

SPATIAL AND TEMPORAL COMPARISON OF WATER QUALITY INDEXES OF THE MAIN CHANNEL OF THE HATO DE LA VIRGEN URBAN MICROBASIN, IBAGUÉ-TOLIMA

COMPARACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA DEL CAUCE PRINCIPAL DE LA MICROCUENCA URBANA HATO DE LA VIRGEN, IBAGUÉ-TOLIMA

Jaramillo-Quintero, M. C.¹; Salcedo-Saavedra, J. N.²; Guío-Duque, A. J.³

¹**Ingeniera Forestal María Camila Jaramillo Quintero.** Programa de Ingeniería Forestal. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima. e-mail: mcjaramilloq@ut.edu.co.

Enlace ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8013-5774>

²**Ingeniera Forestal Juddy Natalia Salcedo Saavedra.** Programa de Ingeniería Forestal. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima. e-mail: insalcedos@ut.edu.co. Enlace ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0757-8505>

³**Magister en Ciencias Ambientales Antonio José Guío Duque.** Grupo de Investigaciones en Gestión Ambiental de la Universidad del Tolima – GIGA-UT. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima. e-mail: aguio@ut.edu.co. Enlace ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0904-4507>

Entidad

Universidad del Tolima. Barrio Santa Helena, Ibagué, Tolima, Colombia
Tel: 57-6082771212, Ext: 9923
E-mail: aguio@ut.edu.co

Recibido: 25/03/2025 / Aceptado: 01/07/2025

Resumen

Se compararon espacial y temporalmente índices de calidad del agua del cauce principal de la microcuenca urbana Hato de la Virgen, uno de los corredores ecológicos que hacen parte de la estructura ecológica principal urbana del municipio de Ibagué, Tolima. Durante dos temporadas climáticas contrastantes (Aguas Altas y Aguas Bajas) y desde el nacimiento de la quebrada Hato de la Virgen y hasta su desembocadura, se establecieron cinco estaciones de muestreo. Se calcularon Índices de Contaminación (ICOs), Índice de Calidad del Agua (ICA), e Índices biológicos de calidad del agua, para finalmente a través de un análisis de varianza con su prueba de confirmación, un análisis de conglomerados y de componentes principales determinar la existencia de diferencias significativas entre las estaciones y los periodos climáticos. Se determinó que la calidad del agua en cada una de las estaciones, a lo largo del cauce principal de la microcuenca es similar y que las variaciones que se presentaron obedecen a la

contaminación propia de cada sitio. De la misma manera, existe una baja variación en los valores de los índices de calidad del agua entre épocas pluviométricas, lo que demuestra que, el efecto de dilución que teóricamente se presenta con las lluvias, no altera significativamente la calidad del agua de la microcuenca.

Palabras clave: microcuenca urbana, calidad del agua, índices de calidad, variación espacial, variación temporal.

Abstract

Water quality indexes of the main channel of the Hato de la Virgen urban micro-basin, one of the ecological corridors that are part of the main urban ecological structure of the municipality of Ibagué, Tolima, were compared spatially and temporally. During two contracting climatic seasons (Aguas Altas and Aguas Bajas) and from the source of the Hato de la Virgen stream to its mouth, five sampling stations were established. Pollution Indices (ICOs), Water Quality Index (ICA), and biological indices of water quality were calculated, to finally, through a variance analysis with its confirmation test, a cluster and principal component analysis, determine the existence of significant differences between seasons and climatic periods. It was determined that the quality of the water in each of the stations, along the main channel of the microbasin, is similar and that the variations that occurred are due to the contamination of each site. In the same way, there is a low variation in the values of the water quality indexes between rainfall periods, which demonstrates that the dilution effect that theoretically occurs with the rains does not significantly alter the water quality of the micro-basin.

Keywords: urban micro-basin, water quality, quality indexes, spatial, temporal variation.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el agua es reconocida como un recurso esencial que demanda una atención prioritaria debido a su vital importancia para la preservación de la vida. Sin embargo, se encuentra expuesta a diversos escenarios de deterioro, muchos de los cuales pueden ser irreversibles (Castro *et al.*, 2014). Es por ello que se requieren evaluaciones y monitoreos constantes de su calidad, empleando una variedad de metodologías, que van desde la comparación con normativas vigentes hasta el uso de índices de calidad fisicoquímica y biológica del agua (Castro *et al.*, 2014; Jofré, 2021).

La variación espacial y temporal juega un papel crucial en la calidad del agua, ya que los diferentes parámetros que la definen pueden experimentar fluctuaciones significativas tanto en el espacio como en el tiempo. Esta variabilidad está influenciada por una serie de factores, como la geografía del área de estudio, la temporada del año, las actividades humanas y las condiciones climáticas. Por ejemplo, en un mismo cuerpo de agua, la calidad puede variar de manera considerable de un punto a otro debido a la influencia de vertimientos específicos o la presencia de fuentes de contaminación locales. Del mismo modo, la calidad del agua puede cambiar a lo largo del tiempo debido a factores estacionales, como las lluvias intensas que pueden aumentar la escorrentía superficial y transportar

contaminantes hacia los cuerpos de agua (Gómez & Peñuela, 2016; Chunfeng *et al.* 2017 y Dhungel, 2018).

En el contexto colombiano, los ecosistemas acuáticos enfrentan el desafío de recibir y transportar cargas contaminantes generadas por vertimientos de aguas residuales sin tratamiento previo, lo que se agrava con el crecimiento demográfico y económico (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2014). Un ejemplo de esto es la microcuenca urbana Hato de la Virgen en Ibagué, Tolima.

La microcuenca urbana Hato de la Virgen es uno de los treinta y ocho (38) corredores ecológicos que hacen parte de la estructura ecológica principal urbana del municipio de Ibagué (Tolima, Colombia). Asimismo, esta microcuenca es uno de los referentes socioambientales más importantes, debido a que sobre ella se encuentra ubicado el porcentaje más alto de la población de esta ciudad (Ávila Urueña y Molina Camacho, 2018). y que se ha evidenciado que diferentes procesos de desarrollo urbanístico y económico ejercen presión sobre ella (Alcaldía de Ibagué *et al.*, 2015; Ávila & Molina, 2018).

Además, el cauce principal de esta microcuenca es una corriente superficial que recibe la descarga de aguas lluvias y sanitarias a lo largo de su recorrido, desde sectores aguas arriba hasta su desembocadura en el río Chípalo (Corporación Autónoma Regional del Tolima [CORTOLIMA], 2016). Estudios previos realizados por la Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado [IBAL] (2020) quienes han calculado un Índice de Calidad del Agua (ICA) regular (0,60 – 0,67) confirman un severo deterioro ambiental y

degradación del paisaje en esta microcuenca.

En diferentes documentos, la Alcaldía de Ibagué *et al.* (2015) y la Personería Municipal de Ibagué (2021) han determinado cincuenta y un (51) vertimientos directos de aguas residuales de origen doméstico y dieciocho (18) descargas pluviales, también, el pésimo estado de la infraestructura genera seis (6) vertimientos más, gracias a las malas conexiones en el alcantarillado de las viviendas, a su vez hay evidencia de que en ciertos tramos de la microcuenca hay tres (3) puntos específicos de disposición directa de residuos sólidos. Asimismo, el IBAL (2020) da cuenta del total de descargas de contaminantes que se vierten a la quebrada, representadas en 11,15 t/año de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y 9,22 t/año de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

A nivel mundial, diversos estudios se han enfocado en analizar la calidad del agua en microcuencas urbanas, periurbanas y rurales, destacando la influencia de factores como los usos del suelo, la presencia de metales pesados y el uso de la tierra sobre la misma. Algunos de estos estudios han empleado una variedad de técnicas de análisis, incluyendo análisis fisicoquímicos, microbiológicos y el uso de índices biológicos y de calidad del agua, tales como Valladolid *et al.*, (2010); Bhadra *et al.*, (2014); Escribano *et al.*, (2018) y Barrientos *et al.*, (2019). Otros se han centrado en estimar las variaciones espacio temporales de esos mismos parámetros: Guzmán *et al.* (2011); Herrera *et al.* (2013); Martínez *et al.* (2016); Morales *et al.* (2022); Jo *et al.* (2022) y Melad *et al.* (2024), entre otros.

En Colombia los trabajos que se han realizado han estado enfocados en evaluar

la calidad del agua principalmente en cuencas rurales y periurbanas mediante el uso de bioindicadores acuáticos y parámetros fisicoquímicos, lo que permite decir que la investigación sobre cuencas urbanas aún es limitada (Mosquera y Mosquera, 2017; Ayala *et al.*, 2019; Meneses *et al.*, 2019; Mosquera y Peña, 2021). No obstante, ejemplos de contribuciones en donde se hacen estimaciones sobre las variaciones espacio temporales de la calidad del agua son los trabajos realizados por Cañas (s.f.); Chavarro y Gélvez (2016); Mosquera (2018); Carrillo (2020); Colmenares y Cruz (2020); Herrera y Traslaviña (2021) y Giraldo (2022), en donde se evaluó la variación espacio temporal de la calidad de las aguas de cuerpos urbanos, periurbanos y rurales, a partir del cálculo de algunos índices ICO, ICA, entre otros.

En el caso particular de Ibagué, se han realizado algunos estudios que revelan altos niveles de contaminación en cuerpos de agua como el río Combeima y la Quebrada la Balsa, asociados principalmente a la actividad humana sin control sanitario ni ambiental adecuado (Ospina, 2015; Ospina *et al.*, 2015; Salazar *et al.*, 2016; Acevedo & Ballesteros, 2019), pero no fue un objetivo específico definir las variaciones espacio temporales de la calidad de agua en los cuerpos de agua estudiados.

Es importante destacar que estos estudios constituyen un valioso aporte para la comprensión y abordaje de los desafíos ambientales actuales. Sin embargo y de acuerdo con lo descrito anteriormente, se evidencia que hay un vacío de información respecto a la determinación de la calidad de agua en quebradas urbanas, especialmente en la ciudad de Ibagué.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es el de determinar si existen variaciones espacio temporales de los índices de calidad de agua del cauce principal de la microcuenca urbana Hato de la Virgen, Ibagué-Tolima, con el ánimo de proporcionar información clave para la gestión sostenible del agua y la protección de los ecosistemas acuáticos, contribuyendo así a mejorar el estado ambiental y promover la sostenibilidad de las comunidades locales.

Finalmente, se hace mención que esta investigación fue desarrollada en el marco del Peritaje realizado por la Universidad del Tolima (2022): *“Evaluación ambiental centrada en la calidad del agua y vertimientos en la microcuenca urbana Hato de la Virgen”*.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de trabajo

Se utilizó la información contenida en el informe final del proyecto de peritaje: *“Evaluación ambiental centrada en la calidad del agua y vertimientos en la microcuenca Hato de la Virgen”* realizado por la Universidad del Tolima (2022). En dicho informe, se menciona que los muestreos fueron realizados sobre el cauce principal de la microcuenca urbana Hato de la Virgen, que hace parte de la cuenca del río Chipalo en Ibagué, Tolima (Figura 1).

Su cauce principal tiene origen a una altura de 1151,55 msnm en el barrio Versalles, ubicado en el centro oriente de la ciudad de Ibagué, recorre 5,98 km con dirección nororiental hasta desembocar en el río Chípalo en una elevación de 964 msnm aproximadamente, detrás del barrio Topacio en la comuna 8 (Alcaldía de Ibagué *et al.*, 2015).

El cauce principal presenta una pendiente promedio de 3,1 % y su régimen hidrológico natural se encuentra alterado por la existencia de estructuras hidráulicas de drenaje urbano (colectores del sistema de alcantarillado de la ciudad), que drenan parte de las aguas pluviales y residuales hacia el

cauce principal de la quebrada (Alcaldía de Ibagué *et al.*, 2015). Actualmente, el área de la microcuenca se entrecruza con edificaciones, parques, canchas, lotes, asfalto y vegetación que ha sido introducida reemplazando paulatinamente la cobertura natural de la que queda tan solo el 2% (CORTOLIMA, 2016).

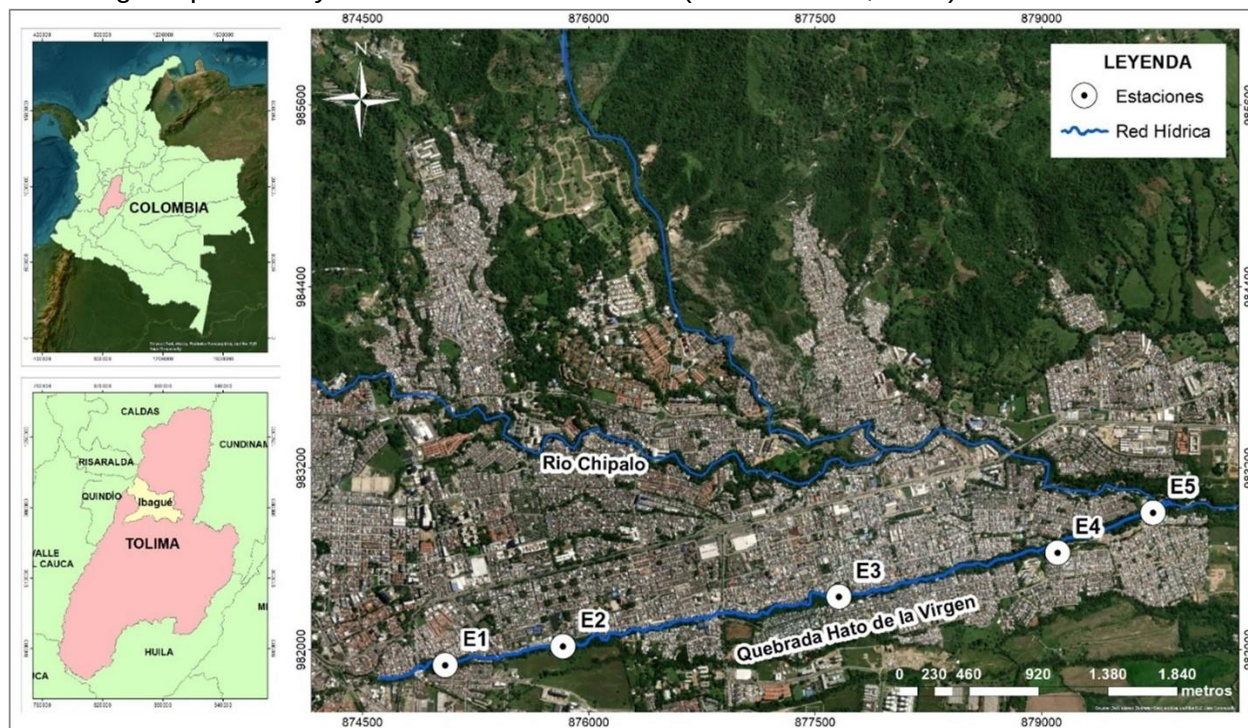


Figura 1. Localización del cauce principal de la Microcuenca Urbana Hato de la Virgen y de las estaciones de muestreo. E1 = Hacienda, E2 = Jordán, E3 = Musicalia, E4 = Topacio. **Fuente:** Los autores.

Cinco estaciones fueron ubicadas desde el nacimiento hasta la desembocadura (ver la tabla 1) y sus características generales son las siguientes:

E1 (Barrio Hacienda de Piedra Pintada): El agua de esta estación es turbia, y tiene un olor a agua residual. El sedimento presentó olor a material residual. Evidencia de erosión local leve y de una sustancia de color ocre en

el agua y sedimento. Presencia de carreteras de grava y asfalto, alcantarillas y dos puntos de vertimientos. En el margen derecho hay presencia de bosque nativo y senderos, mientras que el izquierdo hay presencia de bosque, pastos, zona residencial y zona recreacional. Presencia de basura de diferente origen: material de construcción, objetos domésticos y de uso común, entre otros.

Tabla 1. Estaciones de muestreo utilizadas para el levantamiento de información en campo.

No	Estación	Abreviatura	Coordenadas		Altitud (m.s.n.m.)
			Norte	Oeste	

1	Hacienda	E1	04° 25' 54,8"	-75° 12' 11,6"	1154
2	Jordán	E2	04° 25' 58,6"	-75° 11' 46,6"	1121
3	Musicalia	E3	04° 26' 08,9"	-75° 10' 46,3"	1048
4	Topacio	E4	04° 26' 19,3"	-75° 10' 0,13"	1024
5	Desembocadura	E5	04° 26' 27,3"	-75° 09' 39,1"	1009

Fuente: Universidad del Tolima (2022)

E2 (Barrio Jordán Etapa 3): El agua de esta estación es turbia y tiene un olor normal, con presencia de nata en algunas partes. El sedimento presentó olor a material residual y hay evidencia de erosión local leve, presencia de carreteras de grava y asfalto, alcantarillas y tres puntos de vertimientos. El margen derecho está ocupado por bosque nativo, matorral y pastos, mientras que en el margen izquierdo se presenta bosque, pastos, zona residencial y zona recreacional. Aproximadamente el 40% del sustrato presente en el cauce, corresponde a desechos de construcción (baldosas, tejas, ladrillos)

E3 (Barrio Musicalia): El agua de esta estación es turbia y tiene un olor a agua residual. El sedimento presentó olor acentuado a material residual. Hay evidencia de erosión local moderada, también la presencia de alcantarillas, edificaciones y de tres puntos de vertimiento. El margen derecho está ocupado por bosque nativo, matorral, pastos y zona residencial, en el margen izquierdo se presenta bosque nativo, pastos y zona residencial. Presencia de basura de diferente origen: material de construcción, objetos domésticos y de uso común, entre otros.

E4 (Puente del barrio Topacio): El agua de esta estación es turbia y tiene un olor a agua residual. El sedimento presentó olor a material residual. Hay evidencia de erosión local leve, también la presencia de carreteras de grava y asfalto y de cuatro puntos de vertimiento. El margen derecho e izquierdo

están ocupados por bosque nativo, matorral y pastos. Presencia en un alto porcentaje de basura de origen domésticos y de uso común: ropa, colchones, muebles, entre otros.

E5 (Desembocadura parque del Barrio Topacio): El agua de esta estación es turbia y tiene un olor a agua residual. El sedimento presentó olor a material residual y hay evidencia de erosión local leve, también la presencia de una zona de recreación (parque) en la ribera del margen izquierdo del mismo y de dos puntos de vertimiento. El uso del suelo en el margen derecho está representado por bosque nativo, matorrales, pastos y zona residencial, mientras que en el margen izquierdo se presenta bosque, matorral, pastos y zona recreacional. Presencia en un alto porcentaje de basura de origen domésticos y de uso común: ropa, colchones, muebles, entre otros.

2.2. Información sobre los índices de calidad de la microcuenca Hato de la Virgen.

De la misma manera, se utilizó la información contenida en el informe final del proyecto de peritaje: "Evaluación ambiental centrada en la calidad del agua y vertimientos en la microcuenca Hato de la Virgen" realizado por la Universidad del Tolima (2022), y que tiene que ver con los resultados obtenidos en el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA), de los Índices de Contaminación (ICO's) y de los Índices Biológicos de cada una de las cinco estaciones arriba señaladas (Anexo 1).

A continuación, se describen las generalidades de cada uno de los índices evaluados:

• Índice de Calidad del Agua

ICA (Índice de Calidad del Agua): La finalidad o propósito de este índice es reflejar las condiciones fisicoquímicas generales del cuerpo de agua superficial a partir de variables simples (oxígeno disponible, materia orgánica, sólidos, mineralización, acidez, entre otros) que permiten el análisis de principales orígenes de contaminación y conocer el estado de la calidad del agua en un punto de monitoreo específico. Considera cinco rangos de valores entre 0 y 1 y expresa la calidad del agua desde muy mala hasta buena, respectivamente (IDEAM, 2020).

• Índices de Contaminación (ICO's)

ICOMI (Índice de Contaminación por Mineralización): Es un índice que determina los niveles de contaminación a partir de la mineralización y que es calculado a partir de variables como la conductividad, dureza y alcalinidad, siendo estos un reflejo del conjunto de sólidos disueltos, cationes de calcio y magnesio, y aniones de carbonatos y bicarbonatos (Ramírez *et al.*, 1997).

ICOpH (Índice de Contaminación por pH): Es un índice que determina la contaminación a través de los valores del pH (Ramírez *et al.*, 1997).

ICOMO (Índice de Contaminación por Materia Orgánica): Es un índice que recoge efectos distintos de la contaminación orgánica a partir del conjunto de diferentes variables fisicoquímicas como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), coliformes

totales y el porcentaje de saturación de oxígeno (Ramírez *et al.*, 1997).

ICOSUS (Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos): Expresa la contaminación de compuestos inorgánicos a partir de la concentración de sólidos suspendidos (Ramírez *et al.*, 1997).

De manera general, la interpretación del valor de estos cuatro índices de contaminación está asociada a cinco rangos de valores de 0 a 1, determinando la contaminación del agua como ninguna hasta muy alta respectivamente (Ramírez *et al.*, 1997).

ICOTRO (Índice de Contaminación Trófica): Este índice refleja la contaminación a partir de la concentración del fósforo total y a partir de esto define el estado trófico de un cuerpo de agua desde oligotrófico (bajo) hasta hipereutrófico (Extrema), en cuatro rangos de valores que van desde 0 hasta 1, respectivamente (Ramírez *et al.*, 1997).

• Índices Bióticos de Calidad del Agua

Sapróbico (Índice Sapróbico): Es uno de los índices más conocidos y aplicados mundialmente y afirma que este índice está basado en la presencia de especies indicadoras que reciben un valor sapróbico dependiente de su tolerancia frente a la polución (Pozo, 2018). Considera siete rangos de valores entre 0 y 4 y expresa el grado de contaminación orgánica del agua desde poca o ninguna contaminación hasta supercontaminado, respectivamente (Roldán, 1999).

IBF (Índice Biótico de Familias): Este índice proporciona un puntaje a los grupos taxonómicos de macroinvertebrados de

acuerdo con su tolerancia o sensibilidad a la contaminación en una escala de 0 (taxón sensible) a 10 (taxón tolerante). Para su cálculo, las diferentes tolerancias de una comunidad de macroinvertebrados se resumen en un único valor por ponderación de la abundancia relativa, es decir la cantidad de individuos recolectados se multiplica por el valor de la tolerancia del taxón y se divide entre el total de individuos recolectados (Gutiérrez & Ramírez, 2016 y Ayala et al, 2019). Considera siete rangos de valores entre 0 y 10 y expresa el grado de contaminación orgánica del agua desde baja hasta severa, respectivamente (Cárdenas *et al.*, 2018).

BMWPCol (Índice Biological Monitoring Working Party para Colombia, por sus siglas en inglés): Este índice permite estimar la calidad de un ecosistema acuático a partir de la valoración de las especies acuáticas que habitan en el ecosistema y se atribuye a cada especie un valor determinado de acuerdo con su tolerancia a la contaminación que va de 1 a 10, de manera que las familias más tolerantes obtienen una menor puntuación que aquellas que requieren una mejor calidad de las aguas en que viven (Álvarez, 2005). Considera cinco rangos de valores entre 0 y mayores a 150 y expresa el grado de contaminación orgánica del agua desde fuertemente contaminada hasta aguas muy limpias, respectivamente (Roldán, 2003).

ASPT (Índice Promedio por Taxón, por sus siglas en inglés): Expresa el promedio de indicación de calidad de agua que tiene las familias de macroinvertebrados encontradas en un sitio determinado, lo que lo convierte en un índice complementario al BMWP y da una medida más real del estado de cada sitio (Ayala *et al.*, 2019). Considera

cinco rangos de valores entre 1 y 10 y expresa el grado de contaminación orgánica del agua desde fuertemente contaminada hasta aguas muy limpias, respectivamente (Álvarez, 2005).

Por otro lado, es importante mencionar que la información colectada de los índices de calidad corresponde también a cuatro momentos de tiempo, conforme a las dos épocas pluviométricas contrastantes: noviembre del 2021 y abril del 2022 (Aguas Altas, A1 y A2, respectivamente) - enero y julio del 2022 (Aguas Bajas: B1 y B2, respectivamente). Las condiciones climáticas de esos periodos fueron moduladas en mayor medida por la evolución del Fenómeno de la Niña (Universidad del Tolima, 2022).

2.3. Comparación espacial y temporal de los Índices de Calidad del Agua

En primera instancia se realizó la comparación espacial y temporal de los índices que definen la calidad del agua en este estudio individualmente para cada variable y en segunda instancia se comparó de manera conjunta, a partir de la variable espacial como criterio de clasificación y como variable de partición a la temporalidad. En todos los casos, la comparación se hizo a partir de un análisis de varianza. Para esto se utilizó el programa Infostat versión 2020.

Inicialmente todos los datos se sometieron a la prueba de Shapiro Wilks (modificado), que es un estadístico que mide la normalidad de la distribución de los datos (Avanza *et al.*, 2003). Esta prueba arrojó como resultado (ver Anexo 2) que los valores de los índices de contaminación Tráfico (ICOTRO), por Mineralización (ICOMI) y por Sólidos Suspendidos (ICOSUS) no se comportaban

bajo el supuesto de normalidad, el resto de índices evaluados sí.

A continuación, y con el fin de identificar diferencias significativas ($p < 0,05$) de los índices evaluados respecto a las estaciones y las épocas pluviométricas contrastantes se realizaron dos análisis de varianza: uno se desarrolló a través de la prueba o test de Kruskal-Wallis que es un estadístico no paramétrico, utilizado para varias muestras independientes (Quispe *et al.*, 2019) aplicado a aquellos índices cuyos valores no se comportaron bajo el supuesto de normalidad.

Con la misma finalidad, a los otros índices cuyos valores se comportaron bajo el supuesto de normalidad se les aplicó un análisis de varianza paramétrica (ANOVA).

Como complemento al ANOVA se aplicó la prueba de Duncan, la cual es un procedimiento para realizar la comparación de rangos múltiples de medias (Balzarini *et al.*, 2008) con el objetivo de saber concretamente cuales son las estaciones o la época que difiere respecto a cada índice evaluado.

También, para todos los índices y variables, se aplicó un análisis de conglomerados o análisis clúster que es frecuentemente utilizado como método exploratorio de datos con la finalidad de obtener mayor conocimiento sobre la estructura de las observaciones y/o variables en estudio. Se optó por el método jerárquico que consiste en un procedimiento de uniones sucesivas, donde los objetos similares se agrupan primero y esos grupos iniciales son luego unidos de acuerdo con sus similitudes. El resultado del agrupamiento jerárquico se mostró en un dendrograma y para la

construcción de este se eligió la distancia Bray-Curtis, generando así conglomerados que tenga la máxima homogeneidad en cada grupo (Balzarini *et al.*, 2008). Como criterio de corte para trazar la línea de referencia se utilizó la distancia igual al 50% de la distancia máxima obtenida.

Asimismo, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), que permite analizar la interdependencia de las variables y una representación gráfica óptima de la variabilidad de los datos a través de la construcción de ejes artificiales (componentes principales) para obtener gráficos de dispersión de observaciones y/o variables con propiedades óptimas para la interpretación de la variabilidad. Como resultado de este análisis se construyó un Biplot (gráfico de dispersión), usado para visualizar la dispersión de las observaciones (estaciones y temporadas) y variables (índices) en un mismo espacio, identificando así las asociaciones entre ellas (Balzarini *et al.*, 2008).

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Comparación Espacial de los Índices de Calidad del Agua

La tabla 2 muestra que espacialmente solo tres (3) de los diez (10) índices de calidad del agua evaluados en este estudio varían significativamente ($p < 0,05$): ICOpH, ICOMO e ICOTRO.

Tabla 2. Valores de n , Media ($\bar{X}$), H y de p resultantes del test de Kruskal Wallis y de F y p resultantes del ANOVA paramétrico, para la comparación espacial de los índices de calidad del agua del cauce principal de la microcuenca Hato de la Virgen. (*) $p < 0,05$, significativamente diferentes.

Índice	H	F	p
--------	---	---	---

ICA	1,26	0,3299
ICOMI	0,23	0,9938
ICOpH	5,14	0,0083*
ICOMO	10,82	0,0002*
ICOSUS	6,63	0,1462
ICOTRO	11,64	0,0199*
Saprobico	1,15	0,3715
IBF	0,28	0,8889
BMWP/Col	1,72	0,1982
ASPT	0,49	0,7461

Fuente: Los autores

La figura 2 muestra que los valores significativamente diferentes de estos tres índices son los que se determinaron para las estaciones E1 (Hacienda) y E5 (Desembocadura) y que hay una tendencia general a que estos valores aumenten a medida que la Quebrada Hato de la Virgen se acerca a su desembocadura. Así mismo, los valores de los índices ICOMO e ICOTRO categorizan la calidad del agua del cauce principal de la microcuenca del Hato de la Virgen, a medida que avanza en su recorrido como mala y denotan una contaminación de Alta y Muy Alta y el estado trófico de Eutrofía a Hipereutrofía, respectivamente.

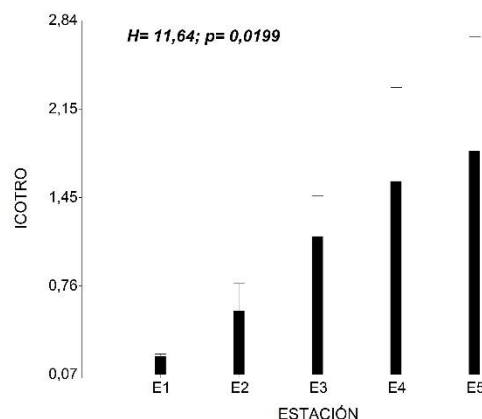
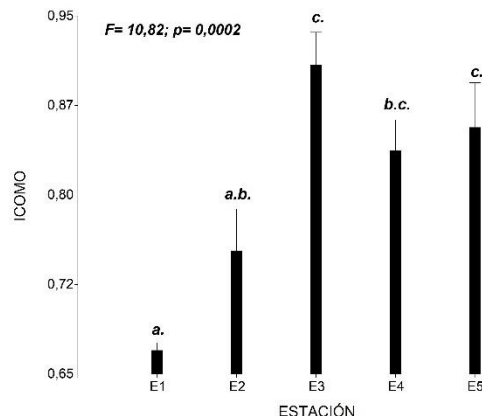
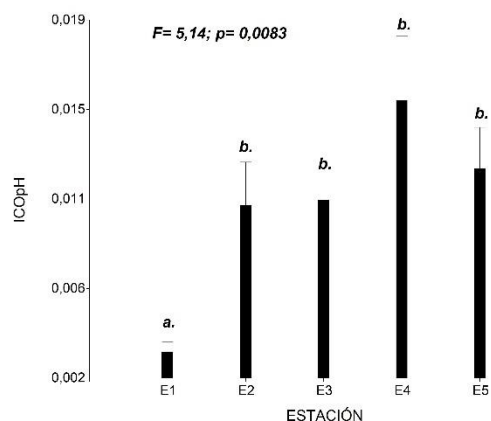


Figura 2. Variación espacial de los índices de contaminación ICOpH, ICOMO e ICOTRO de las aguas del cauce principal de la microcuenca urbana Hato de la Virgen. E1 = Hacienda, E2 = Jordán, E3 = Musicalia, E4 = Topacio, E5 = Desembocadura. **Fuente:** Los autores.

Londoño et al. (2017) al evaluar la calidad del agua de tres quebradas altoandinas en el departamento de Antioquia, señalan que es frecuente definir que aguas abajo hay un mayor detrimento en la calidad del agua.

Estos resultados coinciden también con los obtenidos por Mosquera (2018) quien, en un estudio técnico sobre la determinación del grado de contaminación por materia orgánica del Caño Grande, ubicado en el municipio de Villavicencio encontró un aumento de la contaminación por materia orgánica a medida que los vertimientos llegan directamente al cauce del Caño y que

los resultados obtenidos, señalan un deterioro en la calidad de las aguas de la microcuenca, relacionado con la materia orgánica aportada por los vertimientos domésticos directos, toda vez que la carga microbiana aumenta a medida que los vertimientos se concentran, tal como ocurre en la zona de estudio del Hato de la Virgen.

Cañas (s.f.) sugiere que los resultados obtenidos para el ICOMO evidencian la existencia de una carga de materia orgánica que está siendo vertida el cuerpo de agua, los cuales, según él, pueden tener como origen desechos domésticos. Este autor, además, encuentra que existe una relación entre los valores de los índices ICOMO y el ICOTRO explicando que los valores del uno aumentan conforme aumentan los del otro y asocia esto a que los contenidos de materia orgánica están asociados a los contenidos de fósforo lo que según él representa un problema de exceso de nutrientes y materia orgánica lo que lleva a un deterioro de la calidad del agua, tal como se muestra en el presente estudio.

Aunque se presentan diferencias significativas en los valores del ICOpH entre las estaciones muestreadas, los niveles de contaminación denotados por ellos fueron siempre bajos, significando que a lo largo del cauce de la quebrada del Hato de la Virgen no existe contaminación determinada por este parámetro.

Samboni *et al.*, (2011) para el caso de la subcuenca río Hondo encontraron que los niveles de calidad y contaminación por ICOMO se mantienen en rangos bajos y definieron que el principal agente de contaminación se debe a la materia orgánica, proveniente en gran porcentaje de aguas

residuales domésticas, tal como sucede en la microcuenca del Hato de la Virgen.

Por otro lado, el dendrograma de la figura 3 establece la similaridad entre las estaciones de muestreo a partir de los resultados de los diez (10) índices que determinan la calidad del agua del cauce principal de la microcuenca urbana Hato de la Virgen. Con una correlación cofenética de 0,905. La línea de referencia trazada deja ver que se presenta una única aglomeración, la de las estaciones Musicalia (E3) y Desembocadura (E5). El resto de estaciones se aglomeran por encima de esta línea. A manera general, se puede decir que las similitudes entre las estaciones son bajas.

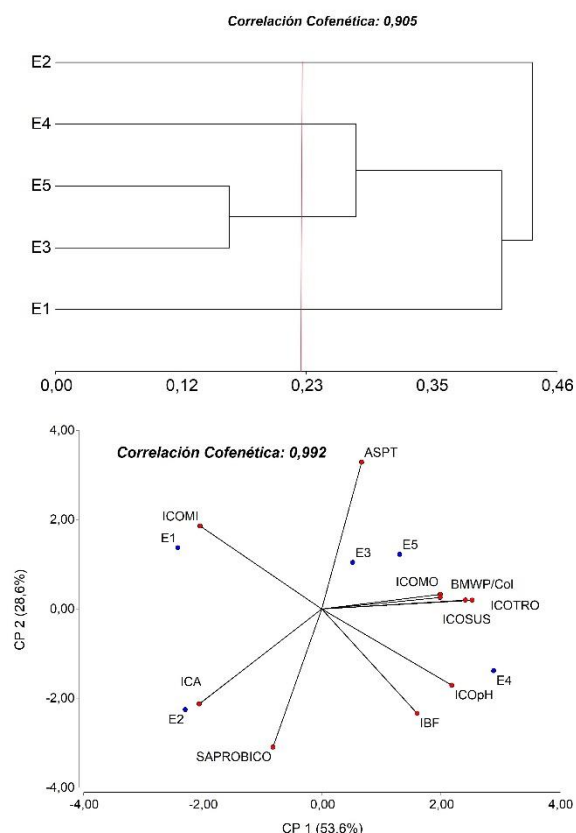


Figura 3: Similitud entre las estaciones de muestreo con base en los índices que determinan la calidad del agua de la microcuenca urbana Hato de la Virgen a partir de la distancia Bray-Curtis. E1 = Hacienda, E2 =

Jordán, E3 = Musicalía, E4 = Topacio, E5 = Desembocadura. **Fuente:** Los autores.

El resultado del conglomerado descrito en el párrafo anterior es confirmado por el Biplot de la misma figura, en donde los dos componentes explican el 82,2% de la variación con un Correlación Cofenética de 0,992 y se observa que hay cierto grado de dispersión de las Estaciones a lo largo de los cuadrantes de la figura. Sin embargo, el Biplot sí muestra que existe una diferencia entre las estaciones E1 y E2 con respecto a las estaciones E3, E4 y E5, quienes se asocian a la derecha e izquierda de la figura respectivamente, lo que podría interpretarse con que las condiciones de contaminación del agua definidas por cada uno de los índices evaluados son diferentes.

Los resultados muestran que las condiciones de contaminación son Altas en las aguas de las estaciones de la parte alta de la microcuenca y Muy Altas en las estaciones ubicadas hacia la parte media-baja de la misma.

Estos resultados pueden ser también explicados por las características organolépticas de cada una de las estaciones, por ejemplo: el agua es turbia en todas las estaciones, lo que sugiere un aporte continuo de sólidos suspendidos posiblemente relacionados con erosión, vertimientos y desechos; presencia de olor a agua residual que aumenta a partir de las estaciones E3, E4 y E5, lo que indica que la calidad del agua empeora a medida que avanza el flujo; el sedimento tiene un olor constante a material residual en todas las estaciones.

Además, existen puntos de vertimiento identificados en todas las estaciones, siendo

más numerosos en la parte baja de la Quebrada lo que indica una contribución importante de descargas urbanas no controladas.

Saavedra (2019), determinó los niveles de contaminación del agua a partir de técnicas de análisis multivariable, encontrando que existe una evolución de menor a mayor grado de contaminación a medida que las aguas avanzaban, tendencia similar a las del estudio que aquí se presenta.

Esta tendencia se puede encontrar también en el trabajo desarrollado por Jo et al. (2022), quienes establecieron que las variaciones más altas de la calidad del agua del río Geumho en Corea se dieron en las zonas media y baja y que ese deterioro se debía principalmente a las descargas de materia orgánica.

De igual forma, Herrera et al. (2013) encontraron que los niveles de contaminación de las aguas de las microcuencas del río Virillas en Costa Rica van de moderado a severo, deduciendo, además, que una de las fuentes principales causante de las variaciones espaciales en la calidad del agua del río es la descarga de aguas residuales no tratadas.

Melad et al. (2024) realizaron una evaluación espacial de la calidad del agua del río Mananga en Filipinas y definieron que el desarrollo de actividades antropogénicas en las márgenes del río deprime la calidad del agua especialmente en las zonas bajas del río. Esto puede explicar un poco los resultados obtenidos en la parte baja de la quebrada Hato de la Virgen, pues uno de los resultados de esas actividades antropogénicas es la presencia de basura, el cual es un problema recurrente, siendo

mayoritariamente de origen doméstico (ropa, colchones, muebles, etc.) y de construcción (baldosas, tejas, ladrillos), las estaciones E4 y E5 presentan los niveles más altos de desechos domésticos.

En ese sentido, Shrestha et al. (2023) realizaron una evaluación preliminar de la evaluación espacial de la calidad del agua del río Ratuwa en Nepal. Determinaron que no hay variaciones significativas en la calidad del agua en las diferentes estaciones. Sin embargo, al calcular el índice de calidad WQI (ICA por sus siglas en inglés), los resultados muestran que la calidad va de “Buena” a “Mala” en todas las estaciones de muestreo. También explican que la calidad de las aguas del río está influenciado por las por actividades antropogénicas, especialmente el vertimiento de residuos domésticos.

Además, en la microcuenca Hato de la Virgen la presencia de carreteras de grava y asfalto, alcantarillas, edificaciones cerca del cauce en todas las estaciones y la urbanización descontrolada puede estar incrementando el aporte de contaminantes a través del escurrimiento superficial y la sedimentación.

Por otro lado, Morales et al. (2022), definieron que las variaciones espaciales de la calidad del agua de cuatro microcuencas en Costa Rica están mediadas por la cobertura de la vegetación, el uso del suelo, el tipo de suelo y la pendiente. En este sentido, tal como se describió en el inciso 2.1 de este artículo, se evidencia en las estaciones que desde E1 hasta E5, se mantiene un patrón de uso mixto del suelo, con predominancia de bosque nativo, matorrales, pastos y zonas residenciales y especialmente en la estación E5, se nota la

presencia de una zona recreacional que podría contribuir a la generación de residuos.

Los resultados del presente estudio no coinciden con lo determinado por Guzmán et al. (2011), quienes no encontraron una tendencia espacial definida en la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguas Calientes en México, pero sí pudieron definir que la calidad del agua se iba perdiendo conforme los sitios muestreados estaban cerca a las descargas de puntos de vertimientos de aguas residuales.

Es importante resaltar, que a pesar de que no hay diferencias que indiquen una buena calidad del agua a lo largo de la Quebrada, por lo que la condición general es la misma a lo largo de todo el cauce principal. Esto lo corrobora la Alcaldía de Ibagué et al. (2015) y CORTOLIMA (2016) al explicar que la quebrada Hato de la Virgen es una corriente superficial que recibe aportes de vertimientos residuales y de aguas lluvias, desde aguas arriba hasta su desembocadura lo que condiciona la situación crítica del área.

De acuerdo con Gómez (2010) existe una fuerte dependencia entre el funcionamiento del río y la calidad de sus aguas aguas abajo con aquellos procesos que tienen lugar aguas arriba. La calidad del agua en últimas, es la respuesta a todos los disturbios y presión antrópica que se dan a lo largo y ancho del cuerpo hídrico, tal como lo mencionan Terneus et al., (2012), Galindo et al., (2012) y Forero (2017).

3.2. Comparación Temporal de los Índices de Calidad del Agua

La tabla 3 muestra que, a nivel temporal, seis (6) índices de los diez (10) que determinan la calidad del agua en este estudio varían significativamente ($p < 0,05$). Estos son los

índices de contaminación ICOMI, ICOSUS, y los índices biológicos Sapróbico, IBF, BMWP_{Col} y ASPT.

Tabla 3. Valores de *n*, Media (*X*), *H* y de *p* resultantes del test de Kruskal Wallis y de *F* y *p* resultantes del ANOVA paramétrico, para la comparación temporal de los índices de calidad del agua del cauce principal de la microcuenca Hato de la Virgen. (*) $p < 0,05$, significativamente diferentes.

Índice	H	F	p
ICA		3,04	0,0595
ICOMI	11,55		0,0084*
ICOpH		0,11	0,9545
ICOMO		0,83	0,4981
ICOSUS	8,78		0,0291*
ICOTRO	5,24		0,154
Sapróbico		3,79	0,0315*
IBF		28,76	<0,0001*
BMWP/Col		6,31	0,005*
ASPT		6,26	0,0051*

Fuente: Los autores

La figura 4 muestra que no existe una tendencia marcada entre los valores de los índices evaluados para cada una de las temporadas y que presentan diferencias significativas. En cuatro (4) de ellos: ICOSUS, IBF, BMWP_{Col} y ASPT los valores fueron mayores en la temporada de Aguas Altas (A1 y A2), mientras que los valores en la temporada de Aguas Bajas (B1 y B2) de los índices ICOMI y Sapróbico son mayores a los de la temporada Alta.

Hay que resaltar que a pesar de que no existe esa tendencia marcada y a las diferencias significativas en los valores de estos índices, el nivel de calidad y consecuentemente el grado de contaminación de las aguas de la quebrada Hato de la Virgen para las dos temporadas pluviométricas contrastantes fue muy mala y

super contaminada. Solamente los valores del índice ICOpH arrojaron que no existe contaminación alguna.

Resultados como los de Ayala et al. (2019) contrastan con lo obtenido en el presente estudio, ya que estos autores determinaron que no existe una diferencia significativa entre los valores de los índices BMWP/Col, ASPT e IBF para las temporadas en que llevaron a cabo sus muestreos (seca, transición y lluviosa), afirmando una independencia entre las variables, lo que indica que la temporada no hace que los resultados de los índices sean estadísticamente diferentes.

De igual forma, Cruz y Ortega (2020) determinaron el estado de la calidad del agua y la contaminación en los afluentes del río Guachicos en la zona alta de la Sub-cuenca, en Pitalito Huila y no encontraron diferencias significativas en los valores obtenidos para los índices ICOSUS e ICOMI para cada una de las épocas muestreadas.

En el trabajo de Ahumada (2020), se encontraron resultados de los índices de contaminación ICOMI e ICOSUS durante épocas seca y húmeda. El comportamiento de estos valores fue similar a los presentados en este artículo, valores mayores en época seca o de aguas bajas para el ICOMI y valores mayores en época húmeda o de aguas altas para el ICOSUS. Este autor explica particularmente, que los valores altos de ICOMI en época seca se deben al efecto producido por la evaporación del agua produciendo un aumento en la concentración de los analitos presentes en ella.

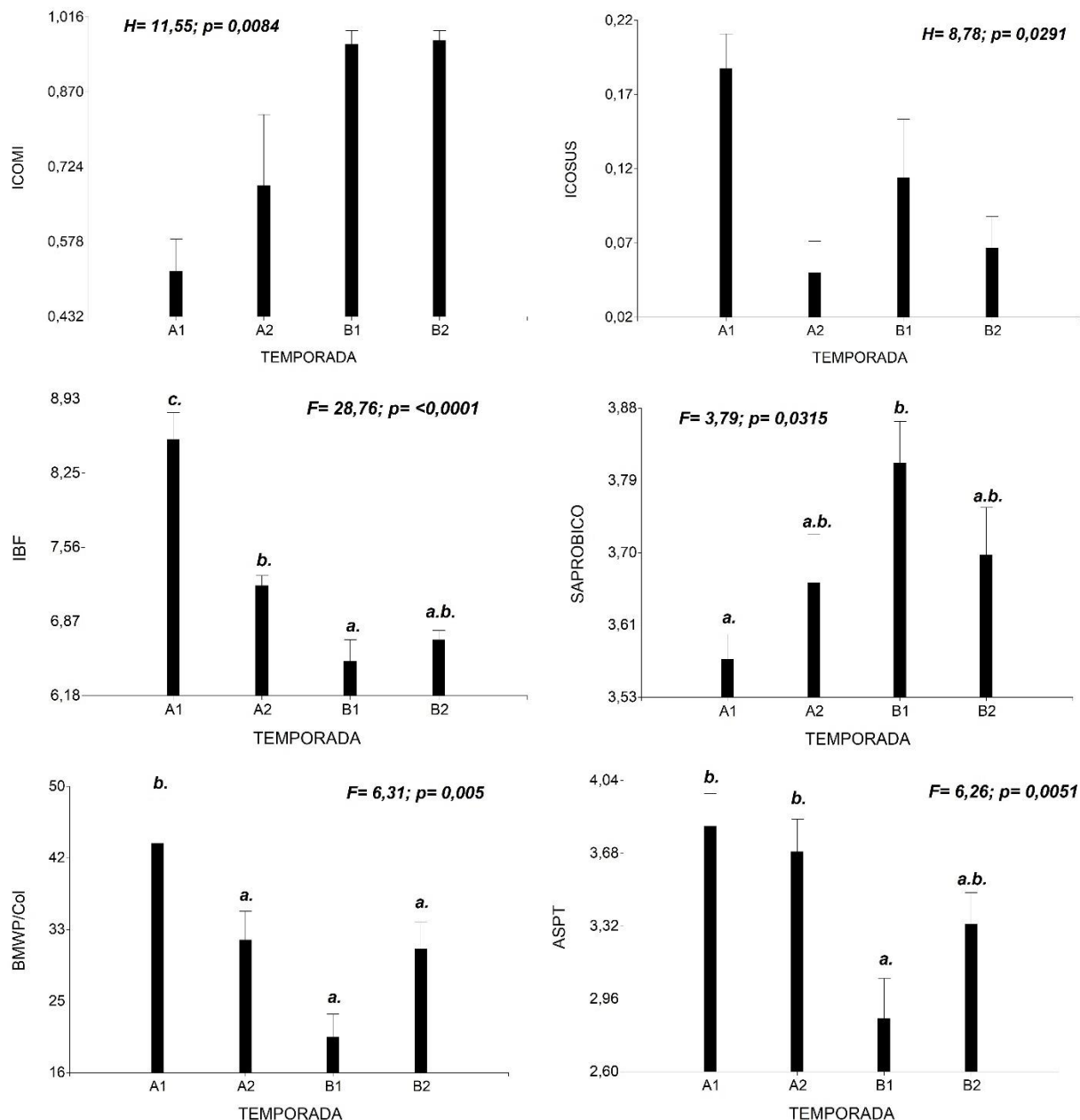


Figura 4. Variación temporal de los índices de contaminación ICOMI e ICOSUS y de los índices biológicos IBF, Sapróbico, BMWPCol y ASPT de las aguas del cauce principal de la microcuenca urbana Hato de la Virgen. A1 = Alta 1; A2 = Alta 2; B1 = Baja 1; B2 = Baja 2. **Fuente:** Los autores.

Ahumada (2020), menciona, además, que el valor del ICOMI también puede ser influenciado por la acumulación de materia orgánica en la zona, especialmente por los vertimientos generados por la comunidad de manera ilegal. Finalmente concluye que el cuerpo de agua que estudió no refleja un

cambio significativo para bien durante las distintas épocas del año, tal como acontece en este trabajo.

Herrera et al. (2022) calcularon el índice BMWPCol e ICO's para el río Guatapurí en Valledupar, Colombia. El comportamiento de

los valores de BMWP/Col que ellos encontraron es diferente al presentado en este artículo, pues fueron mayores en la época de sequía. Aducen, que ese resultado puede ser debido a que en la época de lluvias el aumento del caudal acompañado de rápidas, inundaciones y cargas altas de sedimentos, arrastraría los taxones presentes en los sustratos y limitará las condiciones respiratorias de la fauna bentónica.

Hay que recordar que mayores valores de índice BMWP/Col significan menor grado de contaminación y como consecuencia de esto mejor calidad del agua. Sin embargo, para el caso de las aguas de la quebrada Hato de la Virgen, los valores arrojados en la temporada de Aguas Altas definen una contaminación moderada y en la época de Aguas Bajas definen un agua muy contaminada.

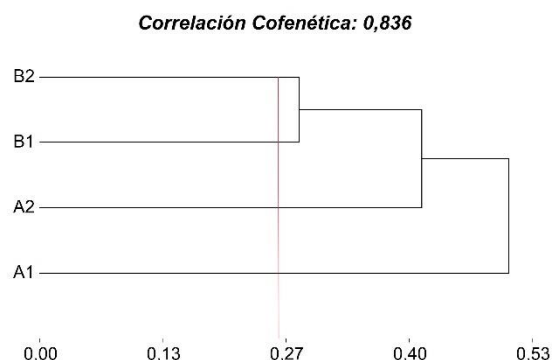
Respecto a los ICO's y especialmente a los valores de ICOMI e ICOSUS Herrera et al. (2022) definieron que no había diferencias en los valores del primero, pero que sí existían diferencias en los valores del segundo en las dos épocas pluviométricas analizadas, siendo mayores en la época de lluvia. Estas altas concentración de sólidos suspendidos en esa época, según ellos, se deben al efecto producido por la escorrentía superficial en las riberas que logran depositar materiales particulados y la deposición de materia orgánica.

Chavarro & Gélves (2016) determinaron que no existe ninguna relación estadísticamente significativa entre la precipitación y la contaminación determinada por los índices ICOMI, ICOMO e ICOSUS. Sin embargo sí encontraron relaciones significativas entre las precipitaciones y el índice ICOTRO, definiendo a esa correlación como inversa

moderadamente fuerte, estableciéndolo como consecuencia lógica que a valores altos de precipitación, valores bajos de ICOTRO, tal como lo evidencian los resultados de ese índice que se encuentran en el Anexo 1,

Además, en términos generales la categoría que por medio del índice ICOTRO se le asignó a las aguas de la quebrada Hato de la Virgen también varió conforme las precipitaciones, pues para la temporada de Aguas Bajas se catalogaron como Hipereutrífico y para Aguas Altas Eutrífico.

Ahora bien y conforme a lo que muestra la figura 5, el dendrograma establece que existe una baja similaridad entre las cuatro temporadas muestreadas, a partir de los resultados de los diez (10) índices que determinan la calidad del agua de la microcuenca urbana Hato de la Virgen. Con una correlación cofenética de 0,836, a la altura de la línea de corte, los resultados muestran que no hay una aglomeración de las temporadas. La primera aglomeración se da arriba de esta línea: Aguas Bajas 1 y Aguas Bajas 2. Las Aguas Altas nunca se aglomeran entre sí y se juntan indiscriminadamente a una distancia aún mayor.



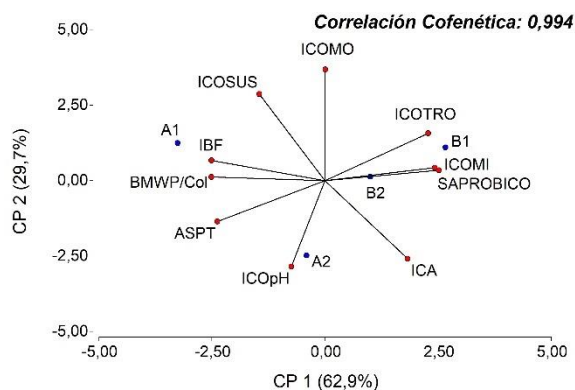


Figura 5: Similitud entre las temporadas de muestreo con base en los índices que determinan la calidad del agua de la microcuenca urbana Hato de la Virgen a partir de la distancia Bray-Curtis. A1 = Alta 1, A2 = Alta 2, B1 = Baja 1, B2 = Baja 2. **Fuente:** Los autores.

El comportamiento de las temporadas visualizado en el dendrograma de la figura 5 de cierta manera se visualizan en el Biplot de la misma figura, en donde los dos componentes explican el 92,6% de la variación con un Correlación Cofenética de 0,994. En esa imagen, las épocas A1 y A2 se ubican del lado izquierdo y las épocas B1 y B2 del lado derecho. Así mismo, se observa que las distancias entre B1 y B2 son más cortas que las existentes entre las épocas A1 y A2. Se evidencia también, que las temporadas de Aguas Bajas (B1 y B2) están asociadas a los índices ICOMI, Sapróbico e ICOTRO, índices altamente relacionados con contaminación orgánica. Mientras que las épocas de Aguas Altas (A1 y A2) no están claramente asociadas a índice alguno.

Si bien es cierto que los resultados estadísticos están mostrando que el comportamiento de los índices evaluados es diferente en las dos épocas pluviométricas, es bueno decir también, que la variación en el valor de cada índice evaluado responde más a las condiciones particulares de cada sitio muestreado que a los cambios

pluviométricos que se presentan, tal como lo argumentan Montoya et al. (2011) y Chavarro & Gélvez (2016).

4. CONCLUSIONES

En virtud de los resultados y el análisis que se ha desarrollado en el presente estudio, se determina, que las condiciones a las que se encuentra sometida de manera permanente y continua la microcuenca Hato de la Virgen independientemente de la zona y la época pluviométrica, interfieren en las relaciones ecosistémicas y como se ha demostrado a partir de los resultados de los diferentes índices calculados que determinan la calidad del agua, se hace evidente la respuesta del cuerpo hídrico al detrimento que se expone.

La comparación de los índices que determinaron la calidad del agua en cada una de las estaciones, a lo largo del cauce principal de la microcuenca urbana Hato de la Virgen evidenció que la calidad del agua es similar y que las variaciones que se presentaron obedecen más a las condiciones específicas encontradas en cada tramo evaluado, es decir, a la contaminación propia de cada sitio.

Es de resaltar que la baja variación en los valores de los índices de calidad del agua entre épocas pluviométricas demuestra que, el efecto de dilución que teóricamente se presenta con las lluvias, no altera significativamente la calidad del agua de la microcuenca, debido a la incidencia permanente y a lo largo del tiempo de los vertimientos y de las actividades antrópicas que se presentan dentro de ella.

Este trabajo es un aporte importante en el área de la limnología y en la gestión integral del recurso hídrico, ya que es una de las

pocas investigaciones que se han realizado en Colombia sobre calidad del agua de microcuencas urbanas y que, además, integren las diferentes variables que fueron descritas a lo largo de este documento. Por esta razón se puede convertir en un modelo para investigaciones futuras realizadas en esta área del conocimiento, no solo en el Departamento del Tolima sino en Colombia.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Tolima por permitir la participación de los autores en el Proyecto de Peritaje “*Evaluación ambiental centrada en la calidad del agua y vertimientos en la microcuenca urbana Hato de la Virgen*”.

A la Facultad de Ingeniería Forestal, el Laboratorio de Gestión Ambiental de la Universidad del Tolima y al Grupo de Investigación en Gestión Ambiental de la Universidad del Tolima (GIGA-UT), por el apoyo técnico y científico.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo Serna, K. J., & Ballesteros Suaza, A. M. (2019). *Estudio preliminar de la calidad del agua en la quebrada La Balsa y valoración socioeconómica de la comunidad del vergel (Ibagué)*. [Trabajo de grado, Universidad de Cundinamarca]. <https://hdl.handle.net/20.500.12558/4716>
- Ahumada Barraza, A.E. (2020). *Comparación de los índices de calidad y contaminación del agua, capacidad buffer e índice de Langelier en la ciénaga de Mallorquín durante la época seca y húmeda del año*. [Trabajo de Grado, Universidad del Atlántico]. <https://repositorio.uniatlantico.edu.co/bitstream/handle/20.500.12834/1890/1%20T>
- [G%20ANTENOR%20AHUMADA%20ok.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://hdl.handle.net/20.500.11761/31357)
- Alcaldía de Ibagué, Universidad del Tolima, & Corporación Autónoma Regional del Tolima [CORTOLIMA]. (2015). *Plan de manejo socio ambiental de la microcuenca Hato de La Virgen en Ibagué – Tolima*. <https://n9.cl/7i9vd>
- Álvarez-Arango, L. (2005). *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua* - Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/31357>
- Avanza, M., Mazza, S., Martínez, G., & Giménez, L. (2003). Aplicación de transformaciones para el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, a concentraciones foliares de N, P y K en mandarino. *Agrotecnia* (11). <http://dx.doi.org/10.30972/agr.011456>
- Ávila Urueña, L. F., & Molina Camacho, J. S. (2018). *Análisis multitemporal del crecimiento urbano de Ibagué y su relación con el deterioro de las microcuencas urbanas: quebradas Las Panelas- La Balsa y quebrada Hato de la Virgen (1985-2018)*. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. <http://hdl.handle.net/11634/15982>
- Ayala, S. A., Reinoso, W. A., Calderón, D. S., Jaramillo, A. M., & Mesa, D. J. (2019). Determinación de la calidad del agua del río Frío (Cundinamarca, Colombia) a partir de macroinvertebrados bentónicos. *Avances Investigación en Ingeniería*, 16(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.5191>
- Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Casanoves F., Di Rienzo J.A., & Robledo

- C.W. (2008). *Infostat. Manual del Usuario*. Editorial Brujas. <https://n9.cl/l8trg>
- Barrientos, A. E., Barrientos, A. N., Wyss, E., Lopera, T., Dahinten-Bailey, H., Arrivillaga-Cano, E., Pineda-Schwarz, D., & Lazo-Hernández, M. J. (2019). Caracterización de la microcuenca del Río La Campana mediante parámetros morfométricos y de calidad del agua que revelan su estado actual. *Revista de La Universidad Del Valle de Guatemala*, (38), 92–99. <https://n9.cl/mh8xt>
- Bhadra, A. K., Sahu, B., & Rout, S. P. (2014). Evaluation of the Water Quality Index in River Brahmani, Odisha in the Light of National Sanitation Foundation (NSF) Standards. *Asian J. Research Chem*, 7(6), 586–592. <https://n9.cl/w7zoq>
- Cañas Arias, J. S. (s.f.) *Determinación y evaluación de Índices de Contaminación (ICOs) en cuerpos de agua*. <https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/bcbd4915-453a-455e-8a5c-0ac7017f88c2/content>
- Cárdenas-Castro, E., Lugo-Vargas, L., González-Acosta, J. A., & Tenjo-Morales, A.I. (2018). Aplicación del índice biótico de familias de macroinvertebrados para la caracterización del agua del río Teusacá, afluente del río Bogotá. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 587-597
<https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1004>.
- Carrillo, P., Jaramillo, A., Sierra, R. y Delgado, N. (2020). *Análisis de la variabilidad espacio temporal de la calidad del agua en el río Magdalena en un tramo comprendido entre el municipio de el Banco (Magdalena) y el municipio de Soledad (Atlántico) durante el periodo de 2010 a 2016*.
<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/30956?show=full>
- Castro, M., Almeida, J., Ferre, J., y Díaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: Evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería Solidaria*, 10(4), 11-124.
<https://doi.org/10.16925/in.v9i17.811>
- Colmenares Virviescas, L.M. & Cruz Benavides, J.D. (2020). *Análisis espacio-temporal de la calidad del agua del río Magdalena (periodo 2009-2018) a partir de la comparación de índices de calidad del agua*. [Trabajo de Grado, Universidad El Bosque]
<https://repositorio.unbosque.edu.co/items/6bb3015c-d954-43e1-9bef-ab2f235bd2a1>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima [CORTOLIMA]. (2016). *El Plan de Manejo Socio Ambiental del Hato de la Virgen, abre camino para la recuperación de su quebrada*. CORTOLIMA.
<https://n9.cl/a6dp5>
- Cruz Ospina, C.A. & Ortega Astudillo, J.D. (2020). *Determinación del estado de la calidad del agua y la contaminación en los afluentes del río Guachicos en la zona alta de la Sub-cuenca, en Pitalito Huila*. [Trabajo de Grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]
<https://core.ac.uk/download/pdf/344724811.pdf>
- Chavarro, A.G. & Gélvez Bernal, E.J. (2016). Caracterización de la calidad de las aguas de la quebrada Fucha utilizando los índices de contaminación ICO con respecto a la precipitación y usos del suelo. *Mutis* 6(2), 19-31, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1148>
- Chunfeng, W., Chuanyu, G., Dongxue, H., Winston, Z., Qianxin, L. y Guoping, W. (2017). Spatial and Temporal Variations of Water Quality in Songhua River from 2006 to 2015: Implication for Regional Ecological Health and Food Safety.

- Sustainability*, 9, 1502;
<https://www.mdpi.com/2071-1050/9/9/1502>.
- Dhungel, H. (2018). *Investigating the Temporal and Spatial Variability of Flow and Salinity Levels in an Ungaged Watershed for Ecological Benefits: A Case Study of the Mentor Marsh Watershed*. [Tesis de Maestría, Youngstown State University] <https://digital.maag.ysu.edu/xmlui/handle/1989/13205>
- Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado [IBAL]. (2020). *Informe concepto acuerdo 013: Seguimiento e identificación de vertimientos de ARD en las cuencas urbanas de los ríos Chípalo, Combeima, Alvarado y Opia y la caracterización fisicoquímica de ARD de entrada y salidas de las PTARD el Tejar, Américas y Comfenalco, de veinticinco (25) vertimientos y de las aguas superficiales de los cuerpos receptores del municipio de Ibagué zona urbana*.
- Escribano, N., Oscoz, J., Galicia, D., Cancellario, T., Durán, C., Navarro, P., & Ariño, A. H. (2018). Data Descriptor: Freshwater macroinvertebrate samples from a water quality monitoring network in the Iberian Peninsula. *Scientific Data*, (5), 1–7.
<https://doi.org/10.1038/sdata.2018.108>
- Forero Duarte, J. (2017). *Macroinvertebrados bentónicos y su relación con la calidad del agua en la cuenca alta del Río Frío (Tabio, Cundinamarca)*. [Trabajo de grado, Pontifica Universidad Javeriana]. <https://n9.cl/t63jz>
- Galindo-Leva, L. A., Constantino-Chuaire, L. M., Benavides-Machado, P., Montoya-Restrepo, E. C., Rodríguez-Valencia, N. (2012). Evaluación de macroinvertebrados acuáticos y calidad de agua en quebradas de fincas cafeteras de Cundinamarca y Santander, Colombia. *Cenicafé*, 63(1), 70-92.
<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/514/1/arc063%281%2970-92.pdf>
- Giraldo-Buitrago, L. C. (2022). Aburrá-Medellín River Water Quality Space-Time Variation from the Electrical Conductivity and Its Use as an Indicator of Quality. *Revista EIA*, 19(38), Reia3805. pp. 1-20.
<https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1525>
- Gómez, I.N., & Peñuela, G. A. (2016). Revisión de los métodos estadísticos multivariados usados en el análisis de calidad de aguas. *Mutis*, 6(1), 54-63.
<https://doi.org/10.21789/22561498.1112>
- Gómez, R. (2010). Modelos conceptuales de funcionamiento de ríos y arroyos. <http://hdl.handle.net/10201/13691>
- Guzmán-Colis, G., Thalasso, F., Ramírez-López, E.M., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A. Y Avelar-González, F.J. (2011). Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguascalientes. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27 (2) 89-102,
<https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v27n2/v27n2a1.pdf>
- Gutiérrez-Fonseca, P. E., & Ramírez, A. (2016). Evaluación de la calidad ecológica de los ríos en Puerto Rico: principales amenazas y herramientas de evaluación. *Hidrobiológica*, 26(3), 433-441.
<https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidr/2016v26n3/Ramirez>.
- Herrera, J., Rodríguez, S., Rojas, J.F., Herrera, E. y Chaves, M. (2013). Variación temporal y espacial de la calidad de las aguas superficiales en la subcuenca del río Virilla (Costa Rica) entre 2006 y 2010. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)*. (junio, 2013). EISSN: 2215-3896. Vol 45(1): 51-62.

- <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5536180.pdf>
- Herrera Millán, C. & Traslaviña Velásquez, V. (2021). *Variación espacio-temporal de la calidad del agua del río Tunjuelo (periodo 2009-2019): impacto de actividades antrópicas y estrategias de mitigación*. [Trabajo de Grado, Universidad El Bosque]
- <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/dd5afd7c-a278-4508-a5c1-9be8bc5c144f>
- Herrera-Martínez, J. R., Navarro-Sining, B. A., Torres-Cervera, K., Martínez-García, N., Royero-Ibarra, A. y Cahuana-Mojica, A. (2022). Determinación de los índices BMWP/Col, (QBR), (IHF) e ICO en Valledupar, Colombia. *Revista Politécnica*, vol. 18, núm. 35, 2022, enero-junio, pp. 110-127. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid Medellín, Colombia. DOI: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v18n35a8>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2014). Estudio Nacional del Agua. <https://n9.cl/vz0m>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2020). *Índice de Calidad del Agua en corrientes superficiales (ICA)*. <https://n9.cl/zzdux>
- Jo, C.; Kwon, H.; Kim, S. (2022). Temporal and Spatial Water Quality Assessment of the Geumho River, Korea, Using Multivariate Statistics and Water Quality Indices. *Water* 2022, 14, 1761. <https://doi.org/10.3390/w14111761>
- Jofré, M. (2021, septiembre 06). Calidad ambiental de ecosistemas acuáticos [Seminario Virtual]. Seminario Interno-INQUISAL, San Luis, Argentina. <https://n9.cl/g8k5v>
- Londoño Londoño, Y. B., Moreno Arbeláez, D. P., y Suarez Restrepo, O. L. (2017). *Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y su relación con la calidad del agua en tres quebradas de alta montaña de Antioquia, Colombia*. [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/3346>
- Martínez Cruz, D.A., Chávez Morales, J., Bustamante González, A., Palacios Vélez, O.L., De la Isla de Bauer, M.dL. y Tijerina Chávez, L. (2016). Variación espacial de la calidad del agua para uso agrícola del acuífero costero del Valle del Mayo, Sonora, México. *Hidrobiológica*, 26 (1): 109-119. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972016000100014
- Meneses-Campo, Y., Castro-Rebolledo, M. I., & Jaramillo-Londoño, A. M. (2019). Comparación de la calidad del agua en dos ríos altoandinos mediante el uso de los índice BMWP/Col y ABI. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 299-310. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n2.70716>
- Melad, R.S., Nonato, R.L.V., Salazar, D.J., Ligaray, M.V. y Sy Choi, A.E. (2024). Spatial assessment of water quality in Mananga River in Talisay City, Cebu, Philippines. *Results in Engineering* 24 (2024) 103030. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103030>
- Montoya, Y., Acosta, Y., y Zuluaga, E. (2011). Evolución de la calidad del agua en el río negro y sus principales tributarios empleando como indicadores los índices ICA, el BMWP/Col y el ASPT. *Caldasía*, 33(1), 193-210. <https://hdl.handle.net/10495/7582>
- Morales-Mora, E., Reyes-Lizano, L., Barrantes-Jiménez, K. y Chacón-

- Jiménez, L. (2022). Evaluación temporal y espacial en la calidad microbiológica del agua superficial: caso en un sistema de abastecimiento de agua para consumo humano en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)* e-ISSN: 2215-3896(Enero-Junio, 2022). Vol 56(1): 120-137 <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/16496/24244>
- Mosquera, Z., & Mosquera, M. M. (2017). Diversidad de la entomofauna acuática y calidad de agua en quebradas del río San Juan, Chocó – Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(1), 149–161. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n1.2017.72>
- Mosquera Beltrán, Y.N. (2018). *Informe Técnico del Concepto: Determinación del grado de contaminación por materia orgánica de Caño Grande, municipio Villavicencio*. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/38006/Informe%20de%20Concepto%20T%C3%A9cnico%20IA-CON-2018-2-015.pdf?sequence=1>
- Mosquera-Restrepo, D. & Peña-Salamanca, E. (2021). Evaluación de la calidad del agua de un río tropical usando índices bióticos, fisicoquímicos y de diversidad. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 1(33), 46-59. <https://doi.org/10.47499/revistaaccb.v1i33.220>
- Ospina, O. E. (2015). Análisis de la contaminación microbiológica en el río Combeima, municipio de Ibagué (Tolima, Colombia). *Producción + Limpia*, 10(2), 92-103. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v10n2/v10n2a09.pdf>
- Ospina-Zúñiga, O., García-Cobas, G., Gordillo-Rivera, J., & Tovar-Hernández, K. (2015). Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia). *Ingeniería Solidaria*, 12(19), 19-36. <http://dx.doi.org/10.16925/in.v12i19.1191>
- Personería Municipal de Ibagué. (2021). Informe de visita de campo, realizada en la quebrada “Hato de la Virgen”, efectuada el día 22 de febrero del 2021.
- Pozo Salvador, L.L. (). *Evaluación de la calidad biótica utilizando los índices de saprobiedad en las aguas del río Tingo de los distritos de Yanacancha, Yarusyacan y Pallanchacra - provincia de Pasco – 2017*. [Trabajo de Grado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión] http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/441/1/T052_73902014_T.pdf
- Quispe Andía, A., Callas Vasquez, K. M., Yangali Vicente, J. S., & Pucamayo Palomino, I. I. (2019). Estadística no paramétrica aplicada a la investigación científica con software SPSS, MINITAB Y EXCEL (1.ª ed.). (Vol. 1) Editorial EIDEC. <https://n9.cl/i72bc>
- Ramírez, A., RESTREPO, R. y VIÑA, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales: Formulaciones y aplicación. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*. Vol. 1 Núm. 3 Dic 1997. <http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n3/v1n3a09.pdf>
- Roldan, G. (1999). Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. *Revista de la Academia colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23(88), 375 -387. <https://n9.cl/t8b91>
- Roldan, G. (2003). *La bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín.

- Editorial Universidad de Antioquia.
<https://n9.cl/ge6jm>.
- Saavedra, D. (2019). Determinación de niveles de contaminación del agua a partir de técnicas de análisis multivariable. *Publicaciones e Investigación*, 13(1), 81-93.
<https://doi.org/10.22490/25394088.3263>
- Salazar, C. A., Murillo, E. & Oviedo, N. (2016). Calidad física, química y biológica de las aguas residuales del jardín botánico Alejandro von Humboldt – Universidad del Tolima. *Tumbaga*, 1(11), 115 – 133.
<http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/1249>
- Samboni, N. E., Reyes, A. y Carvajal, Y. (2011). Aplicación de los indicadores de calidad y contaminación del agua en la determinación de la oferta hídrica neta. *Ingeniería y Competitividad*, vol. 13, núm. 2, 2011, pp. 49-60 Universidad del Valle Cali, Colombia.
<https://www.redalyc.org/pdf/2913/291323530004.pdf>
- Shrestha AK, Rai M, Pokhrel J, Karki S, Poudel D, Karki S, et al. (2023) A preliminary assessment of spatial variation of water quality of Ratuwa river. *PLoS ONE* 18(5): e0285164.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285164>
- Terneus, E., Hernandez, K., y Racines, M. J. (2012). Evaluación ecológica del río Lliquino a través de macroinvertebrados acuáticos, Pastaza – Ecuador. *Revista De Ciencias*, 16, 31 – 45.
<https://doi.org/10.25100/rc.v16i0.501>
- Universidad del Tolima. (2022). Evaluación ambiental centrada en la calidad del agua y vertimientos en la microcuenca Hato de la Virgen
- Valladolid, M., Arauzo, M., & Martínez-Bastida, J. J. (2010). Estado ecológico del río Oja (cuenca del Ebro, La Rioja, España), mediante indicadores de macroinvertebrados. *Limnetica*, 29(2), 393-406. <https://n9.cl/ucyq5>

7. ANEXOS

Anexo 1. Resultados de los índices de calidad calculados para el cauce principal de la microcuenca urbana Hato de la Virgen en las dos temporadas pluviométricas contrastantes. A1 = Aguas altas 1, A2 = Aguas altas 2, B1= Aguas bajas 1, B2= Aguas bajas 2. E1 = Hacienda, E2 = Jordán, E3 = Musicalia, E4 = Topacio, E5 = Desembocadura. **Fuente:** Universidad del Tolima (2022).

Índice	Temporada	E1	E2	E3	E4	E5
ICA	A1	0,39	0,52	0,41	0,41	0,40
	A2	0,51	0,51	0,50	0,57	0,55
	B1	0,56	0,59	0,46	0,47	0,45
	B2	0,51	0,56	0,54	0,41	0,42
ICOMI	A1	0,659	0,327	0,426	0,586	0,607
	A2	0,978	0,868	0,882	0,292	0,416
	B1	0,867	0,947	1	1	1
	B2	0,897	1	0,97	0,983	1
ICOMO	A1	0,685	0,834	0,888	0,877	0,888
	A2	0,665	0,672	0,843	0,791	0,768
	B1	0,665	0,719	0,971	0,884	0,941
	B2	0,655	0,78	0,929	0,791	0,823
ICOSUS	A1	0,200	0,105	0,167	0,226	0,233
	A2	0,026	0,026	0,026	0,133	0,033
	B1	0,034	0,026	0,213	0,196	0,094
	B2	0,026	0,026	0,045	0,128	0,102
ICOpH	A1	0,004	0,014	0,013	0,012	0,008
	A2	0,002	0,005	0,010	0,023	0,017
	B1	0,003	0,009	0,011	0,017	0,010
	B2	0,004	0,013	0,008	0,009	0,013
ICOTRO	A1	0,190	0,240	0,370	0,740	0,590
	A2	0,170	0,340	0,960	0,510	0,710
	B1	0,240	0,460	1,880	3,720	4,430
	B2	0,240	1,210	1,380	1,350	1,540
IBF	A1	8,079	8,624	8,981	9,203	7,892
	A2	6,868	7,235	7,402	7,334	7,174
	B1	6,66	6,422	6,098	7,186	6,159
	B2	6,485	6,701	6,520	6,887	6,904
Sapróbico	A1	3,571	3,684	3,571	3,538	3,500
	A2	3,526	3,833	3,667	3,760	3,550
	B1	4,000	3,786	3,692	3,824	3,769
	B2	3,684	3,813	3,500	3,824	3,684
BMWP/Col	A1	48	31	38	61	39
	A2	27	26	31	45	31
	B1	15	15	24	29	20
	B2	38	20	29	34	34

Índice	Temporada	E1	E2	E3	E4	E5
ASPT	A1	4,385	3,455	3,615	3,700	3,917
	A2	4,000	3,200	3,917	3,412	3,917
	B1	2,113	2,890	3,211	3,173	2,944
	B2	3,846	2,900	3,167	3,308	3,431

Anexo 2. Resultados de la prueba Shapiro-Wilks (modificado) de los valores de los índices de calidad del agua del cauce principal de la microcuenca Hato de la Virgen. (*) $p < 0,05$, sin distribución normal. **Fuente:** Los autores

Índice	n	Media	D.E.	W	p
ICA	20	0,49	0,06	0,89	0,0622
ICOMI	20	0,79	0,25	0,77	<0,0001 *
ICOpH	20	0,01	0,01	0,95	0,6776
ICOMO	20	0,8	0,1	0,9	0,1066
ICOSUS	20	0,1	0,08	0,8	<0,0001 *
ICOTRO	20	1,06	1,15	0,73	<0,0001 *
SAPROBICO	20	3,69	0,14	0,92	0,2222
IBF	20	7,24	0,89	0,88	0,0502
BMWP/Col	20	31,75	11,25	0,95	0,5918
ASPT	20	3,43	0,51	0,97	0,865