de Macroinvertebrados por Familia.....	52
Figura 16. Número de especies de Macroinvertebrados por sitio de muestreo	53
Figura 17. Número de individuos de Macroinvertebrados por sitio de muestreo	53

Figura 18. Curva de rarefacción de riqueza y abundancia para el mes Mayo de macroinvertebrados en los diferentes puntos de muestreo mediante el método Chao & Jost 2012. Centro (P2); Entrada (P1) y Salida (P3).	55
Figura 19. Perfiles de diversidad por puntos de muestreo para el mes de agosto 2021, diversidad de orden Q0: riqueza de especie; diversidad de orden Q1: especies comunes; diversidad de orden Q2: especies dominantes.	55
Figura 20. Abundancia Relativa de Macroinvertebrados por sitio de muestreo	56
Figura 21. Curva de Abundancia-Diversidad de especies de Macroinvertebrados.....	56
Figura 22. Abundancia Relativa de Macroinvertebrados por sitio de muestreo.	57
Figura 23. Curva de Abundancia-Diversidad de especies de Macroinvertebrados.....	57
Figura 24. Clúster de Similaridad de Macroinvertebrados en los 3 Puntos de Muestreo ...	58
Figura 25. Clúster de Similaridad de Macroinvertebrados en los 3 Puntos de Muestreo ...	59

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar los macroinvertebrados acuáticos presentes en el agua residual de la laguna de maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del municipio de Aguazul, Casanare, con el propósito de conocer la calidad de agua por medio del índice biológico BMWP/Col. Se tomaron tres puntos referenciales, la entrada, el centro y la descarga de la laguna. En los cuales se cuantifican las familias de macroinvertebrados para calcular los índices de Calidad del Agua. Los resultados obtenidos mostraron que la calidad del agua en la laguna fue aceptable, por lo tanto, se puede concluir que la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del municipio de Aguazul, Casanare, tiene un óptimo tratamiento de las aguas que se vierten en ella.

Palabras claves: MACROINVERTEBRADOS, ÍNDICE BMWP (Biological Monitoring working Party), CALIDAD DEL AGUA

SUMMARY

The objective of this research was to characterize the aquatic macroinvertebrates present in the residual water of the maturation lagoon of the Domestic Wastewater Treatment Plant of the municipality of Aguazul, Casanare, with the purpose of knowing the quality of water through the biological index. BMWP/Col. Three reference points were taken, the entrance, the center and the discharge of the lagoon. In which the families of macroinvertebrates were quantified to calculate the Water Quality indices. The results obtained showed that the quality of the water in the lagoon was acceptable, therefore, it can be concluded that the Domestic Wastewater Treatment Plant of the municipality of Aguazul, Casanare, has an optimal treatment of the waters that are poured into it.

Keywords: MACROINVERTEBRATES, BMWP INDEX (Biological Monitoring working Party), WATER QUALITY

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable en la vida cotidiana de los seres humanos, a más de ser una fuente vital para todos los seres vivos, en Aguazul han sido diversas las causas por las cuales se ha visto perjudicado este recurso, la principal es de origen antropogénico ocasionado por descargas de aguas residuales procedentes de ciudades, poblados, comunidades o asentamiento humanos, diversidad de industrias, la utilización de agentes tóxicos y nocivos para la pesca, derrames de petróleo, entre otros factores. (Calles, 2012)

El municipio de Aguazul tiene una población de 32.910 habitantes, los cuales vierten sus aguas residuales a la cuenca del Río Únete, por la Empresa de Servicios Públicos de Aguazul – E.S.P.A. S.A. E.S.P., empresa que opera la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “PTAR”, ubicada al sur del municipio de Aguazul- Casanare a 4,5 km por la vía que conduce del municipio de Aguazul (Cas.) al municipio de Maní (Cas.).

El sistema de tratamiento está compuesto por una estructura de llegada que permite la entrada del agua residual a la Planta de Tratamiento, a través de un colector general en tubería PVC de 20”. Inicia en una caja rompedora de presión que llega con un flujo laminar al cribado, el cual lleva a cabo la operación utilizada para separar material grueso del agua. Posteriormente, se localizan las tres rejillas en forma de canasta donde se retienen los sólidos suspendidos de mayor a menor tamaño. Continúa la etapa de desarenado, la cual consiste en una sedimentación de arenas, gravas, particularmente finas pesadas u otro material sólido pesado que puede ocasionar formación de depósitos pesados en tuberías, canales y ductos. El movimiento del desarenador ocasiona un flujo horizontal, lo que ayuda a sedimentar todas las partículas de arena en el fondo del desarenador. Para la remoción de grasas, se cuenta con una trampa de grasas, lo que ocasiona su remoción, limpieza y mantenimiento adecuado con el objeto de prevenir el taponamiento de las tuberías y el efecto deletéreo que puedan tener ellas

sobre la acción bacteriana, siendo una cámara pequeña de flotación en donde la grasa flota a la superficie libre del agua y es retenida.

Para garantizar que el caudal de ingreso a las lagunas sea estable, se tiene implementado un mecanismo que descarga por rebose directamente al by-pass, cuando el agua residual es descargada en una laguna de estabilización se realiza en forma espontánea un proceso de autopurificación o estabilización natural, en el que tienen lugar fenómenos de tipo físico, químico y biológico. Las lagunas de estabilización donde la depuración se realiza en ausencia de oxígeno libre (condiciones anóxicas) y/o combinado (anaerobia), Facultativos donde la estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo tanto en condiciones aerobias como anaerobias. Las primeras se mantienen en el estrato superior de la laguna, mientras que, en el inferior, se realiza la degradación anaerobia en ausencia de oxígeno. En algunos casos puede haber aireación artificial en parte de ellas y de maduración, el último paso de los sistemas lagunares en serie o que mejoran el efluente de otros sistemas de tratamiento biológico. Este tipo de laguna se diseña primordialmente para remover microorganismos patógenos sin necesidad de adicionar agentes químicos desinfectantes. También se utilizan para nitrificar efluentes. (E.S.P., 2009).

JUSTIFICACIÓN

El riesgo de contaminación en el agua hace que sea necesario el control de la presencia de los organismos en el agua. Al determinar qué tipo de organismos están presentes y en qué concentración proporciona una información indispensable para conocer la calidad del agua y para la toma de decisiones en relación al control de vertidos, tratamiento de aguas y conservación de ecosistemas. (CYTED, 2012, p. 225)

Los beneficios del uso de herramientas integradoras y no solo las características fisicoquímicas del agua para la medida de su calidad han sido explicitadas también en muchos libros y manuales, y forma parte de la legislación de muchos estados. La bioevaluación de los macroinvertebrados es especialmente útil para determinar la salud de un río o arroyo. La bioevaluación de los macroinvertebrados es un procedimiento que hace uso de equipos de bajo costo, es válida científicamente si se realiza de manera correcta. (The Nature Conservancy, 2015, p. 129)

El 1 de enero de 2016 entró en vigencia la Resolución 631 de 2015 como norma de vertimiento nacional, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el 17 de marzo de 2015. Expreso los valores límites máximos permisibles de concentración en (mg/l) para un control directo en el vertimiento, realizaron el análisis y reporte de los valores de la concentración en número más probable (nmp/100ml) de los coliformes termo tolerantes presentes en los vertimientos puntuales de aguas residuales mediante las cuales se gestionan excretas humanas y/o de animales a cuerpos de aguas superficiales, cuando la carga másica en las aguas residuales antes del sistema de tratamiento es mayor a 125,00 Kg/día de DBO5. (Sostenible, 2015)

Es posible determinar que la Empresa de Servicios Públicos de Aguazul – E.S.P.A. S.A. E.S.P., está cumpliendo con los límites máximos permisibles de parámetros fisicoquímicos en vertimientos puntuales de aguas residuales a fuentes superficiales.

Con base en las diversas quejas que interpone la comunidad circundante o aledaña a la PTAR del municipio en mención, ante la Autoridad Ambiental competente (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía-Corporinoquia), debido a la presunta contaminación que se genera aguas abajo del punto de vertimiento, ya que los usuarios allí ubicados se ven afectados porque no pueden hacer uso del recurso hídrico para sus proyectos y/o usos, se hace necesario adelantar ésta investigación con los macroinvertebrados, para así verificar el rendimiento en eficiencia de la laguna de maduración.

Lo que se busca es dar un aporte para que se tomen medidas al respecto que generen soluciones a corto, mediano y largo plazo, y en razón a la importancia que reviste evitar alteraciones mayores en los procesos naturales que de una u otra forma constituyen una cadena e inciden en el estado de esta cuenca hidrográfica tan importante; por consiguiente, en este estudio se plantea la aplicación del método para la evaluación de la calidad del agua mediante la identificación de macroinvertebrados, y determinan en qué condiciones se encuentra actualmente el cuerpo receptor de las descargas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Aguazul Casanare, que posteriormente se descargan al río únete y garantizar que estas no alteran el ecosistema acuático.

La aplicación del método para la evaluación de la calidad del agua mediante la identificación de macroinvertebrados ayudará a determinar en qué condiciones se encuentra actualmente el cuerpo receptor de las descargas de la planta de tratamiento de aguas residuales de Aguazul - Casanare que posteriormente se descargan al brazo izquierdo del río Únete y garantizar que estas no alteran el ecosistema acuático.

Los resultados obtenidos de la evaluación de macroinvertebrados determinarán el estado actual del cauce hídrico y servirá de base para aplicar los correctivos necesarios en caso de ser requeridos ayudando a cumplir con la legislación ambiental vigente y garantizando los derechos constitucionales de los ciudadanos a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado. El presente trabajo podrá servir de referencia para posteriores estudios que impliquen la aplicación del mismo método para evaluar la contaminación de los ríos en condiciones similares a las que se describen en este trabajo.

Objetivos

Objetivo General

Caracterizar los macroinvertebrados acuáticos presentes en el agua residual de la laguna de maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del municipio de Aguazul, Casanare, con el propósito de conocer la calidad de agua por medio del índice biológico BMWP/Col.

Objetivo Específico

Evaluar la composición de macroinvertebrados acuáticos asociados al agua residual de la laguna de maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del municipio de Aguazul, Casanare.

Determinar la calidad del agua mediante el uso de macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes de la Investigación

Las aguas residuales de origen doméstico, también se le llaman aguas servidas, fecales o cloacales, son residuales una vez han sido usadas. Residuo es algo que no sirve para el usuario directo y cloacales porque son transportadas mediante cloacas o alcantarillas, nombres que se le da habitualmente a estos colectores de agua. Las aguas también reciben el nombre de aguas negras, aquellas que están contaminadas con heces u orina, las cuales se convierten en un problema ambiental cuando están sin ningún tipo de tratamiento. (Recytrans, 2013).

Las aguas residuales urbanas generalmente se conducen por sistemas de alcantarillado y tratadas en sistemas como plantas de tratamiento de aguas residuales, por supuesto, con la oportunidad de darles un tratamiento especial para después ser vertidas a cuerpos de agua, una de las razones más importantes para tratar estas aguas residuales o servidas es la eliminación de los agentes patógenos de origen humano presentes en las excretas, esto es con el propósito de evitar la contaminación y la propagación de dichas enfermedades.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Aguazul Casanare, cuenta con un sistema convencional llamado ICEAS (Intermittent Cycle Extended Aeration System – Sistema de Aireación Extendida de Ciclo Intermitente), y un sistema de lagunas (Anaerobia, Facultativa y de Maduración). La capacidad de diseño del tren de lagunaje es de 106,3 L/s y del Sistema (SBR ICEAS) es de 52 L/s.

El sistema de tratamiento de aguas residuales “ICEAS”, está conformado por las siguientes estructuras: Sistema preliminar o primario conformado por una reja automática,

tornillo sin fin para tanque, puente longitudinal barredor, reactores aerobios biológicos, difusores, válvulas automáticas.

Tratar un caudal de diseño de 52 L/s de agua residual doméstica, la cual ingresa a través de la tubería principal de alcantarillado sanitario, para luego pasar a la etapa de pretratamiento (preliminar), que consta de dos canales en los que se encuentra una rejilla de cribado y un sistema de eliminación de grasas y aceites por decantación. El sistema tiene un control eléctrico que permite la operación mecánica del mismo, los sólidos retenidos por la rejilla y las grasas decantadas son recogidos y transportados hacia el área de lechos de secado. (E.S.P. E. S., 2021).

El sistema más comúnmente utilizado en el tratamiento de estas aguas residuales son las lagunas de oxidación o de estabilización, son depósitos construidos mediante la excavación y compactación de la tierra que almacena agua para ser posteriormente tratada.

Una laguna de oxidación es un proceso abierto en el cual el agua pasa a través de una cuenca, construida especialmente para tratar las aguas residuales y de residuos industriales biodegradables con procesos naturales; funciona básicamente por la actividad bacteriana y las relaciones simbióticas con las algas.

El agua llega, se genera en forma espontánea en un proceso de autopurificación o estabilización natural, en el que tiene lugar fenómenos de tipo físico, químico y biológico.

Se pueden establecer distintas combinaciones de tipos de lagunas en función de las características del agua a tratar, de las exigencias del efluente y la exposición de terreno, básicamente, del agua residual de origen doméstico o su equivalente, los sistemas más comúnmente:

- Anaerobia
- Facultativa
- Maduración

Procesos que se están manejando en este sistema de tratamiento, también pueden ser utilizados otros tipos de sistemas de tratamiento como filtros percoladores y lodos activados.

Las características más importantes de estas lagunas son:

- Es un proceso natural de autodepuración, las bacterias degradan la materia orgánica, y las algas mediante fotosíntesis proporcionan oxígeno a las bacterias.
- Se presentan, procesos físicos de remoción de material suspendida con la sedimentación.
- Se efectúan cambios químicos de la calidad del agua, que, entre otros aspectos, mantienen las condiciones adecuadas para que los organismos puedan realizar la estabilización, transformación y remoción de contaminantes orgánicos biodegradables.
- Se eliminan en gran cantidad los microorganismos patógenos que se encuentran presentes en las aguas residuales.

Las ventajas:

- Se operan con bajo consumo de energía, ya que están diseñados por gravedad.
- Bajo costo de construcción, siempre y cuando el terreno sea económicamente viable.
- Bajo el nivel de operación y mantenimiento.
- Remoción eficiente de bacterias patógenas.
- Disposición del efluente por evaporación, infiltración de suelos en riego y sirve para abonar cultivos (abono orgánico-compostaje).

De igual manera, estos procesos también tienen algunas desventajas:

- Un efluente con elevado contenido al descargarlo directamente sobre un cuerpo de agua.
- Su funcionamiento depende de las condiciones ambientales como la temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento.
- Presenta generación de olores por supuesto desagradables y el deterioro de la calidad del efluente.
- La contaminación de acuíferos por infiltración particularmente en lagunas construidas sobre suelos arenosos. (Adminmgv, 2016)

Al ser descargadas estas aguas sin previo tratamiento, es decir, sin estas lagunas a los lechos de los ríos, a las calles, a los acuíferos, a los lagos, daña completamente todos los ecosistemas y pone en riesgo la salud de las personas que puedan tener contacto con estos acuíferos.

Diversos autores concuerdan en que el uso de macroinvertebrados resulta la alternativa más factible en cuanto a la determinación de calidad del agua por métodos biológicos, se refiere por diversas ventajas tales como: facilidad de muestreo, alto nivel de sensibilidad, fácil aislamiento, a alto grado de conocimiento sobre su taxonomía y costos bajos.

Resulta necesario mencionar que a pesar de la influencia que presentan los contaminantes en la distribución de estas especies, también existen otro tipo de fenómenos relacionados con el clima, la geografía, e incluso la simbiosis que también afectan la densidad de las poblaciones, los cuales deben irse discriminando oportunamente para que no influyan en mayor grado con la interpretación de datos. (GALEAS, 2017)

Peña Perea, S., Bohórquez Garzón, H., Barrera Rodríguez, A., Salamanca Velandia, S., Jiménez Medina, D. A., & Botello-Suárez, W. (2019). En este trabajo se presenta la caracterización de macroinvertebrados que colonizan aguas de la quebrada La Calaboz (un importante sistema hídrico del departamento de Casanare), con la finalidad de determinar el estado de la calidad del agua y mejorar la comprensión de la entomofauna autóctona, en función de su respuesta a condiciones de verano e invierno. Los macroinvertebrados fueron colectados a partir de seis estaciones de muestreo e identificados a nivel de familia. Adicionalmente, se estableció su relación con diversas variables fisicoquímicas. El estado ambiental se determinó mediante la aplicación de tres índices bióticos: BMWP, ASPT y EPT. A pesar del impacto de las actividades antropogénicas, la calidad del agua de la quebrada fue catalogada como aceptable o buena. Independientemente del periodo, Ephemeroptera fue el orden predominante en la mayoría de las estaciones seleccionadas. No obstante, el periodo de invierno presentó los índices bióticos más bajos, asociado con una diferente distribución de individuos derivado del proyecto de investigación “Calidad del Agua de la Quebrada La Calaboz”.

Pérez Granados, A. L., & Torres Cabrera, F. A. La quebrada la Tablona es la fuente hídrica que abastece la ciudad de Yopal con 139.000 habitantes según el censo del año 2015, desde el año 1981 esta microcuenca, con aproximadamente 2.700 hectáreas es objeto de protección bajo la figura de Reserva Forestal Nacional Protectora y desde el 2011 como Parque Natural Regional de la Orinoquia; sin embargo, la disminución del caudal ha generado problemas de desabastecimiento para los habitantes de Yopal, como producto de las diferentes actividades económicas que allí se realizan, la presencia de asentamientos urbanos y los problemas de calidad del agua evidenciados por el análisis y cálculo del ICA desde el año 2014, así como la falta de una ordenación adecuada de la microcuenca, es por eso, que se propuso el uso de bioindicadores acuáticos en esta quebrada para definir la calidad hídrica y la incorporación en su proceso de ordenamiento hidrográfico, resaltando el uso de macroinvertebrados como la mejor opción para realizar un seguimiento, monitoreo y evaluación de la fuente hídrica por sus múltiples ventajas en su utilización, ya que estos organismos responden a los diferentes cambios de los parámetros físicos y químicos del agua como penetración de la Luz, pH, Temperatura, Oxígeno, Turbidez, Fosfatos, Nitratos. Así mismo, las investigaciones consultadas y analizadas suministraron información de los macroinvertebrados encontrados en las diferentes fuentes hídricas de la región, donde permitió concluir que el orden de mayor presencia fue el Ephemeroptera con las familias Chironomidae y Simuliidae.

Caleño Ruiz, Y. (2014). El procesamiento de la materia orgánica en ríos y su transporte aguas abajo es un proceso fundamental en los nacimientos o zonas de cabecera. Se estudió el efecto de la extracción de agua de una quebrada de bajo orden del piedemonte llanero (Casanare-Colombia), sobre la magnitud del caudal, el ensamblaje de macroinvertebrados, las cantidades de Materia Orgánica Particulada Bentónica Gruesa y Fina (MOPG y MOPF). Se seleccionaron dos tramos de muestreo correspondientes a una zona de referencia (R), sin

extracción de caudal, y una zona alterada (A), aguas abajo de una bocatoma. No fue evidente una reducción significativa del caudal ($KW= 1.25$, $p > 0.05$, $n=12$) y la composición, diversidad y abundancia relativa de familias, géneros y grupos tróficos de macroinvertebrados no mostraron diferencias relevantes entre ambos tramos, aunque se observó una mayor abundancia absoluta de organismos en la zona alterada. Se evidenció una preferencia de los macroinvertebrados por sustratos de hojarasca, y su mayor acumulación en la zona alterada explicó la mayor abundancia de especímenes en esta. Diferencias en composición de macroinvertebrados entre sustratos de hojarasca y rocas sugieren su papel en la estructuración de la comunidad. Efectos sobre el procesamiento de la materia orgánica fueron evidentes con una mayor retención de Materia Orgánica Particulada Bentónica (MOPG y MOPF) en la zona alterada ($KW p$ ($KW p$ menor que 0, $n=80$), así como diferencias significativas en las tasas de descomposición de *Guatteria sp* (ANOVA $F= 4.78$, (p menor que .05), siendo menores en la zona de alteración. Las tasas fueron mayores en bolsas de Malla Gruesa y menores en las de Malla Fina en ambos tramos.

1.2 Bases teóricas

1.2.1 El agua

Se considera al agua como uno de los elementos más abundantes del Planeta, siendo de importancia vital para todos los seres vivos que habitan en la misma, Los océanos, mares, lagos, ríos y demás lugares que contienen agua, cubren las dos terceras partes de la Tierra, es por esa razón que se dice que aproximadamente el 70% del planeta es agua, sin embargo, la mayor cantidad de agua existente en el planeta es agua salada y únicamente el 1 % de agua es dulce. (Carrera & Fierro., 2001: pp. 16-17).

Los Ecosistemas acuáticos es un medio líquido dentro del cual interactúan una gran cantidad de organismos vivos que dependen del este recurso para su subsistencia, pudiendo

clasificarse en oceánicos que está constituido por sistemas costeros y de aguas abiertas, mientras que los ecosistemas dulceacuícolas o de agua dulce se constituye de ambientes lénticos y ambientes lóticos cada uno de estos clasificados de acuerdo a la profundidad y la velocidad con la que se drenan sus aguas. (IDEAM, 2014, pp. 30-31)

Cabe resaltar que todos los sistemas se encuentran ligados a través del ciclo hidrológico puesto que la evaporación del agua que posteriormente cae y se escurre por encima del suelo, que, ayudado por la acción de la gravedad, geomorfología, y topografía del lugar conforma inicialmente arroyos y finalmente una cuenca hidrográfica que a su vez deriva en la formación de ecosistemas lenticos, y loticos los cuales desembocan en el océano. (Ordoñez, 2011, p.8)

Hábitats lénticos se caracterizan porque la renovación de sus aguas es bastante lenta pudiendo durar desde un par de años hasta siglos razón por la cual la biodiversidad en estos ecosistemas es mucho más reducida en relación a los hábitats lóticos, y va reduciéndose conforme aumenta la profundidad de los mismos. Los ambientes lénticos están conformados desde las aguas contenidas dentro de algún recipiente, lagos, estanques, y el lecho oceánico. (Hanson *et al*, 2010, citado en Jiménez, 2013; p 22)

Los ambientes lóticos corresponden a los cuerpos de agua con corriente y tiempos de renovación de sus aguas bastante cortos por lo que estos hábitats resultan bien oxigenados, y en consecuencia existe una gran biodiversidad de macro y macroinvertebrados.

Los macroinvertebrados han desarrollado una gran versatilidad y características aerodinámicas únicas que les permiten habitar aguas con fuertes corrientes y adherirse en los sistemas rocosos de los ríos, la adaptación de estos organismos a un ambiente con altas concentraciones de oxígeno hace que este elemento sea uno de los factores indispensables para su supervivencia puesto que una gran mayoría de estas especies requieren

concentraciones de oxígenos cercanas al punto de saturación. (Smith & Smith, 2001, citado en Jiménez, 2013: p.21)

1.2.2 Organismos utilizados como bioindicadores.

Existe una amplia gama de organismos que sirven como indicadores biológicos de los se destacan bacterias, protozoos, fitoplancton, macrófitas, peces, y macroinvertebrados, cada uno posee cualidades específicas que se detallan a continuación: (Castro et al., 2006: p. 41-48)

1.2.2.1 Bacterias.

Este tipo de indicadores se utiliza especialmente para la determinar la calidad de los cuerpos hídricos receptores de descargas provenientes de aguas de uso doméstico y que pueden conllevar a la propagación de enfermedades, por lo cual es necesario establecer los índices de contaminación fecal mediante el conteo de coliformes, estreptococos, etc.

Una de las ventajas que presentan los indicadores bacteriológicos es que en la actualidad se cuenta con una gran variedad de métodos para el aislamiento y cultivo de bacterias fecales, Sin embargo, una de las limitaciones que presenta este método es el tiempo en que se obtienen los resultados que puede ir desde días hasta semanas, e incluso al interpretar los resultados no se puede garantizar que todas las células bacterianas sean viables o que se trate de partículas del mismo tamaño. (Larrea et al., 2013, pp. 24-34)

1.2.2.2 Protozoos.

Son de fácil cultivo y aislamiento, pero una de las limitaciones radica en que se requiere una amplia experiencia para la identificación taxonómica de estos organismos. Además de que la distribución de sus poblaciones es bastante dispereja lo cual impide que se puedan obtener muestras representativas. (Pullés, 2014, pp.25-36)

1.2.2.3 Fitoplancton.

Son utilizadas principalmente para el estudio del enriquecimiento orgánico tanto en ríos y en lagos, también son fáciles de muestrear y se las puede utilizar para realizar diseños experimentales dentro del laboratorio. Pero pese a su versatilidad presentan ciertas limitaciones, debido a su alta sensibilidad no se las puede utilizar para la determinación de metales pesados y biocidas además de que en muchos de los casos resulta difícil la obtención de muestras cuantitativas. (CAPMA, 2012)

1.2.2.4 Macrófitas

Este tipo de bioindicadores lo componen las plantas pluricelulares como las fanerógamas y musgos las cuales tienen como característica principal habitar en los lechos de los ecosistemas acuáticos, gracias a su ubicuidad permanente son fáciles de muestrear y ayudan a conocer las condiciones del sustrato, geología del lugar e influencia del clima sobre la vegetación. (Arcos et al., 2002, p. 3)

1.2.2.5 Peces

Son considerados un grupo de bioindicadores fáciles de muestrear por cualquier grupo interesado, al presentar una gran movilidad dentro del ecosistema acuático debido a que son capaces de huir de la contaminación y regresar cuando esta ha desaparecido es decir que cuando existe una gran densidad de especies de peces denota un ecosistema poco alterado.

Una de las ventajas más significativas es que son una de las especies acuáticas de las que mayor información se tiene, como limitaciones para usar este tipo de bioindicadores es que se requiere de mucho recurso humano para muestrear, además de la dificultad que presenta la

toma de muestras representativas en cuerpos de agua que presentan profundidades considerables y alta velocidad de corriente. (Aguilar, 2005, p.5)

1.2.2.6 Macroinvertebrados.

Los macroinvertebrados son uno de los organismos acuáticos más utilizados para la determinación de la calidad de los ecosistemas de agua dulce tanto en ríos como en lagos, debido a que son relativamente sedentarios y la contaminación incide directamente sobre ellos.

Para su muestreo se puede utilizar redes con diámetros de luz de malla que va desde 2 mm hasta 30 cm, en su gran mayoría están conformados por artrópodos en un 80 % en su estado larvario y otros insectos. Por su abundancia y distribución son ideales para la evaluación de la contaminación por residuos, agrícolas, industriales, descargas de aguas grises e incluso impactos sobre el suelo que afectan las condiciones del agua superficial.

Debido a que no todos los organismos acuáticos se pueden considerar como bioindicadores, sino solo aquellos que presenten características específicas de adaptabilidad y tolerancia frente a factores externos de cuyos grupos se pueden mencionar a los que están conformados por los órdenes Ephemeroptera, Plecóptera, Trichoptera que son altamente sensibles a cambios dentro de su ambiente. Mientras que organismos de otros órdenes como Chironómidae, Oligoquetos tienen la capacidad de soportar altos niveles de contaminación y llegar a ocupar el lugar de las especies sensibles (Roldan, 1999)

Diversos autores concuerdan en que el uso de macroinvertebrados resulta la alternativa más factible en cuanto a la determinación de calidad del agua por métodos biológicos se refiere por diversas ventajas tales como:

- Facilidad de muestreo
- Alto nivel de sensibilidad

- Fácil aislamiento
- Alto grado de conocimiento sobre su taxonomía
- Costos bajos

Resulta necesario mencionar que a pesar de la influencia que presentan los contaminantes en la distribución de estas especies también existen otro tipo de fenómenos relacionados con el clima, la geografía e incluso la simbiosis que también afectan la densidad de las poblaciones, los cuales deben irse discriminando oportunamente para que no influyan en mayor grado con la interpretación de datos. (Aguirre, 2011, p. 24)

1.2.2.6.1 Clasificación de los macroinvertebrados.

Los macroinvertebrados se pueden clasificar en base al estrado del ecosistema donde habitan pudiendo diferenciarse los siguientes grupos:

1.2.2.6.1.1 Neuston.

Está comprendido por los macroinvertebrados que habitan en la superficie del agua los cuales presentan la característica de impermeabilidad en todo su cuerpo gracias a que poseen un revestimiento de cera lo cual les permite moverse con libertad, venciendo la tensión superficial del agua los principales representantes son las familias Gerridae, Hydrometridae y Mesoveliidae.

1.2.2.6.1.2 Bentos.

Al contrario de los anteriores los bentos comprenden los macroinvertebrados que habitan en el fondo del ecosistema acuático ya sea en el sustrato, adheridos a rocas, restos de vegetación, e incluso a varios centímetros del fondo donde viven enterrados. De acuerdo con (Barbour, 1999) estas órdenes comprenden Ephemeroptera, Plecóptera, Trichoptera, Megaloptera y Díptera.

Además, las familias Euthyplociidae Ephemeropteros las mismas que viven bajo el sustrato, existen otras familias que se encuentran adheridas fuertemente a las rocas. La ventaja del análisis de la calidad del agua utilizando los macroinvertebrados bentónicos es que pueden dar condiciones tanto del agua como del sustrato donde habitan. (*Hanson et al., 2010, p28.*)

1.2.2.6.2 Órdenes de los macroinvertebrados.

1.2.2.6.2.1 Orden Plecoptera.

Son organismos característicos de aguas bien oxigenadas, poseen la característica de respirar a través de agallas que se encuentran ubicadas en su abdomen o en la parte posterior de su cola, a pesar de no ser buenas nadadoras se desplazan con facilidad entre las rocas, arena, y el detritus incluso en aguas con corrientes rápidas.

Se alimentan de perifiton que constituye un tipo de algas hongos bacterias y animales microscópicos, aunque suelen alimentarse de carne de otros animales y detritus en su mayoría. Aunque son organismos de aguas bien oxigenadas en ocasiones se pueden encontrar en lagos con considerables oleajes, a pesar de que su presencia denota ecosistemas poco alterados por lo que se los conoce como insectos de agua limpia.

1.2.2.6.2.2 Orden Ephemeroptera.

Reciben su nombre gracias al tiempo que habitan en el agua, el cual es bastante corto, puesto que va desde los 3 minutos hasta los cinco días, es decir que es “efímera” en este tiempo alcanzan su edad reproductiva y depositan sus huevos en la superficie ya que estos tienen la característica de fijarse fuertemente en cualquier sustrato.

Poseen agallas ubicadas en la parte abdominal las cuales difieren tanto en número, como en forma, dependiendo de la especie, son característicos de aguas limpias con buena

oxigenación, suelen tolerar niveles muy bajos de contaminación por lo que son buenos indicadores de alteración del agua por factores externos.

1.2.2.6.2.3 Orden Trichoptera.

Los tricópteros son organismos muy sensibles a los descensos de pH por lo que son los primeros macroinvertebrados en desaparecer cuando éste desciende a niveles inferiores a 6, otra de las características de este orden es que suelen formar pequeños habitáculos o refugios los cuales les proporcionan protección cuando están en estado larval y luego estos refugios son utilizados por otros organismos de estructura frágil.

Viven en ambientes lóticos gracias a que sus vainas se encuentran adheridas a las rocas por una especie de seda, que secretan en estado larval y les sirve para habitar en ríos con corrientes considerables poniendo en evidencia su alto requerimiento de oxígeno para su subsistencia.

1.2.2.6.2.4 Orden Coleóptera.

Poseen un par de alas denominadas élitros que protegen un segundo par de alas, su cuerpo es compacto. Pueden habitar tanto en ambientes lóticos como lénticos, poseen antenas medianamente grandes que difieren en tamaño y cantidad de segmentos, sus mandíbulas son notables a simple vista y sirven para diferenciar las especies y los nichos ecológicos.

Los coleópteros constituyen un eslabón fundamental dentro de la cadena alimenticia, tanto de peces como de anfibios, aunque no se los considera dentro del índice EPT son buenos indicadores de aguas no contaminadas.

1.2.2.6.2.5 Orden Hemiptera.

También se los conoce como chinches de agua, los mismos que son caracterizados por contar con un pico en lugar de las mandíbulas que posee la mayoría de los

macroinvertebrados, son uno de los órdenes más significativos alrededor del mundo, sin embargo, su densidad es mayor en zonas tropicales. Su dieta es variada e incluye desde insectos, hasta peces de menor tamaño, aunque también pueden ser carroñeros dentro de su hábitat, por lo que su presencia dentro de los ecosistemas acuáticos es fundamental. Su importancia para los seres humanos radica en que dentro de su alimentación se encuentran las larvas de los mosquitos y por consiguiente también constituyen el alimento de los peces lo cual proporciona beneficios económicos para el hombre y control de vectores de ciertas enfermedades. Las especies de este orden son capaces de soportar cierta salinidad e incluso soportar temperaturas moderadas por lo que se han encontrado algunos especímenes en aguas termales.

1.2.2.6.2.6 Orden Lepidóptera.

Debido a que la mayoría de representantes de este orden son terrestres por lo que en el pasado han sido excluidos como bioindicadores de la calidad del agua, actualmente se los ha vuelto a considerar como importantes fuentes de información para determinar los efectos de los contaminantes en su hábitat. Se ha evidenciado que la mayoría de especies de lepidópteros desarrollan su estado larval dentro del agua, aunque también existen especies totalmente acuáticas. Presentan patas en su tórax y agallas a nivel del abdomen, se alimentan de vegetación acuática por lo que son considerados controladores de maleza sumergida siendo característicos de aguas bien oxigenadas.

1.2.2.6.2.7 Orden díptera

Representa uno de los órdenes más evolucionados al igual que los lepidópteros y los tricópteros, su respiración es variada dependiendo de la especie ya que puede ser realizada por agallas traqueales hasta por pigmentos en su piel los cuales les permiten sobrevivir cuando la disponibilidad de oxígeno es escasa tienen gran importancia para el hombre tanto

en el aspecto económico como en la salud misma ya que son transmisores de enfermedades de impacto significativo como el dengue la fiebre amarilla entre otros.

Puesto que su orden es bastante complejo y variado pueden ser indicadores tanto de condiciones favorables como adversas por lo cual es de mucha importancia establecer en primer lugar la condición que se desea evaluar y la especie que se va a utilizar.

(CORTOLIMA, 2006)

1.2.3 Índices utilizados para evaluar la Calidad del Agua mediante el uso de macroinvertebrados

1.2.3.1 Índice BMWP (Biological Monitoring Working Party)

Se utilizan un mayor número de especies las cuales se van clasificando hasta el grado de familia y posteriormente se les asigna un valor de acuerdo con la sensibilidad a los contaminantes que va desde 1 hasta 10 los valores más elevados como por ejemplo 10 representan organismos de alta sensibilidad mientras que organismos con valores bajos son altamente tolerantes a la contaminación.

Una vez que se han asignado los valores a cada familia, se realiza la sumatoria para obtener un valor total conocido como BMWP, la interpretación del resultado es sencilla ya que los valores altos indican aguas poco alteradas mientras si el valor de la sumatoria total es bajo el río presenta aguas bastante contaminadas. (Carrera & Fierro, 2001, pp. 43, 45)

CAPÍTULO II

2 METODOLOGÍA

2.1 DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO

El sistema de lagunas de estabilización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (Coordenadas geográficas N: 5 8 54 E: 72 31 17), se encuentra ubicada sobre la vía intermunicipal (Aguazul – Maní), a unos 4.23 Kilómetros del casco urbano del municipio de Aguazul y a 236 m.s.n.m; está constituida actualmente por una zona de cribado y desarenado, laguna anaerobia, laguna facultativa y de maduración.

En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales se tiene las siguientes condiciones meteorológicas:

Tabla 1. Condiciones meteorológicas de PTAR

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura	29,5	°C/año
Humedad	88	%/año
Precipitación	2500 a 3800	Mm/año
Topografía	254 a 300	m.s.n.m

Fuente: ESPA, 2021

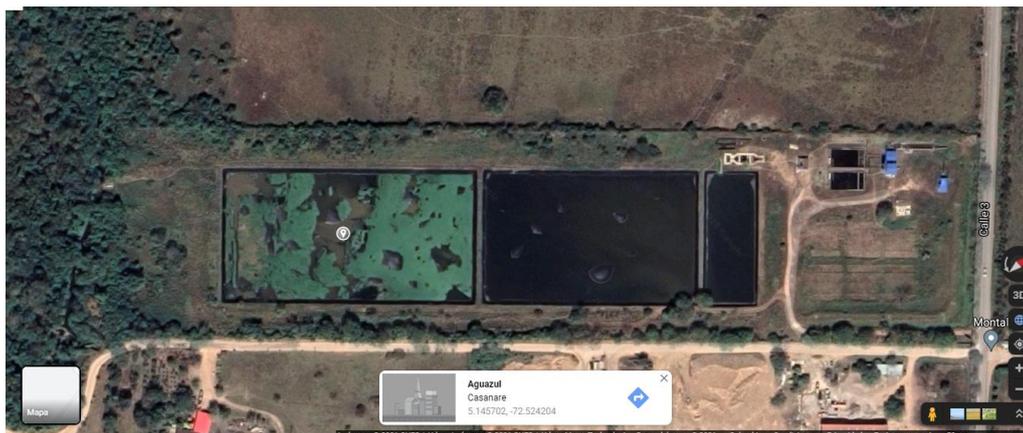


Figura 1. Ubicación geográfica de la PTAR

FUENTE: Google Earth, 2021

2.2 Puntos de Muestreo

El área estudiada abarca 3 puntos de muestreo, establecidos a lo largo. El primer punto se ubica en el punto de entrada de la laguna de Maduración de la planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Aguazul – Casanare, el segundo punto debido a condiciones de campo no aptas, la toma de muestra se realizó a los costados de la laguna de maduración y finalmente el tercer punto se ubicó en el punto de descarga la misma que es descargada al brazo izquierdo del Río Únete.

Tabla 2. Puntos Muestreados

Punto	Localización	Nombre del cuerpo de agua	Sustrato	Morfología del terreno	Tipo de vegetación	Usos del suelo
P1	Parte entrada	Laguna de Maduración	Sedimento fino	Semi inclinado	Herbácea, matorrales	Intervención antrópica
P2	Parte media a los costados	Laguna de Maduración	Sedimento fino	Semi inclinado	Herbácea, arbustos, árboles, matorrales	Ganadería rudimentaria, prácticas agrícolas
P3	Parte salida descarga	Brazo izquierdo del Río Únete	Roca, grava y arena	Plano	Herbácea, arbustos, árboles, matorrales	Ganadería rudimentaria, silvopastoril, agricultura intensiva.



Figura 2. Ubicación geográfica de los puntos muestreados en la Laguna de Maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

FUENTE: Google Earth, 2021

2.3 Muestreo

2.3.1 Muestreo de macroinvertebrados

La toma de muestras se realizó en el periodo comprendido entre el mes de mayo y el mes de agosto de 2021 en los principales puntos de muestreo, localizados en el área de influencia en tres puntos. Los muestreos se realizaron de macrobentos para lo cual se usa una red Surber, esta técnica de estudio cuantitativo permitirá obtener macroinvertebrados acuáticos que se hallan en la necromasa (troncos y vegetación); la puesta en práctica del método consiste en introducir la red Surber al fondo del agua sobre cada uno de los hábitats que se identificaron en cada punto de muestreo. Una vez puesta la red se agita el sustrato permitiendo que los microorganismos presentes en cada microhábitat pudiesen quedar atrapados. En la recolección se emplearon pinzas que permitirán una fácil manipulación de los individuos encontrados. Se realizó 6 réplicas por cada punto de muestreo; el material encontrado se dispuso en frascos rotulados con fecha, punto de muestreo, coordenadas y nombre del investigador, estos contienen alcohol al 96% (BioQuím ID) para su conservación

2.4 Fase de laboratorio

Una vez trasladadas las muestras al laboratorio, se realizó una limpieza de las mismas posterior a su caracterización. Se realizó la observación y separación de los macroinvertebrados a través de un microscopio estereoscopio, un microscopio compuesto, bastantes funcionales. Todas las muestras recolectadas fueron revisadas en su totalidad en el microscopio estereoscopio, microscopio compuesto y separadas por orden. Para lograr una caracterización e identificación taxonómica se emplearon claves de caracterización que permitieron la observación, separación de familia e identificación de diversos grupos taxonómicos (Pérez, 2003; Roldán Pérez, 1996; Álvarez, 1982; Arango, 1983; Aristizábal, 2002; Bedoya, 1984; Domínguez y Peters, 1992; Domínguez y Fernández, 2009) y la asesoría de profesionales expertos en taxonomía de macroinvertebrados acuáticos del grupo de investigación GIEB y BIOMOGEN de la Universidad de Pamplona, para mejorar las labores de identificación y determinación de los especímenes. Previo registro fotográfico.

2.5 Análisis de variables

La determinación de la calidad de agua se realizó mediante el cálculo del índice BMWP (Biological Monitoring Working Party), y la asignación de valores para cada familia se hizo basado en lo propuesto por Roldan (2003); quien adapta el sistema a Colombia para ecosistemas acuáticos de alta montaña en los que es propuesta cada familia y su valoración según la sensibilidad y adaptación a las distintas calidades de agua, con puntajes que van de 1 a 10, siendo 10 la puntuación por excelencia para los organismos más sensibles a la contaminación y la 1 la valoración a los organismos más tolerantes.

Para la aplicación del índice se designó la puntuación establecida por familia y al final se realizó la sumatoria de todas las familias caracterizadas por cada uno de los puntos y fecha de muestreo, proporcionando de esta manera un valor total del índice BMWP/Col, permitió determinar la calidad del agua.

Tabla 3. Puntajes de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice de BMWP

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

Fuente: (Roldán, 2003. P 31).

Tabla 4. Categorías de Calificación, Aguas Naturales Clasificadas según el Índice BMWP

Clase	Rango	Calidad	Características
II	101-120	Buena	Aguas limpias
III	61-100	Aceptable	Aguas Medianamente contaminadas
IV	36-60	Dudosa	Aguas contaminadas
V	16-35	Crítica	Aguas muy contaminadas
VI	<15	Muy crítica	Aguas fuertemente contaminadas

Fuente: (Roldán, 2003. P 32).

La composición taxonómica de los macroinvertebrados se realizó por medio de tablas representativas de presencia/ausencia de tal manera que se tenga una organización de los datos, teniendo en cuenta los componentes más importantes del estudio como lo son; la clasificación taxonómica orden y familia y los puntos de muestreo en los cuales fueron

muestreados que son la parte fundamental del estudio.

Para describir la estructura y composición numérica de la comunidad de macroinvertebrados, se utilizarán los siguientes índices calculados por medio del software libre para análisis de datos PAST.

- **Diversidad de Shannon-Weaver (H')**. Los resultados serán representados en unidades de bits/individuo.

El índice de Shannon se determina mediante la siguiente ecuación:

$$H' = -\sum p_i \ln(p_i)$$

Donde:

H' = Contenido de la información de la muestra o índice de diversidad.

Σ = Sumatoria

p_i = Proporción de individuos de la especie/individuos para el número total de individuos de la muestra (N).

$\ln(p_i)$ = Logaritmo natural de p_i

Rango	Diversidad
Entre 0 – 1,5	Baja diversidad
Entre 1,6 – 3	Mediana diversidad
Entre 3,1 – 5	Alta diversidad

Tabla 5. Categorías de calificación del Índice de Shannon

FUENTE: Zamora 1999

- **Índice de Chao 1**. Es un estimador del número de especies en una comunidad, basado en el número de especies raras en la muestra (Chao, 1984, Chao y Lee, 1992; Smith y van Belle, 1984).

$$\text{Chao1} = s + \frac{a^2}{2b}$$

S = Número de especies de la muestra.

a = Número de especies que están representadas sólo por un único individuo en la muestra. (Número de "Singletons")

b = Número de especies representadas por exactamente dos individuos en la muestra.

- **Abundancia Total**. Número de individuos registrados de una especie. (Villareal, et al, 2004).
- **Abundancia Relativa**. La abundancia relativa se determina, como la proporción de

individuos de una especie obtenidos en un determinado sitio. (n_i/N , donde n_i es el número de individuos de una especie y N el número total de individuos del sitio).

- **Similitud de Jaccard (S)**. Este tipo de análisis se realizó con la ayuda del programa Past, una vez realizado el conteo de las familias presentes en cada uno de las especies, se ingresan los datos en la hoja de Excel y guardado en formato txt, posteriormente se ingresa la hoja al programa (en caso de inconvenientes se puede ingresar los datos manualmente y directamente en el programa).

Este análisis permite comparar el porcentaje de similitud entre los puntos de muestreo, esto contribuye para poder verificar los puntos que se encuentran en iguales condiciones y en condiciones diferentes. E identificar los factores que influyen en la variación de las condiciones.

Para la estimación de diversidad se implementó el estimador de riqueza y abundancia propuesto por Chao & Jost (2012) el cual permite evaluar qué tan completo fue el muestreo por medio de las especies que se identificaron para cada sitio de muestreo, el resultado de este análisis se muestra mediante el programa INEXT (Hsieh, 2013). se utilizó el análisis de diversidad alfa expresada en números de Hill (Chao & Jost, 2010), en el cual se utilizó diversidad de orden cero (Q0) representando riqueza de especies, orden uno (Q1) el cual es el valor exponencial del índice de Shannon, teniendo en cuenta las especies más comunes en el muestreo y el orden dos (Q2) representando el inverso Simpson, mostrando las especies más abundantes de cada género (Jost, 2007; Jost et al., 2010).

CAPÍTULO III

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La toma de muestras se realizó durante 6 días; una muestra por día con tres repeticiones cada una, las mismas que fueron homogeneizadas en cada punto, obteniendo así una muestra compuesta para cada punto, se realizaron 6 réplicas a lo largo del estudio, durante los meses de mayo y agosto del 2021. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio donde fueron analizadas.

3.1 RESULTADOS DE MACRO INVERTEBRADOS A TRAVÉS DEL ÍNDICE BIOLOGICAL MONITORING PARTY (BMWP).

3.1.1 Cálculos para el índice BMWP

3.1.1.1 Resultados de los puntos P_1, P_2 y P_3 para el mes de mayo del año 2021

Tabla 6. Resultado del Índice BMWP para el mes de mayo del año 2021

N°	ORDEN	FAMILIA	ESPECIE	VALOR DE FAMILIA BMWP		
				Punto 1	Punto 2	Punto 3
1	Ephemeroptera	Baetidae	<i>Americabaetis sp.</i>	7	7	7
2	Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetis sp.</i>	-	.	7
3	Ephemeroptera	Leptohyphidae	<i>Morfoespecie 1</i>	7	.	7
4	Ephemeroptera	Leptohyphidae	<i>Thraulodes sp.</i>	.	7	.
5	Ephemeroptera	Leptohyphidae	<i>Leptohyphes sp.</i>	.	.	7
6	Diptera	Chironomidae	<i>Chironomidae sp.</i>	2	-	-
7	Diptera	Chironomidae	<i>Pentaneura</i>	2	2	2
8	Diptera	Chironomidae	<i>Morfoespecie 4</i>	-	-	2
9	Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	8	8	8
10	Diptera	Tipulidae	<i>Hexatoma sp.</i>	3	3	3
11	Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptonema sp.</i>	7	7	7
12	Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Atopsyche sp.</i>	-	7	-
13	Neuroptera	Corydalidae	<i>Corydalis sp.</i>	6	6	6
14	Haplotaaxida	Lumbricidae	<i>Morfoespecie 2</i>	0	-	0
15	Hemiptera	Naucoridae	<i>Ambrysus sp.</i>	7	7	7
16	Coleoptera	Dryopidae	<i>Morfoespecie 3</i>	7	-	7
17	Coleoptera	Ptilodactylidae	<i>Anchytarsus sp.</i>	10	-	10
18	Coleoptera	Ptilodactylidae	<i>Ptilodactyla</i>	-	10	-
19	Coleoptera	Elmidae	<i>Macrelmis sp.</i>	6	6	6

20	Coleoptera	Elmidae	<i>Phanocerus sp.</i>	-	-	6
21	Basommatophora	Lymnaeidae	<i>Lymnaea sp.</i>	4	4	4
22	Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria sp.</i>	10	10	10
23	Diptera	Syrphidae	<i>Diploneura</i>	-	2	2
24	Coleoptera	Hydrophilidae	<i>Hydrochara</i>	-	3	-
25	Diptera	Culicidae	<i>Toxorhynchites</i>	-	-	2
			BMWP	86	89	110

Para el mes de mayo según el índice BMWP, una vez asignado el valor correspondiente a cada familia según la tabla de valoración; en el punto 1, se identificaron 14 familias, se obtuvo un puntaje de 86. (tabla 6). De acuerdo al puntaje obtenido en este punto, y aplicando la metodología de Roldan, se determina que son Aguas medianamente contaminadas, pertenecientes a la clase III, con calidad aceptable, tabla 4. En el punto 2 se obtuvo una puntuación de 89, lo que indica que el agua es de clase III, aguas medianamente contaminadas; (ver tabla 4). Resaltando que en este punto se encontró familias con baja puntuación que indican deterioro en la calidad de agua. En el punto 3, se obtuvo un resultado de 110 puntos (tabla 6), obteniendo que la calidad de agua es limpia clase II. (tabla 4).

3.1.1.2 Resultados de los puntos 1, 2 y 3 para el mes de agosto del año 2021

Tabla 7. Resultados del Índice BMWP para el mes de agosto del año 2021

N°	ORDEN	FAMILIA	ESPECIE	VALOR DE FAMILIA BMWP		
				Punto 1	Punto 2	Punto 3
1	Haplotaaxida	Lumbricidae	<i>Morfoespecie 2</i>	0	-	0
2	Diptera	Syrphidae	<i>Diploneura</i>	2	2	-
3	Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	8	8	8
4	Diptera	Culicidae	<i>Toxorhynchites</i>	2	-	-
5	Diptera	Chironomidae	<i>Morfoespecie 4</i>	2	-	-
6	Diptera	Chironomidae	<i>Pentaneura sp.</i>	2	2	2
7	Diptera	Chironomidae	<i>Chironomidae sp.</i>	-	-	2
8	Diptera	Tipulidae	<i>Hexatoma sp.</i>	3	3	3
9	Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetis sp.</i>	7	-	-
10	Ephemeroptera	Baetidae	<i>Americabaetis sp.</i>	7	7	7
11	Ephemeroptera	Leptohyphidae	<i>Morfoespecie 1</i>	7	-	7
12	Ephemeroptera	Leptohyphidae	<i>Leptohyphes sp.</i>	7	-	-
13	Ephemeroptera	Leptohyphidae	<i>Thraulodes sp.</i>	-	7	-
14	Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Leptonema sp.</i>	7	7	7

15	Trichoptera	Hydropsychidae	<i>Atopsyche sp.</i>	-	7	-
16	Neuroptera	Corydalidae	<i>Corydalis sp.</i>	6	6	6
17	Hemiptera	Veliidae	<i>Rhagovelia sp.</i>	8	8	8
18	Hemiptera	Naucoridae	<i>Ambrysus sp.</i>	7	7	7
19	Coleoptera	Dryopidae	<i>Morfoespecie 3</i>	7	-	7
20	Coleoptera	Elmidae	<i>Phanocerus sp.</i>	6	6	-
21	Coleoptera	Elmidae	<i>Macrelmis sp.</i>	6	6	6
22	Coleoptera	Ptilodactylidae	<i>Anchytarsus sp.</i>	10	-	10
23	Coleoptera	Ptilodactylidae	<i>Ptilodactyla</i>	-	10	-
24	Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria sp.</i>	10	10	10
25	Coleoptera	Hydrophilidae	<i>Hydrochara</i>	-	3	-
			BMWP	114	99	90

Para el mes de agosto según el índice BMWP, una vez asignado el valor correspondiente a cada familia según la tabla de valoración; se obtuvo un total de 14 para el punto 1, 99 para el punto 2 y 90 para el punto 3, donde comparado con las categorías de calificación de agua se determinó que los valores del punto 2 y 3 se encuentra dentro del rango 61-100 lo que corresponde a aguas con características de aguas medianamente contaminadas, por lo cual la tabla indica que la calidad del agua es ACEPTABLE; y para el punto 3 el valor se encuentra dentro del rango 101 – 120 donde las características son de aguas limpias lo que nos indica que la calidad del agua es BUENA.

3.1.1.3 Promedio del índice BMWP (Biological Monitoring Party) de los puntos muestreados.

Tabla 8. Promedio del Índice BMWP por Punto de Muestreo

CÒDIGO	Valor del BMWP/COL	CLASE	CALIDAD	CARACTERÍSTICAS
P_1	100	III	Aceptable	Aguas medianamente contaminadas
P_2	94	III	Aceptable	Aguas medianamente contaminadas
P_3	100	III	Aceptable	Aguas medianamente contaminadas

Una vez obtenidos los valores para cada uno de los puntos, se calcula un promedio para cada una de las repeticiones realizadas, así tenemos el valor de 100 para el punto 1, 94 para el punto 2, 100 para el punto 3.

3.1.1.4 Análisis de resultados

En los tres puntos de estudio se identificó, como común la presencia de 16 familias, cuya presencia es de; *Hydrophilidae*, *Perlidae*, *Ptilodactylidae*, *Elmidae*, *Dryopidae*, *Naucoridae*, *Corydalidae*, *Hydropsychidae*, *Leptoheptidae*, *Baetidae*, *Tipulidae*, *Chironomidae*, *Culicidae*, *Simuliidae*, *Syrphidae* y *Lumbricidae*. Teniendo en cuenta que la suma de los valores obtenidos de las familias en los puntos de muestreo determina el grado de contaminación. Se identificaron 17 familias, los respectivos puntajes se realizan con la suma de cada familia (tabla 6, 7), con lo cual se determina las características de la calidad del agua; con clase III ubicándose en el rango de aguas contaminadas a aguas medianamente contaminadas.

la familia *Hydropsychidae*, *Perlidae* y *Corydalidae* fueron las familias con más abundancia en especímenes, la familia *Hydropsychidae* se encuentran especímenes como las larvas las cuales tienen la capacidad de colonizar diversos sustratos como rocas de diferentes tamaño, arena, restos vegetales y acumulados de algas, estas familia se encuentran en zonas de aguas rápidas, es por las características anteriores que son una de las predominante de este muestreo, puesto que a la redonda del área de estudio se encuentra con alta diversidad de flora y el brazo izquierdo del río presenta un flujo rápido. *Perlidae*, es un grupo de insectos el cual sus características de hábitat son del vivir principalmente en aguas frías, está conformada por los géneros *Anacroneuria* y *Klapalekia*, para el área de estudio la *Anacroneuria* fue el género que se identificó.

La *Anacroneuria* es de amplia distribución y diversidad, con 51 especies válidas registradas principalmente en la Región Natural Andina (Rojas & Baena 1993, Stark et al. 1999, Zúñiga et al. 2000, 2001, 2006, Zúñiga & Stark 2002, Stark & Zúñiga 2003).

Corydalidae es otra de las familias que presentan mayor presencia de individuos en esta área de estudio, esta familia vive en corrientes limpias debajo de troncos piedras y vegetación sumergida, esto determina su abundancia en esta área, puesto que el área presenta abundante flora, con resto de vegetación. Una de las características de esta familia de macroinvertebrados es que tiene más tamaño a diferencia de los demás que se encuentran en el agua.

Además de las anteriores familias se encuentra *Perlidae* de puntuación 10. Una de las características del hábitat *Perlidae* es la de estar debajo de troncos ramas y hojas, aunque el sector la actividad antropogénica es evidente, es importante mencionar que en esta área se encuentran algunos árboles de gran tamaño lo mismo como se evidencia en la figura 2. teniendo en cuenta que, aunque la actividad antropogénica es evidente y los vertimientos se evidencian, la puntuación obtenida que son aguas muy limpias, esto es da ya que se presenta la evidencia de la rizorremediación, ya que las raíces generan un proceso de oxigenación brindando protección para la sobrevivencia de los macroinvertebrados, Vázquez 2004.

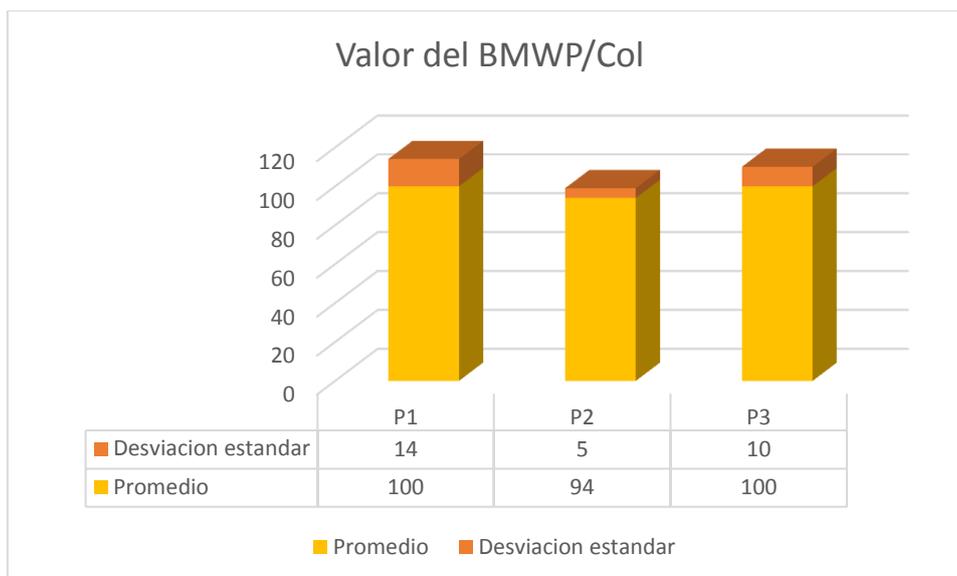


Figura 3. Porcentaje promedio del Índice BMWP para los puntos muestreados

En la figura 3, una vez analizadas las familias presentes en las muestras obtenidas y comparadas con la tabla de valores del índice BMWP, para el Punto 1 se obtuvieron aguas de características medianamente contaminadas con una calidad de ACEPTABLE con un valor de 100; para el punto 2 se obtuvieron aguas medianamente contaminadas con una calidad de ACEPTABLE al igual que en el punto 1 con un valor de 94; para el punto 3 se obtuvieron aguas con características medianamente contaminadas lo que nos indica que la calidad del agua es ACEPTABLE, con un valor de 100.

3.2 Resultados de los índices de diversidad

3.2.1 Curva de acumulación de especie

La curva de acumulación se utiliza para establecer la representatividad del muestreo y la riqueza de especies por localidad o sitio de muestreo. Como se puede observar a medida que se incrementa el número de réplicas que son las unidades de muestreo la curva tiende a estabilizarse.

La diversidad observada se encuentra dentro de los límites del 100% de confianza, lo cual es un valor satisfactorio.

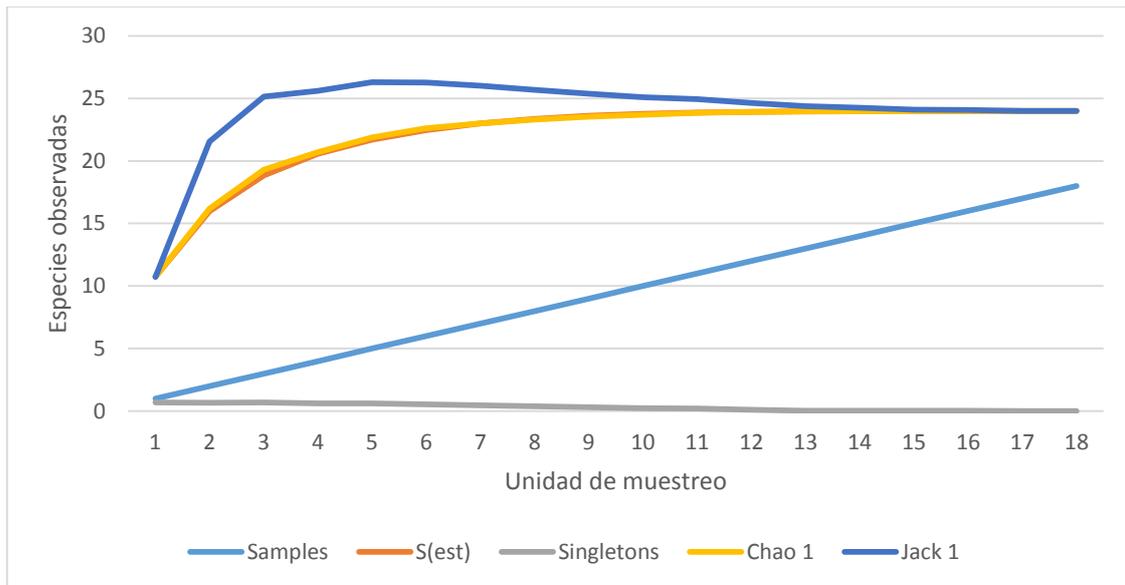


Figura 4. Curva de acumulación de especies en el mes de mayo 2021

Se aprecia en la figura 4 que la diversidad observada es de 24 especies. El estimador chao 1 muestra un total de 24 y para el Jack 1 se estima unas 24 especies a encontrar.

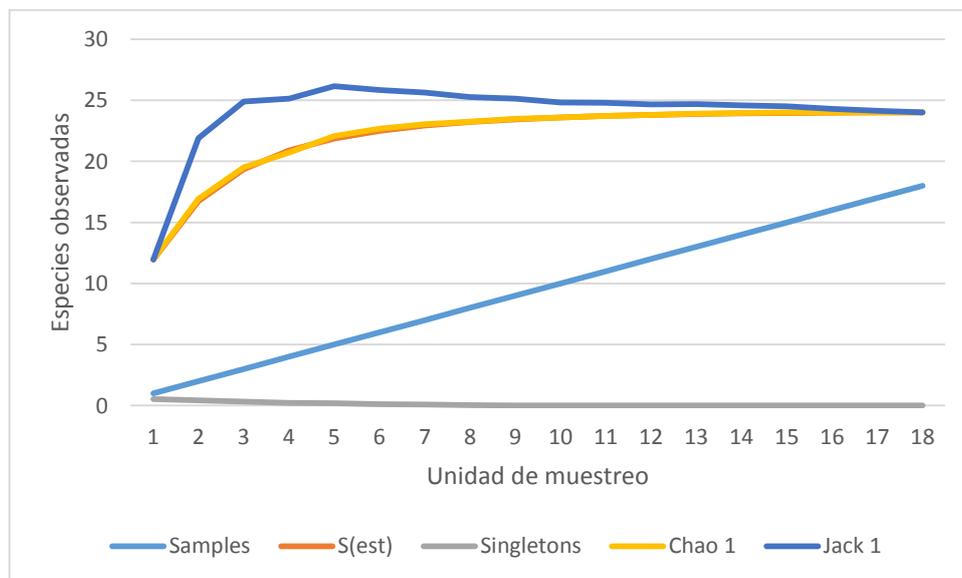


Figura 5. Curva de acumulación de especies en el mes de agosto 2021

Se aprecia en la figura 5 que la diversidad observada es de 24 especies. El estimador chao 1 muestra un total de 24 especies y para el Jack 1 se estima unas 24 especies a encontrar.

3.2.2 Índice de diversidad de Shannon

Mediante la estimación de los índices de diversidad de Shannon y Simpson, obtenidos con la ayuda del programa Past y en base a los valores de riqueza y abundancia de especies, registrados durante este muestreo.

Tabla 9. Valores de Riqueza, Abundancia y Diversidad de los Macroinvertebrados en el mes de mayo 2021

Riqueza (S)	Abundancia (N)	Shannon – Wiener (H')	Índice de Simpson	Interpretación
192	1952	4.9	0.9894	Alta Diversidad

En la tabla 9 se indica los valores obtenidos durante el mes de mayo el cual mediante los índices de diversidad de Shannon se obtuvo un valor de 4,9 y para Simpson se obtuvo un valor de 0,9894, donde en base a los resultados se obtuvo una diversidad alta para el área muestreada.

Tabla 10. Valores de Riqueza, Abundancia y Diversidad de los Macroinvertebrados en el mes de agosto 2021

Riqueza (s)	Abundancia (N)	Shannon – Wiener (H')	Índice de Simpson	Interpretación
214	2021	5.194	0.9936	Alta Diversidad

En la tabla 10 se indica los valores obtenidos durante el mes de agosto del año 2021 el cual mediante índices de diversidad de Shannon se obtuvo un valor de 5,194 y para Simpson se obtuvo un valor de 0,9936, donde en base a los resultados se obtuvo una diversidad alta para el área muestreada.

Tabla 11. Valores promedios de Riqueza, Abundancia y Diversidad de los Macroinvertebrados en la Laguna de Maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales 2021

Riqueza (S)	Abundancia (N)	Shannon – Wiener (H')	Índice de Simpson	Interpretación
203	1.986	5.047	0,9915	Alta Diversidad

Los valores promedios para la diversidad en el área de estudio según Shannon que presenta un valor de 5,047 indica una diversidad alta. El índice de Simpson presentó un valor de 0,9915, lo que también presenta una diversidad alta en promedio.

3.3 Resultados de la Abundancia

3.3.1 Resultados abundancia total

Los resultados obtenidos de los tres puntos de muestreo: (P_1, P_2, P_3), durante las dos etapas de este estudio presentaron diferentes condiciones debido a la intervención antrópica que existe en el lugar.

3.3.1.1 Resultados de la abundancia total para el mes mayo del 2021

Para el área de muestreo se registró un total de 1965 individuos

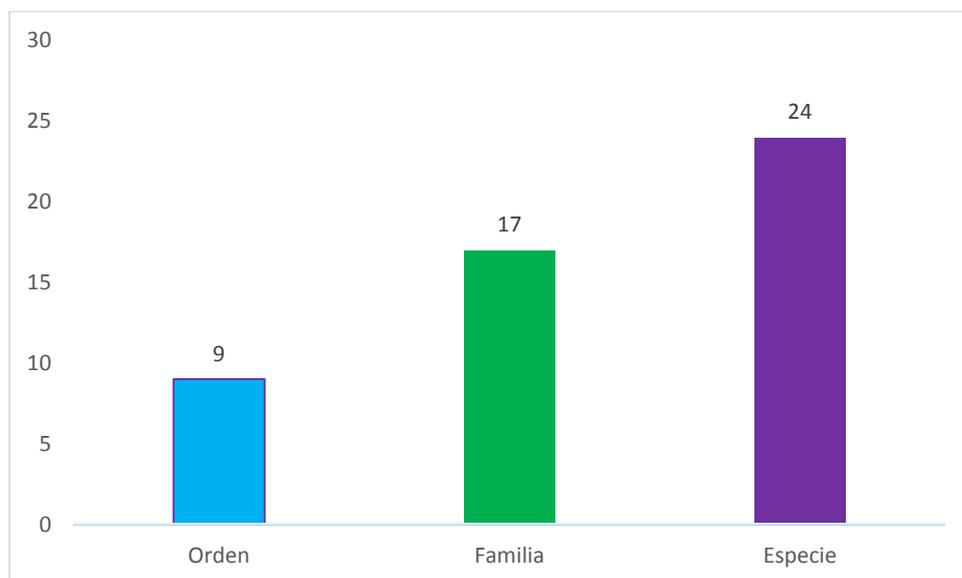


Figura 6. Número de Especies, Familias y Órdenes de Macroinvertebrados

Los individuos encontrados dentro de la muestra se encontraron distribuidos en 24 especies de 17 familias, 9 órdenes, así como lo indica la figura 6, se puede decir que existió un gran número de especies y un menor número de órdenes.

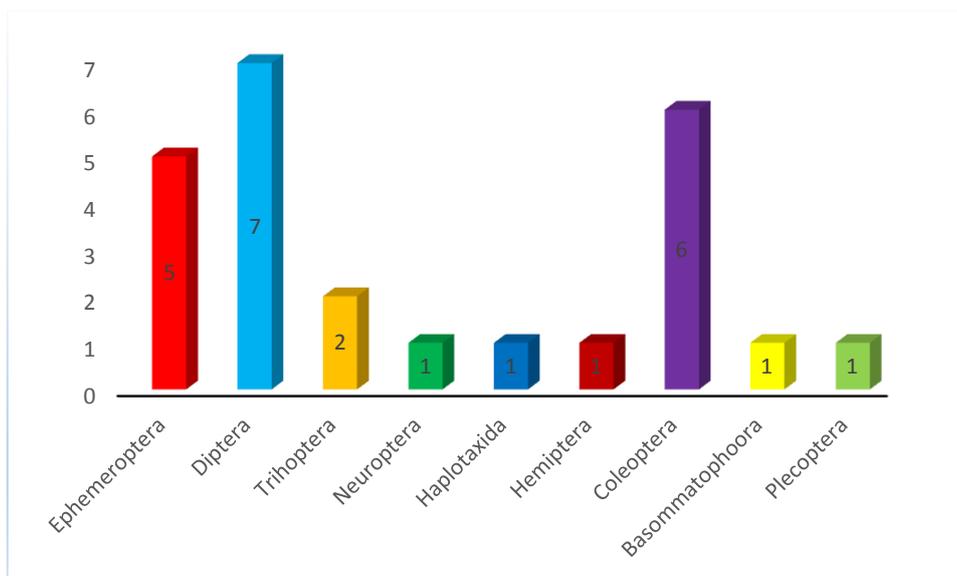


Figura 7. Número de Especies de Macroinvertebrados por Órdenes

En la figura 7 se puede apreciar que de las 25 especies existentes en el área de muestreo los órdenes con mayor riqueza son Díptera con siete especies respectivamente; seguido de Coleóptera con 6 especies; Ephemeroptera con cinco especies; el resto de órdenes están representados por una y dos especies.

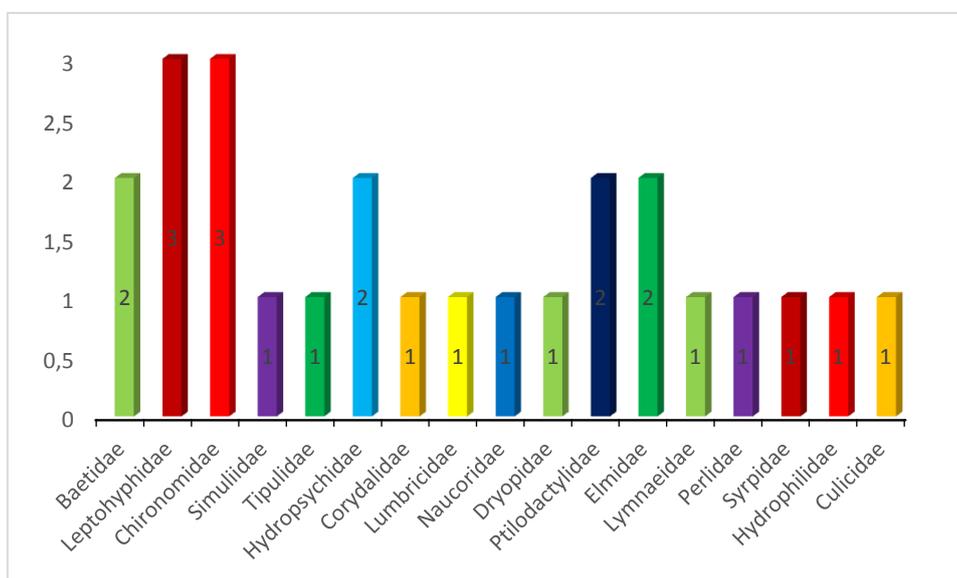


Figura 8. Número de especies de Macroinvertebrados por Familia

La figura 8 nos indica que las 17 familias existentes en el área de muestreo, las familias con mayor riqueza fueron LeptoHyphidae y Chironomidae, las mismas que presentan tres especies respectivamente, el resto de familias están representadas por una y dos especies.

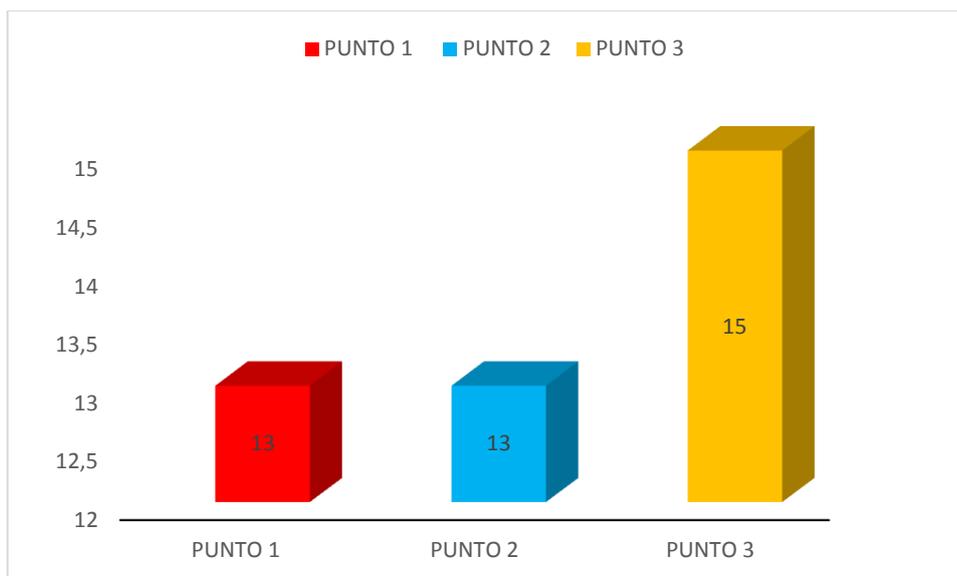


Figura 9. Número de especies de Macroinvertebrados por sitio de muestreo

En la figura 9, se puede apreciar que el punto de muestreo con mayor riqueza es el P3, el cual presentó un total de 15 especies; seguido del P1 y P2 con 13 especies.

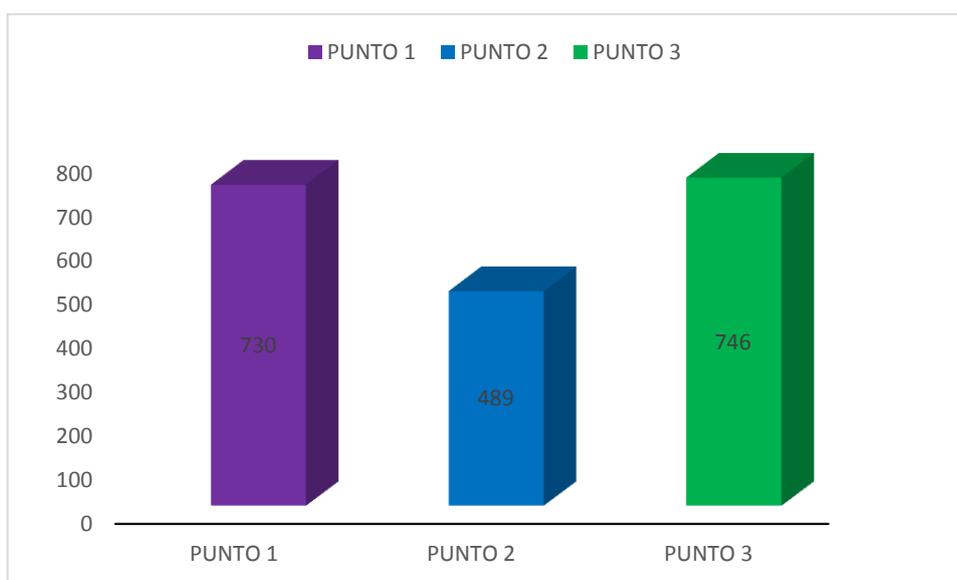


Figura 10. Número de individuos de macroinvertebrados por sitio de muestreo

En la figura 10, se puede apreciar la abundancia absoluta por sitio de muestreo, dando un total de 1965 individuos, de los cuales el sitio más abundante fue el P3 con 746 individuos, seguido del P1 con un total de 730 individuos, y en el sitio menos abundante se registró al P2 con un total de 489 individuos.

3.3.1.2 Determinación de Diversidad (Chao & Jost) de los insectos acuáticos (Macroinvertebrados) para el mes de mayo 2021

Con respecto a la completitud del muestreo, lo cual tiene que ver con el esfuerzo de muestreo, se registró un 99% general en todas las estaciones obtenido un 99,91% de cobertura para estación P3 (Salida), 99,55% para la estación de P1 (entrada), 99,21% para estación P2 (centro). El análisis de las curvas de completitud (figura 11) mostro que las estaciones con mayor riqueza estimada de especies son P3 y P1 y por último con menor riqueza estimada la estación P2.

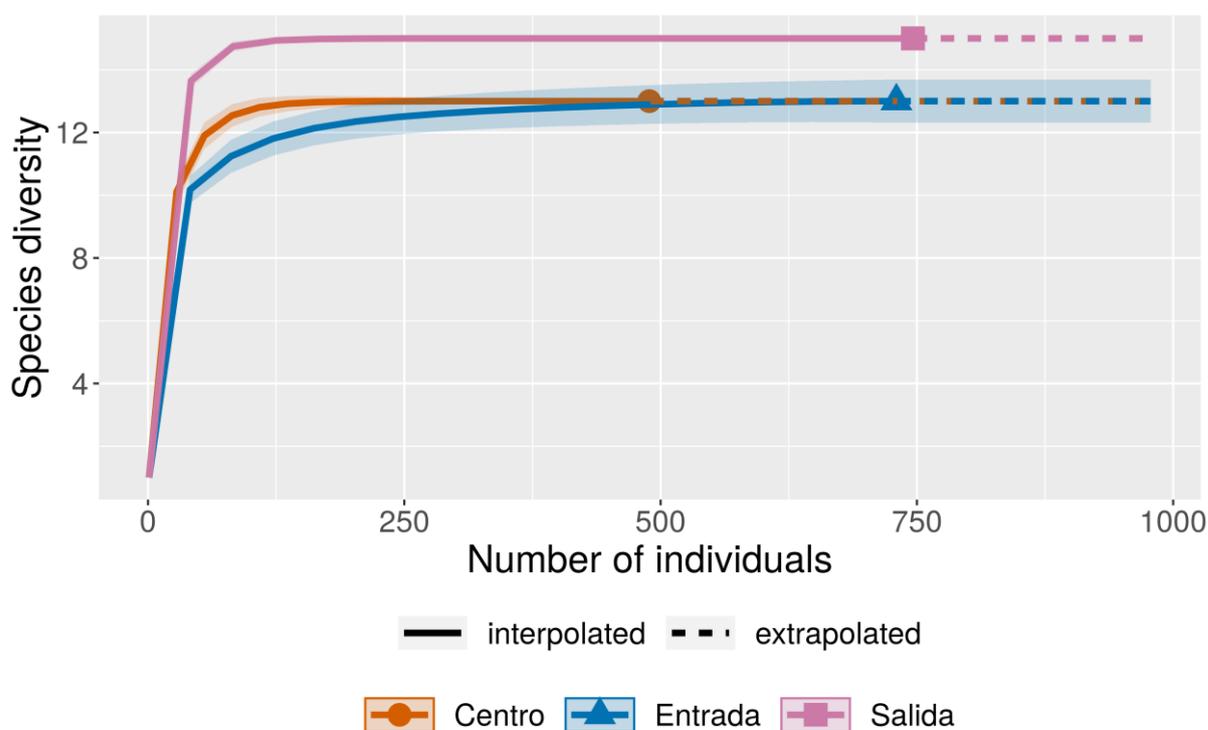


Figura 11. Curva de rarefacción de riqueza y abundancia para el mes Mayo de macroinvertebrados en los diferentes puntos de muestreo mediante el método Chao & Jost 2012. Centro (P2); Entrada (P1) y Salida (P3).

El perfil de diversidad de orden Q0, mostró que el P3 fue con mayor riqueza, son 15 especies efectivas, seguidos los puntos P1 y P2, ambas con 13 especies efectivas. Para el orden Q1 el punto con mayor número de especies comunes fue el P3 con 13,87 especies efectivas. Seguido del P2 con 10,33 especies efectivas, el punto que presentó menos cantidad de especies comunes fue el P1 con 9,95 especies efectivas. En lo que respecta para el orden

Q2 se observa que el P3 es el que presenta mayor dominancia con 12,98 especies efectivas, seguido con el P1 con 9,19 especies efectivas y con menor valor el P2 con 8,77 especies efectivas (figura 12).

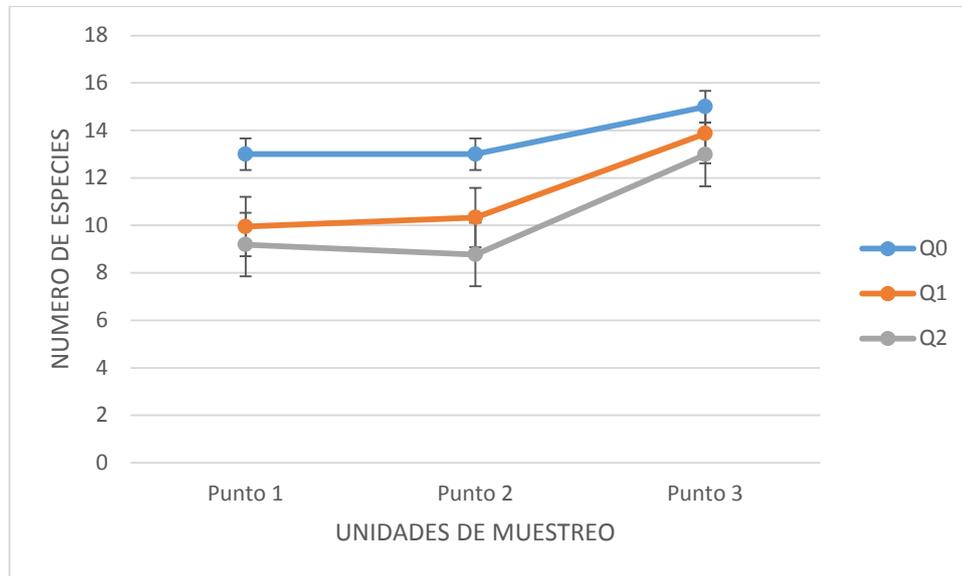


Figura 12. Perfiles de diversidad por puntos de muestreo para el mes de mayo 2021, diversidad de orden Q0: riqueza de especie; diversidad de orden Q1: especies comunes; diversidad de orden Q2: especies dominantes.

3.3.1.3 Resultados de la abundancia total para el mes de agosto 2021

Para el área de muestreo se registró un total de 2038 individuos, los cuales se encuentran distribuidos según lo explica la figura 13.

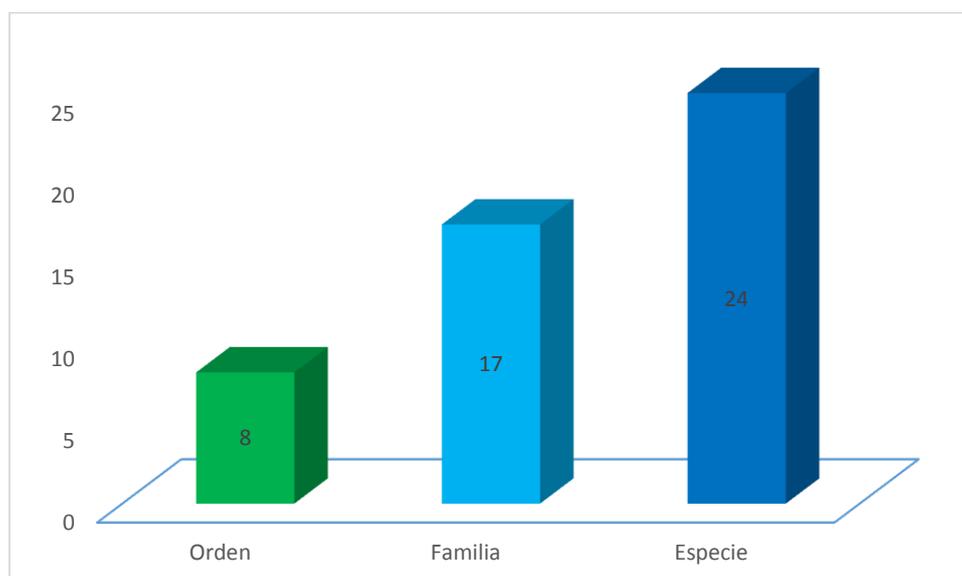


Figura 13. Número de Especies, Familias y Órdenes de Macroinvertebrados

En la figura 13 se puede apreciar que para el mes de agosto 2021 se registraron 24 especies de 17 familias, 8 órdenes, se puede decir que existió un gran número de especies y un menor número de órdenes.

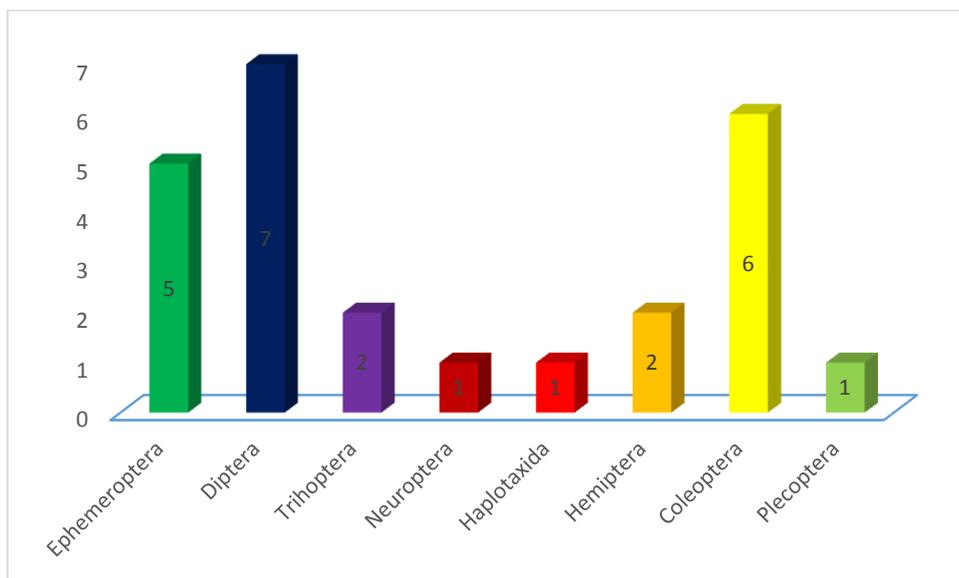


Figura 14. Número de Especies de Macroinvertebrados por Órdenes

En la figura 14 se puede apreciar que de las 25 especies existentes en el área de muestreo los órdenes con mayor riqueza son Díptera con siete especies; seguido de Coleóptera con 6 especies y Ephemeroptera con 5 especies; el resto de órdenes están representados por una y dos especies.

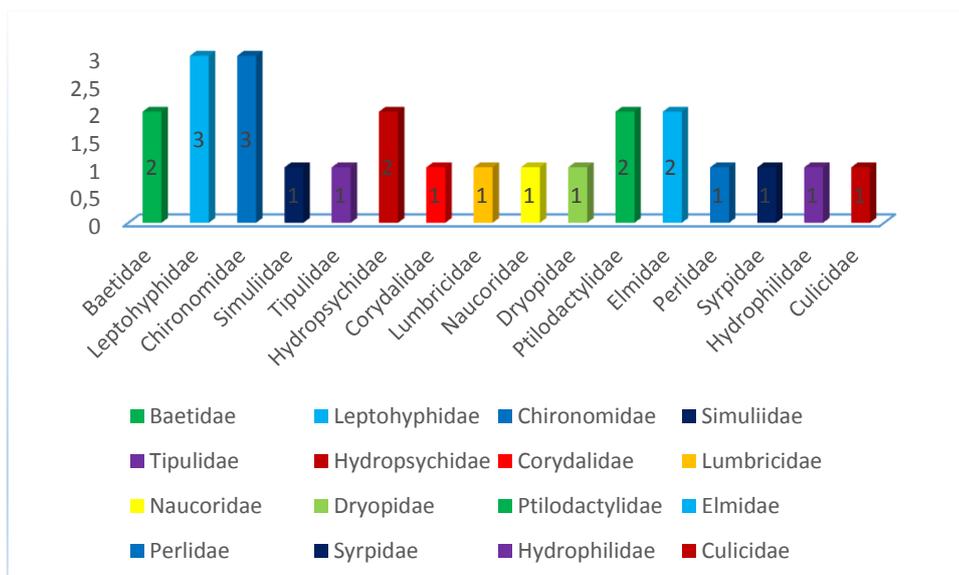


Figura 15. Número de especies de Macroinvertebrados por Familia

La figura 15 nos indica que, de las 17 familias existentes en el área de muestreo, las familias con mayor riqueza fueron Chironomidae y Leptohyphidae con tres especies, el resto de familias están representadas por una y dos especies.

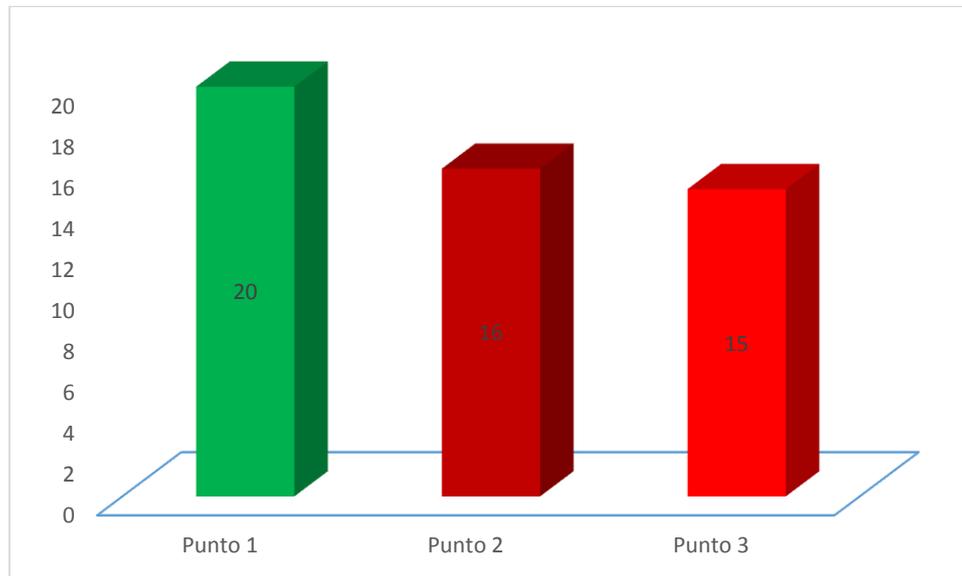


Figura 16. Número de especies de Macroinvertebrados por sitio de muestreo

En la figura 16, se puede apreciar que el punto de muestreo con mayor riqueza es el punto 1, el cual presentó un total de 20 especies; seguido del punto 2 con 16 especies, y finalmente el punto 3 presenta menor riqueza con 15 especies.

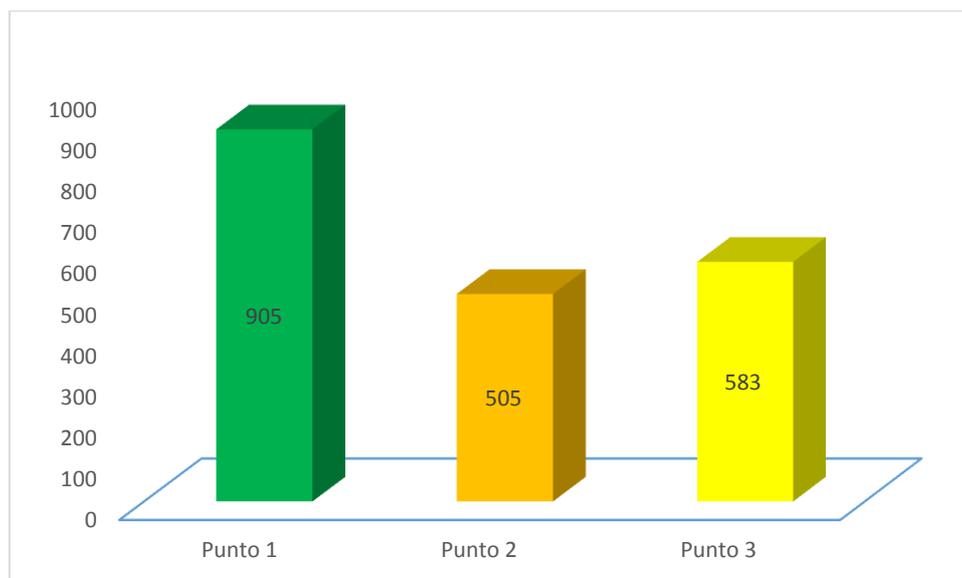


Figura 17. Número de individuos de Macroinvertebrados por sitio de muestreo

En la figura 17, se puede apreciar la abundancia absoluta por sitio de muestreo, dando un total de 2038 individuos, de los cuales el sitio más abundante fue el punto 1 con 905 individuos, seguido del punto 3 con un total de 583 individuos, y en el sitio menos abundante se registró al punto 2 con un total de 505 individuos.

3.3.1.4 Determinación de Diversidad (Chao & Jost) de los insectos acuáticos (Macroinvertebrados) para el mes de agosto 2021

Con respecto a la completitud del muestreo, lo cual tiene que ver con el esfuerzo de muestreo, se registró un 99% general en todas las estaciones obtenido un 98,77% de cobertura para estación P1 (entrada), 95,03% para la estación de P3 (salida), 91,67% para estación P2 (centro). El análisis de las curvas de completitud (figura 18) mostro que las estaciones con mayor riqueza estimada de especies son P1 y P3 y por último con menor riqueza estimada la estación P2.

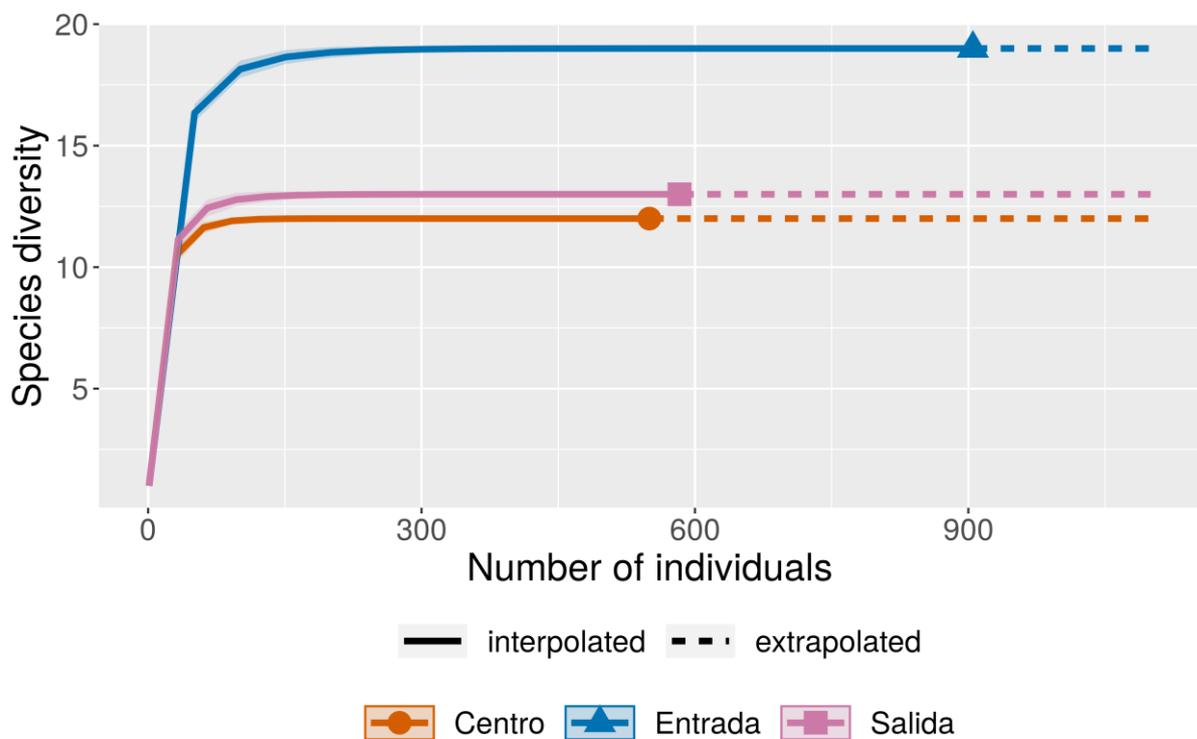


Figura 18. Curva de rarefacción de riqueza y abundancia para el mes Mayo de macroinvertebrados en los diferentes puntos de muestreo mediante el método Chao & Jost 2012. Centro (P2); Entrada (P1) y Salida (P3).

El perfil de diversidad de orden Q0, mostró que el P1 fue con mayor riqueza, son 19 especies efectivas, seguido el P3 con 13 especies efectivas y P2, con 12 especies efectivas. Para el orden Q1 el punto con mayor número de especies comunes fue el P1 con 16,40 especies efectivas. Seguido del P3 con 11,24 especies efectivas, el punto que presentó menos cantidad de especies comunes fue el P2 con 10,70 especies efectivas. En lo que respecta para el orden Q2 se observa que el P1 es el que presenta mayor dominancia con 14,80 especies efectivas, seguido con el P3 con 10,05 especies efectivas y con menor valor el P2 con 9,82 especies efectivas (figura 19).

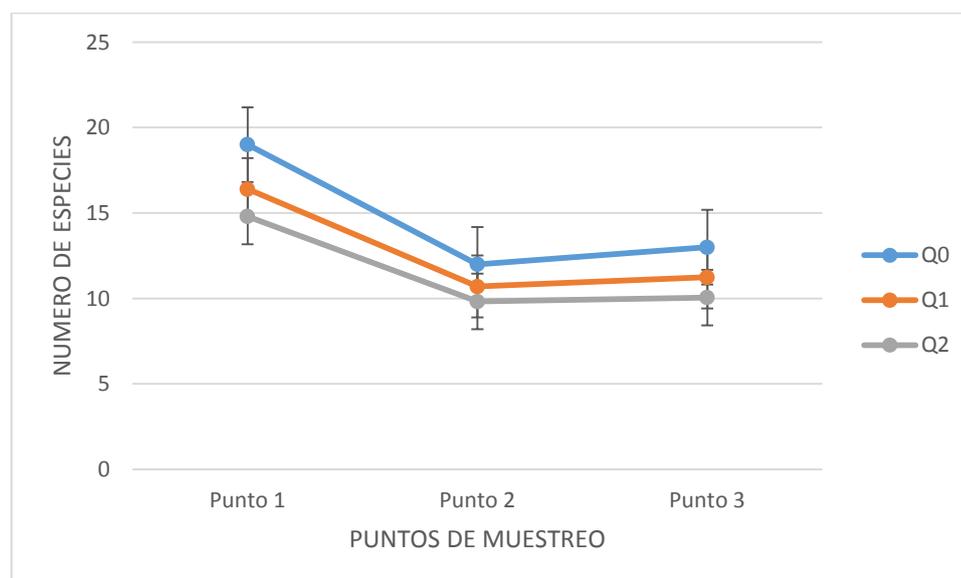


Figura 19. Perfiles de diversidad por puntos de muestreo para el mes de agosto 2021, diversidad de orden Q0: riqueza de especie; diversidad de orden Q1: especies comunes; diversidad de orden Q2: especies dominantes.

3.3.2 Resultados de la Abundancia Relativa

3.3.2.1 Resultados de la abundancia Relativa para el mes de mayo del 2021

En la figura 20, se puede observar que el sitio de mayor abundancia relativa en función a los macroinvertebrados, es el punto 3 con un valor del 60 %, seguido por el punto 1 y el punto 2 con el 52%.

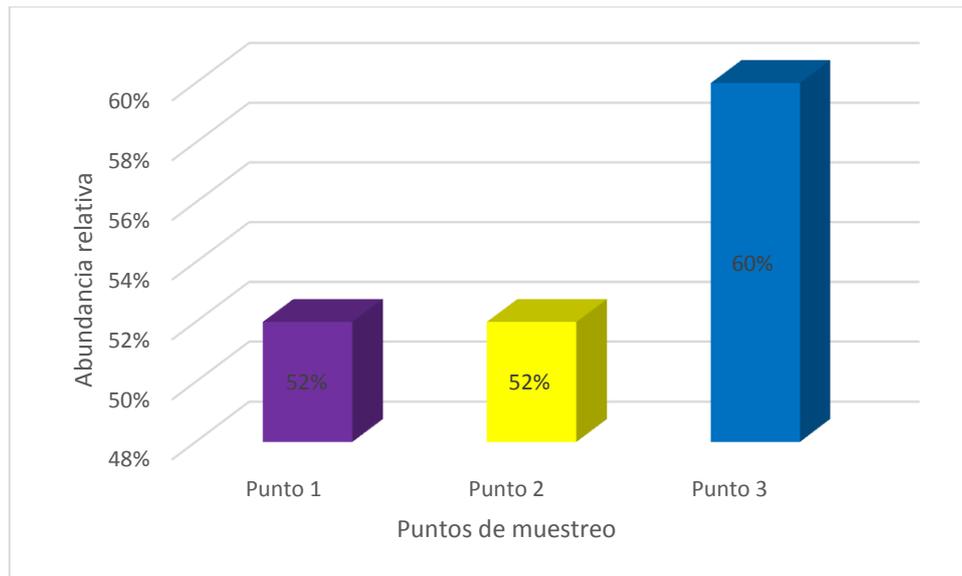


Figura 20. Abundancia Relativa de Macroinvertebrados por sitio de muestreo

La figura 21 donde se indica el análisis de la curva de dominancia-diversidad de las especies presentes dentro de los hábitats acuáticos del área de estudio, se determinó que de las 24 especies registradas la de mayor densidad fue *Morfoespecie 3* con (n: 96; Pi: 4,88); seguida *Diploneura* (n: 94; Pi: 4,78).

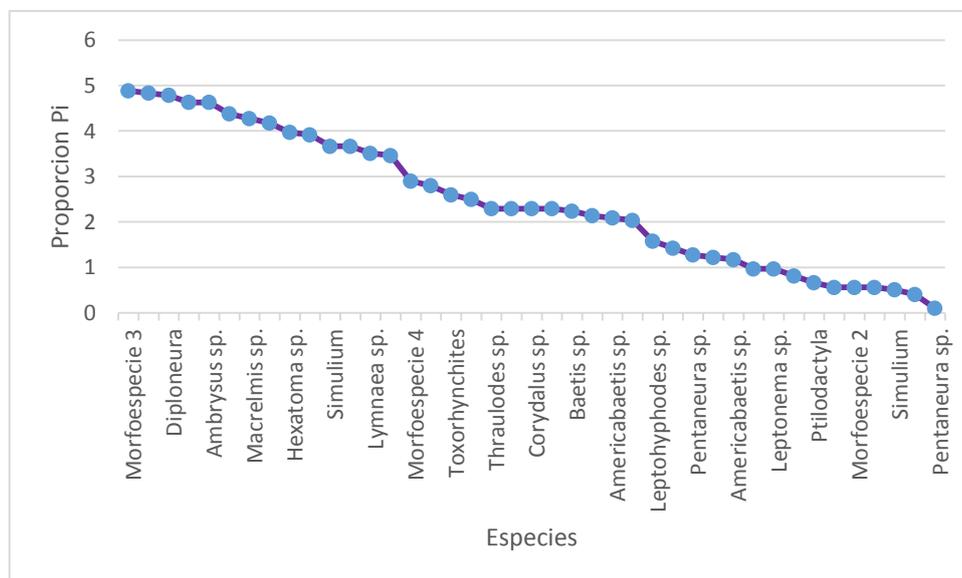


Figura 21. Curva de Abundancia-Diversidad de especies de Macroinvertebrados

3.3.2.2 Resultados de la abundancia Relativa para el mes de agosto, 2021

En la figura 22, se puede observar que el sitio de mayor abundancia relativa en función a los macroinvertebrados, es el punto 1 con un valor del 80 %, seguido por el punto 2 con el 64 % y el punto 3 con el 60 %.

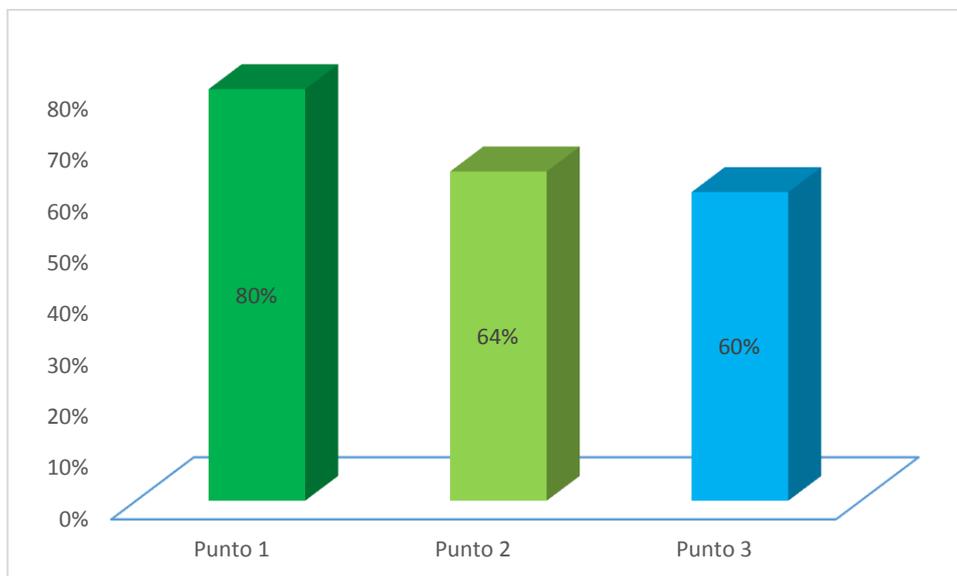


Figura 22. Abundancia Relativa de Macroinvertebrados por sitio de muestreo.

Para la figura 23 donde se indica el análisis de la curva de dominancia-diversidad de las especies presentes dentro de los hábitats acuáticos del área de estudio, se determinó que de las 24 especies registradas la de mayor densidad fue *Morfoespecie 1* con ($n= 97$; $P_i= 4,75$); seguida de *Leptonema sp.* ($n=91$; $P_i=4,46$).

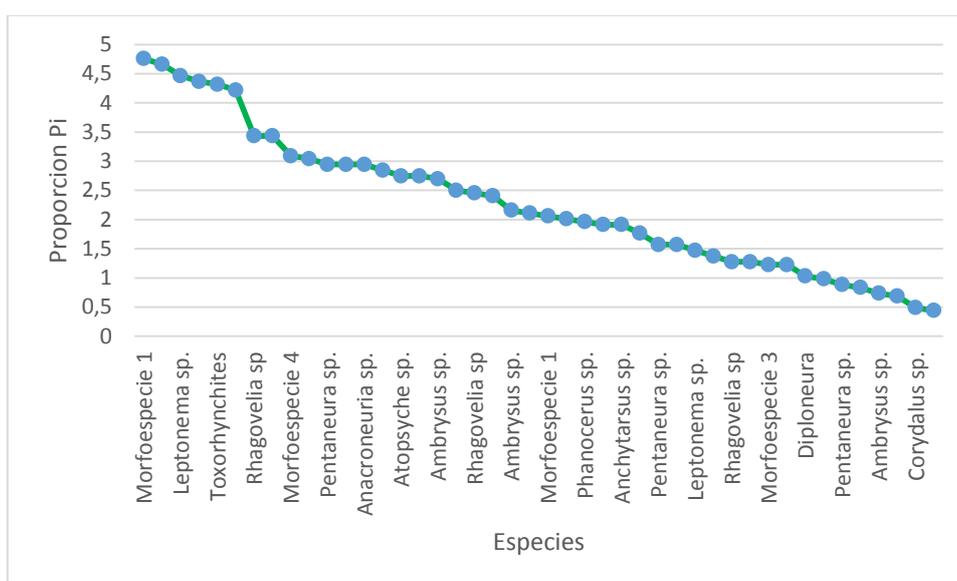


Figura 23. Curva de Abundancia-Diversidad de especies de Macroinvertebrados

3.4 Resultados del Índice De Similitud (Clúster)

3.4.1 Resultados del índice de Similitud para el mes de mayo del 2021

El análisis de Clúster indica que la similitud entre sitios de muestreo es del 2.50% y los sitios de muestreo con mayor similitud son el P_2 y P_3 con el 175%, esto se debe a las diferentes condiciones que presentó cada sitio de muestreo, puesto que el punto 1 adicional a recibir las descargas de la Laguna Facultativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales hacia la Laguna de Maduración, también se observó que se realizan actividades de dragado, mientras que el punto 2, ubicado en el centro, también presentó actividades de dragado; y el punto 3 evidentemente presentó disminución de diversidad, por las actividades que se realizan río abajo, lo cual afecta los nichos ecológicos para macroinvertebrados.

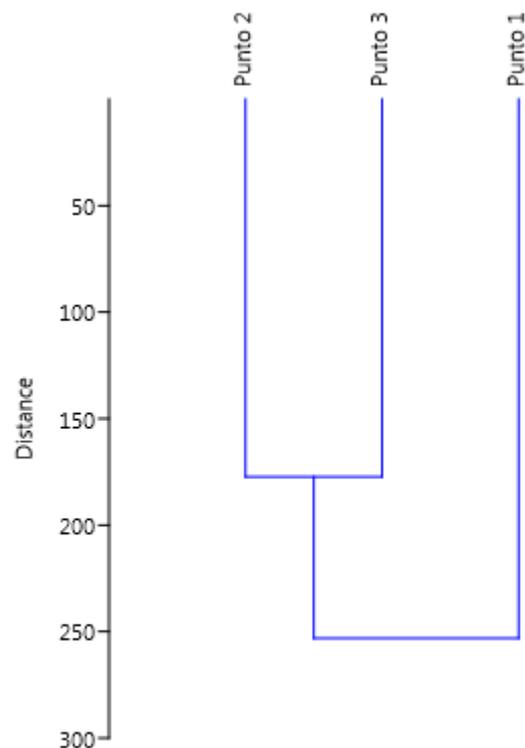


Figura 24. Clúster de Similitud de Macroinvertebrados en los 3 Puntos de Muestreo

3.4.2 Resultados del índice de Similitud para el mes de agosto 2021

El análisis de Clúster indica que la similitud entre sitios de muestreo es del 225 % y los sitios de muestreo con mayor similitud son el punto 2 y punto 3 con el 150 %, esto se debe a las diferentes condiciones que presentó cada sitio de muestreo.

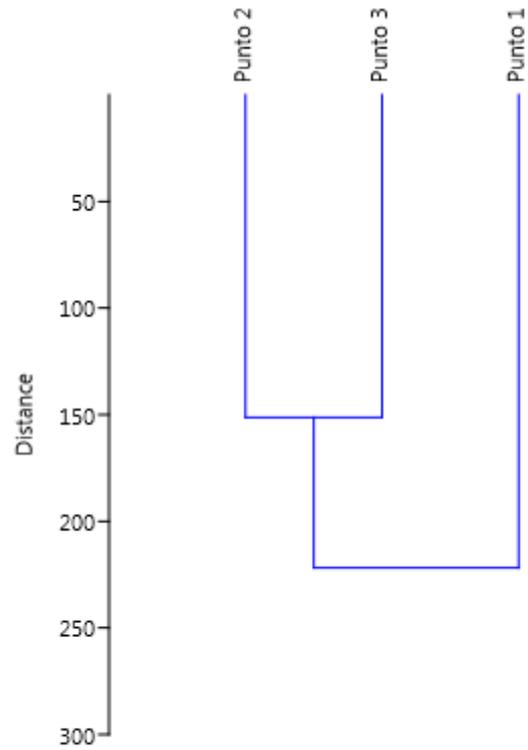


Figura 25. Clúster de Similitud de Macroinvertebrados en los 3 Puntos de Muestreo

CONCLUSIONES

Las comunidades de macroinvertebrados reportadas en los tramos investigados de la Laguna de Maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, parecen estar posiblemente maniobradas por el efecto del régimen hidrológico y estacional que altera la composición física y química de los microambientes acuáticos, favoreciendo o afectando directamente las comunidades de macroinvertebrados obtenidas entre el mes de mayo y agosto del 2021, el muestreo más representativo fue el inicial, donde las comunidades fueron más distintivas, probablemente por las condiciones de caudales más elevados por precipitación.

Se determinó la evaluación de la calidad del agua de la Laguna de Maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, en los meses de mayo – agosto del 2021, realizando un muestreo en cada mes; con la utilización de macroinvertebrados acuáticos mediante el índice BMWP.

Teniendo en cuenta los resultados del índice BMWP/Col, es posible afirmar que la calidad ecológica de la Laguna de Maduración tiende a ser mejor en épocas con niveles de baja precipitación y la calidad del recurso hídrico, llevándola de su estado de agua moderadamente contaminadas a condiciones de agua excelente, acción reflejada en los puntos de muestreo.

Los puntos de muestreo se consideró el punto de entrada de la Laguna de maduración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Aguazul-Casanare, como el punto uno; el segundo punto, fue tomado a 500m a los costados de la Laguna de maduración; el tercer punto se estableció en la descarga del brazo izquierdo del Río Únete.

La bioindicación con macroinvertebrados bentónicos puede verse directamente afectada por los niveles de precipitación y el régimen hidrológico, que, al aumentar el caudal de los cuerpos hídricos y el nivel de velocidad hidráulica, modifica las condiciones de los

microhábitats a nivel físico y químico, traducido en muestreos poco abundantes que finalmente pueden limitar la certeza de evaluación de calidad del recurso.

El análisis BMWP adaptado para Colombia, género como valores en promedio para el punto uno, un valor de 100, en el punto dos un valor de 94 y en el punto tres se obtuvo un valor de 100, presentan una calidad de agua ACEPTABLE, cuyas características son de aguas medianamente contaminadas, se concluye que la calidad de agua es excelente en los tres sitios muestreados.

El uso de los bioindicación genera una serie de beneficios significativos, que se ven reflejados a nivel económico y de validez, en el sentido que brindaron una opción de evaluación de la calidad de agua para un cuerpo hídrico superficial del que no se tenía ningún tipo de información y en el que los análisis fisicoquímicos no hubiesen podido determinar el estado ecológico del recurso.

La curva de rarefacción bajo el método de Chao y Jost, (2012) indica que este estudio alcanzó un número considerable de especies reales en los distintos puntos de muestreo, representatividad atribuida a las condiciones óptimas durante el muestreo (Olarte-Quíñonez, et al., 2016).

Mediante el índice de diversidad de Shannon se determinó que los puntos uno, dos y tres, presentan una diversidad alta, durante las seis réplicas, esto se debe a que no existe una variabilidad extensa en cuanto al número de familias en cada réplica.

El análisis de Clúster de los tres puntos de muestreo para cada una de las réplicas nos indica, siendo los puntos de muestreo con mayor similitud el P2 y el P3 respectivamente, esto se puede atribuir a las actividades antropogénicas que existen en estos puntos, puesto que el P1 recibe las descargas del sistema de Laguna Facultativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, y también posee actividades de dragado; en el P2, ubicado a los costados,

también existen actividades de dragado; por lo tanto en el P3 se observó una disminución de diversidad por las actividades que se realizan, y afecta los microhábitats que ocupan los macroinvertebrados.

RECOMENDACIONES

Ciertamente el presente estudio marca una precedente para futuras investigaciones, ya que lo realizado no es suficiente para concretar de manera puntual el estado ambiental del afluente, por lo cual es indispensable que los monitoreos se realicen continuamente durante todo el año, complementando con estudios microbiológicos y análisis fisicoquímicos, estableciendo las épocas del año donde la calidad de agua es mucho mejor, como también establecer el tipo de vertimientos que afectan el cuerpo de agua.

El área de Unidad Administrativa, Técnica, Operativa y de Proyectos de la Empresa de Servicios Públicos de Aguazul ESPA SA ESP deberá monitorear los sitios cada 3 meses al año, para determinar con mayor certeza la riqueza existente en el área de muestreo.

Es importante, resaltar que el afluente cuenta con una gran diversidad de flora en sus alrededores, no obstante, la ampliación de la frontera agrícola está fragmentando este tipo de hábitat, repercutiendo considerablemente promuevan campañas de sensibilización en la zona, donde se resalta la importancia de la conservación de los cuerpos de agua, como recursos indispensables para el desarrollo integral de la vida.

El área de Unidad Administrativa, Técnica, Operativa y de Proyectos de la Empresa de Servicios Públicos de Aguazul ESPA SA ESP deberá solicitar un monitoreo biológico y físico-químico a los representantes legales de las mineras que efectúan cambios en el cauce del Río Únete.

Tomar en cuenta para futuros monitoreos las especies pertenecientes a la familia señalada como sensible: Ptilodactylidae, por su alta sensibilidad a las perturbaciones.

Considerar realizar investigaciones con otro tipo de métodos, como físicos-químicos para así garantizar la veracidad de los datos obtenidos en la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

CALLES, J. *La contaminación del agua en Ecuador* [blog] Ecuador, 25 abril 2012, [Consulta: 18 agosto 2021]. Disponible en: <http://agua-ecuador.blogspot.com/2012/04/la-contaminacion-del-agua-en-ecuador.html>.

CARRERA C. & FIERRO K. *Manual de Monitoreo: Los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua* [en línea]. Quito-Ecuador: EcoCiencia, 2001, pp 16-17. [Consulta: 22 Julio 2021]. Disponible en:

https://issuu.com/fundacionecociencia/docs/manual_macroinvertebrados_acuaticos_ecociencia.

Hanson Paúl, Springer Monika & Ramirez Alonso. Introducción a los grupos de macroinvertebrados acuáticos. SciELO - Scientific Electronic Library Online (2010)

GUEVARA, A; *Métodos de análisis para la evaluación de la calidad del agua* [en línea]. Lima (1996). Lima, CEPIS . [Consulta: 10 noviembre 2021]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031279/031279.pdf>

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO. Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la directiva marco del agua en la. En C. H. Ebro, & M. J. Fuente (Ed.). Barcelona, España http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/Protocolos_muestreo_biologico_con_portada_tcm7-16059.pdf

FORERO, Adriana; REINOSOS Gladys & GUTIÉRREZ Carolina. “Evaluación de la Calidad del Agua del Río Opia mediante macroinvertebrados acuáticos y parámetros fisicoquímicos” *SciELO - Scientific Electronic Library Online* [en línea], 2009, (Colombia) 35(2), pp. 371-387. [Consulta: 21 septiembre 2021]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/cal/v35n2/v35n2a12.pdf>

CASTRO, GERMÁN; GONZÁLEZ IGNACIO & VÁZQUEZ GABRIELA.

“Bioindicadores como herramientas para determinar la Calidad del Agua”. *El Hombre y su Ambiente*. [en línea], 2006,(México), 28(6), pp. 41-48, [Consulta: 30 agosto 2021].

Disponible en: <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n60ne/Bio-agua.pdf>

LARREA, Jeny; ROJAS, Marcia; ROMEU Beatriz; ROJAS Nidia & HEYDRICH Mayra “Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas” Centro Nacional de Investigaciones Científicas Cuba. [en línea].2013,(Cuba) 44(3), pp. 24-34. [Consulta: 2 noviembre 2021]. Disponible en

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181229302004>

ARCOS, Raúl; DÍAZ, Gerardo & DOMÍNGUEZ. Alejandra (31 de Octubre de 2002). Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. p. 3 *MACROFITAS ACUÁTICAS: ¿CONTAMINANTES O SOLUCIONES DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS?* Cancún, México. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-007.pdf>

AGUILAR, Alonso. "Los Peces como Indicadores de la Calidad Ecológica del Agua". *Revista Digital Universitaria* [en línea] 2005 (México) 6(8), pp.2-14. [Consulta: 09 septiembre 2021].ISSN: 1067-6079. Disponible en:

http://www.revista.unam.mx/vol.6/num8/art78/ago_art78.pdf

AGUIRRE, Jorge. Validación de los indicadores biológicos para el monitoreo de la cuenca del río Yanuncay [en línea] (tesis) (Pregrado)-Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de ciencias Agropecuarias y ambientales, Cuenca, Ecuador. 2011, p 24, [Consulta: 04 Agosto 2021]. Disponible en:

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1197/14/UPS-CT002208.pdf>

ANEXOS

REGISTRO FOTOGRÁFICO

LUGAR DE MUESTREO PUNTO 1	LUGAR DE MUESTREO PUNTO 2
 A photograph showing two individuals in a grassy field. One person in the foreground is wearing a red cap, a blue long-sleeved shirt, and a face mask, holding a blue pipe. Another person in a white shirt and blue pants is visible in the background.	 A photograph of a person in a blue protective suit and cap, kneeling by a pond. They are holding a net. In the foreground, there are several white plastic bags and a green glove, suggesting sample collection.
LUGAR DE MUESTREO PUNTO 3	
 A photograph showing a person in a blue shirt standing in a stream. A large, light-colored corrugated pipe runs along the bank of the stream. The background is filled with dense green vegetation.	
ANEXOS DE RECOLECCIÓN DE MACROINVERTEBRADOS	



ANEXOS DE MACROINVERTEBRADOS PRESENTES EN LAS MUESTRAS

Ptilodactylidae



Elmidae



Chironomidae

